

04

Критерий подобия параметров открытого разряда для различных газов

© А.И. Головин

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша
(ГНЦ ФГУП „Центр Келдыша“), Москва
E-mail: aigolovin@hotmail.ru

Поступило в Редакцию 17 октября 2014 г.

На основе ранее построенной простейшей математической модели для описания процессов в генераторах электронного пучка на основе высоковольтного тлеющего разряда с убеганием электронов найдена зависимость тока разряда от приложенного напряжения. Проведен анализ влияния сорта газа на ток разряда, проведено сравнение полученных зависимостей с результатами экспериментов.

В работах [1–3] приведены некоторые результаты выполненных нами исследований работы генераторов пучков электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с убеганием электронов (открытого разряда). В последней работе предложена упрощенная одномерная модель разряда и найдена его вольт-амперная характеристика, показавшая удовлетворительное совпадение с результатами экспериментов. Такая модель дает возможность проанализировать зависимость вольт-амперной характеристики разряда от сорта газа, что представляет значительный интерес, так как большинство исследователей изучают разряд в гелии, практически не уделяя внимания другим газам [4].

Далее будем использовать те же обозначения, что и в работе [3]. Размер зоны катодного падения потенциала и вольт-амперная характеристика разряда представлены в [3] соотношениями (12) и (13). Используя эти формулы, можно получить выражение для тока разряда в зависимости от приложенного напряжения

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

Здесь введен имеющий размерность мощности параметр w , который можно представить в следующей форме: $w = w_0 w_m N^2 S$.

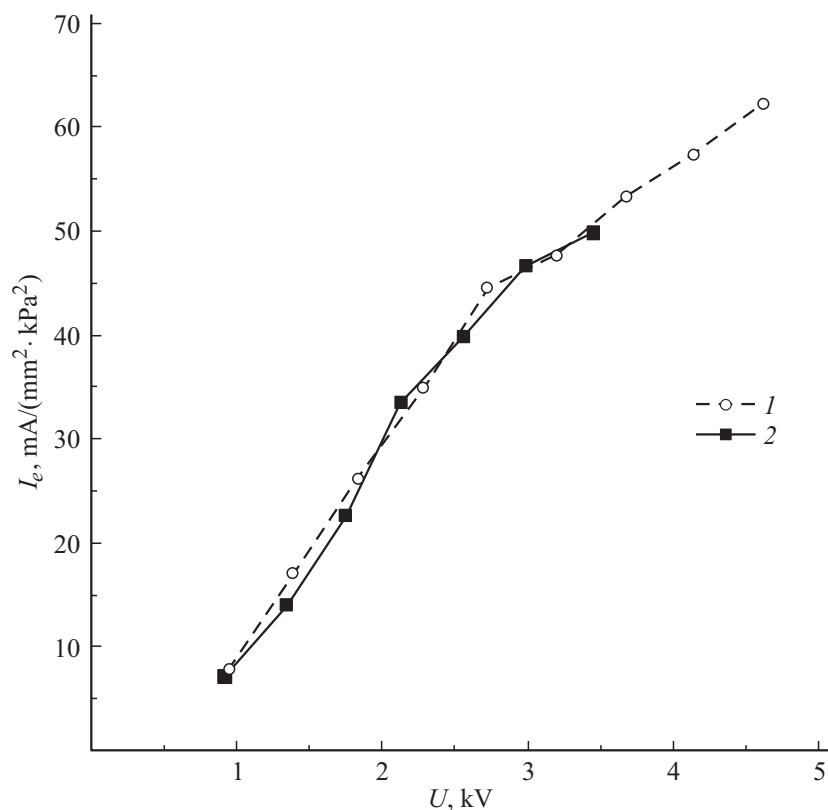
Первый множитель содержит только фундаментальные физические константы: $w_0 = \frac{e^5}{64\pi^3\epsilon_0^4}$. Второй множитель характеризует сорт газа: $w_m = \frac{Z^{7/2}n^{5/2}}{M^{1/2}\sigma_r^{1/2}I_i^{5/2}}$ ($n = N_a/N$ — количество атомов в молекуле, Z — заряд ядра, σ_r — сечение резонансной перезарядки, I_i — энергетическая „цена“ образования иона, M — молекулярная масса). Последние два множителя — квадрат концентрации молекул газа и рабочая площадь катода.

Для входящего в w_m сечения резонансной перезарядки известна теоретическая формула [5], которую в предположении однократной ионизации можно представить в виде $\sigma_r = \frac{I_H}{I_1}\sigma_{r0}$, где I_H — потенциал ионизации атома водорода, I_1 — потенциал ионизации молекулы газа, σ_{r0} — множитель, логарифмически зависящий от I_H/I_1 . Поэтому можно с приемлемой точностью считать, что сечение перезарядки обратно пропорционально потенциалу ионизации молекул газа.

В безразмерное отношение JU/w входят следующие величины, описывающие свойства газа: коэффициент эмиссии под воздействием бомбардировки ионами, отношение энергетической цены образования движущегося к катоду быстрого нейтрала к коэффициенту эмиссии под воздействием бомбардировки нейтралами, средний потенциал ионизации (входит в коэффициенты ξ под логарифмом и в виде малых слагаемых). Можно ожидать, что эти величины незначительно зависят от сорта газов.

Предложенная в [3] модель не учитывает краевые эффекты, а в работе [2] отмечено, что при изменении поперечного диаметра разрядного промежутка (ограничен диэлектриком) ток меняется непропорционально доступной площади катода, причем размер области эрозии катода (рабочей области) меньше диаметра отверстия в диэлектрике. Это можно объяснить гибелью части движущихся к катоду ионов и быстрых нейтралов на поверхности ограничивающего разряд диэлектрика. В результате, размер рабочей области катода уменьшается на некоторую величину (в работе [2] — на 0.2 mm), зависящую, очевидно, от конструкции генератора электронного пучка и рабочего давления. Поэтому ожидать строгого подобия по параметру JU/w не следует.

При одинаковом давлении, площади катода и напряжении отношение токов разрядов в двух различных газах $J_1/J_2 = w_{m1}/w_{m2}$. Применительно, например, к сравнению разрядов в воздухе и гелии,



Вольт-амперные характеристики разрядов в гелии и парах воды. Токи в гелии умножены на 32 (1 — вода при давлении 200 Па, 2 — гелий при давлении 1500 Па).

$w_{m\text{Air}}/w_{m\text{He}} \approx 140$, что неплохо совпадает с экспериментальными данными рис. 5 работы [2] (отнормированы на квадрат давления).

Одинаковых значений токов разрядов для различных газов можно ожидать, если давления газов относятся как $p_1/p_2 = \sqrt{w_{m2}/w_{m1}}$. Для гелия и воздуха $p_{\text{He}}/p_{\text{Air}} \approx 11.8$, т. е., например, давлению воздуха 133 Па соответствует давление гелия около 1574 Па. Интересно отметить, что полученное отношение давлений гелия и воздуха соответствует

отношению параметров pd этих газов при одинаковом пробойном напряжении на левой ветви кривой Пашена [6].

Аналогичное сравнение выполнено для разрядов в гелии и парах воды, реализованных на одном и том же генераторе электронного пучка. Результаты приведены на рисунке, где показаны экспериментально измеренные значения удельного тока I_e — тока разряда, отнесенного к площади катода и квадрату давления. Измерения выполнены в гелии при давлении 1500 Па и парах воды при давлении 200 Па, для удобства анализа результатов измеренные в гелии значения умножены на $w_{m\text{Water}}/w_{m\text{He}} \approx 32$. Наблюдается очень хорошее совпадение.

Проведенный анализ подтверждает, что предложенная в [3] модель открытого разряда дает качественно правильное описание вольт-амперной характеристики. При этом формула (1) может быть предложена для аппроксимации экспериментальных данных.

Список литературы

- [1] Бобров В.А., Войтешонок В.С., Головин А.И. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 121–126.
- [2] Головин А.И., Голубев М.М., Егорова Е.К., Туркин А.В., Шлойдо А.И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 5. С. 41–45.
- [3] Головин А.И., Егорова Е.К., Шлойдо А.И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 10. С. 27–33.
- [4] Сорокин А.Р. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 47–55.
- [5] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом „Интеллект“, 2009. 736 с.
- [6] Сливков И.Н., Михайлов В.И., Сидоров Н.И., Настюха А.И. Электрический пробой и разряд в вакууме / Под ред. Б.М. Гохберга. М.: Атомиздат, 1966. 298 с.