

Секция В

ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ И НЕКОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 533.9..15; 533.9.082

Зондовая диагностика аномального тлеющего разряда в чистых условиях

П.А. Бохан¹, П.П. Гутин¹, М.А. Лаврухин¹, Д.Э. Закревский¹,
Г.В. Шевченко^{1,2}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
630090, Новосибирск, Россия, пр. Академика Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия, ул. Пирогова, 1, shevchenko@isp.nsc.ru

Работа посвящена исследованию стационарного аномального тлеющего разряда в гелии с катодом из меди в «физически чистых» условиях. Показано, что в диапазоне давлений гелия 3,5–9 Торр вольт-амперные характеристики разряда с холодным медным катодом носят немонотонный характер. Исследование распределения электрического поля в области катодного падения потенциала и рассчитанные зависимости эффективного коэффициента размножения электронов Таунсенда продемонстрировали корреляцию последнего с вольт-амперными характеристиками и смену механизма разряда при достижении минимума тока при напряжении ~ 1500 В для условий настоящей работы.

Ключевые слова: разряд, катодное падение потенциала, зондовые измерения, гелий, коэффициент Таунсенда; discharge, cathode sheath, probe measurements, helium, Townsend coefficient.

Введение

Исследования различных видов аномального тлеющего разряда АТР, ввиду применения в плазменных коммутационных устройствах, источниках когерентного и некогерентного излучения, плазмохимических и плазмобиологических реакторах и т.д. актуальны. Несмотря на долгую историю изучения АТР разного вида демонстрируют свои неизвестные свойства. В [1, 2] показано, что в АТР в «физически чистых» условиях (условия минимизации воздействия контролируемой и неконтролируемой примесей на процессы формирования разрядного тока) наблюдаются нерегулярности в поведении ВАХ – S образный вид зависимости (в координатах напряжение U – ток I). Такие характеристики были продемонстрированы в разрядах разного вида («открытый» [1] и аномальный тлеющий [2]), с различными материалами катодов – титан, молибден, карбид кремния и медь) и при разном способе инициации этих разрядов. Предполагается, что это является следствием изменения эмиссионных свойств холодных катодов и поведения размножения электронов в катодном слое. Для определения механизмов, участвующих в формировании вольт-амперных характеристик такого вида требуется понимание процессов, происходящих в области катодного падения потенциала. Таким образом целью настоящей работы является исследование распределения электрического поля в области катодного падения потенциала в аномальном тлеющем разряде АТР в «физически чистых» условиях.

Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена экспериментальная ячейка с внешним диаметром 2,5 см, представлявшая собою разрядную структуру: плоский медный катод – плоский титановый анод. Межэлектродное расстояние $d = 3$ см, рабочая зона катода – 2 см^2 , ограниченная набором пластин с отверстиями с разным внутренним диаметрами из оксида алюминия Al_2O_3 . Подача и откачка газа из рабочего объема осуществлялась через радиальные отверстия анода. Рабочий газ – гелий He с объемной долей 99,9999% подавался в разрядный объем через азотную ловушку. Подробное описание экспериментальной установки, разрядной ячейки, процедуры ее обезгаживания, тренировки катода и т.д. представлены в [3]. После процедуры подготовки к измерениям рабочий вакуум в ячейке составлял менее 10–6 Торр при фактическом натекании высоковакуумной системы и разрядного объема менее 10–6 Торр/ч.

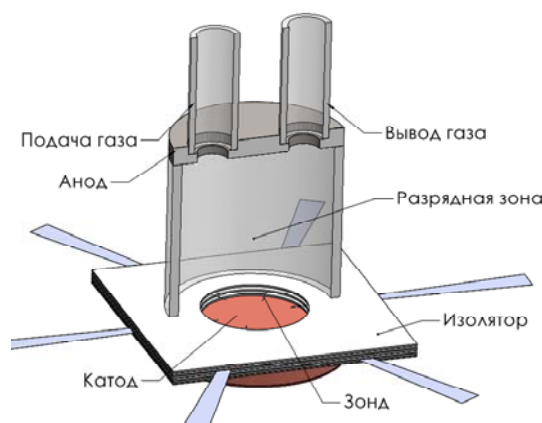


Рис. 1. Конструкция исследуемой ячейки

Измерение потенциалов в области катодного падения потенциала КПП осуществлялось при помощи радиальных зондов, которые представляли из себя никелевые нити диаметром 50 мкм, которые выступали на 3 мм от края отверстия в керамической пластине в разрядную зону. Использовались 6 зондов, по 3 штуки через 120° на расстоянии от катода 0,95 и 1,35 мм.

Измерения проводились путем выравнивания потенциала на зонде постоянным напряжением от отдельного источника и при контроле тока через зонд I_p до момента пока $I_p = 0$. Ток ограничивался до $I_p \sim 5$ мкА балластными сопротивлениями 2–43 МОм. Искомое значение вычислялось путем усреднения значений потенциалов на каждом из трех равноудаленных зондов. Перед измерением потенциала каждый зонд тренировался разрядом с током до 100 мкА в течение не менее 10 минут до наступления момента стабилизации напряжения и тока на зонде.

Вольт-амперные характеристики

На рис. 2 представлено семейство ВАХ при различном давлении гелия p_{He} при питании источником постоянного тока в диапазоне 200–1700 В. Измерения проводились в режиме «прокачки» газа со скоростью 100 мл/мин. Совокупность измерений ВАХ при различных давлениях гелия p_{He} демонстрирует следующую картину: при $p_{\text{He}} < 7$ Торр ВАХ имеют монотонно возрастающий вид с аппроксимационным законом $j \sim p^x \cdot U^y$, при этом параметр «y» с увеличением давления уменьшается. При $p_{\text{He}} > 7$ Торр зависимость $U(I)$ становится немонотонной: при увеличении напряжения наблюдается рост тока, при $U \sim 550$ В достигается максимум тока, а дальнейшее увеличение напряжения приводит к уменьшению разрядного тока I до $U \sim 1500$ В, в дальнейшем при повышении напряжения наблюдается очередное увеличение тока.

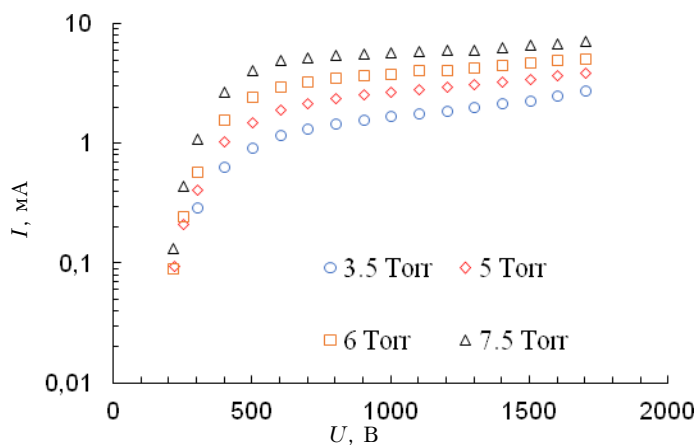


Рис. 2. ВАХ АТР в «чистых» условиях в разрядной ячейке с медным катодом при разном p_{He}

Измерения электрического поля

Для случая стационарного разряда используя зондовые измерения электрического потенциала можно оценить распределение электрического поля в области КПП согласно известному выражению $E = \nabla U$, где E — величина электрического поля, В/см; U — потенциал, В. В допущении линейности распределения электрического поля в области КПП [4, 5] экспериментальная зависимость потенциала плазмы вдоль области КПП $U(z)$ может быть найдена методом наименьших квадратов (z — линейная координата точки измерения

в области КПП). На рис. 3 приведены типичные результаты измерения распределения U и рассчитанные распределения E для случая напряжения на катоде 1700 В.

Для каждого полученного распределения электрического поля $E(z)$ возможно определить распределения коэффициента размножения Таунсенда в области КПП $\alpha(z)/N$, где N – концентрация атомов рабочего газа, на основании аппроксимации (1) [6]:

$$\alpha/N = 0,8 \cdot 10^{-16} \exp(-16\sqrt{\frac{N}{E}} - 3,26 \cdot 10^{-4} \frac{E}{N}). \quad (1)$$

Эффективное значение приведенного коэффициента Таунсенда (2), позволяет интегрально описать размножение в области катодного слоя на длине катодного падения потенциала l_c :

$$\overline{\alpha/N} = \frac{1}{N \cdot l_c} \int_0^{l_c} \alpha(E(z)) d(E(z)). \quad (2)$$

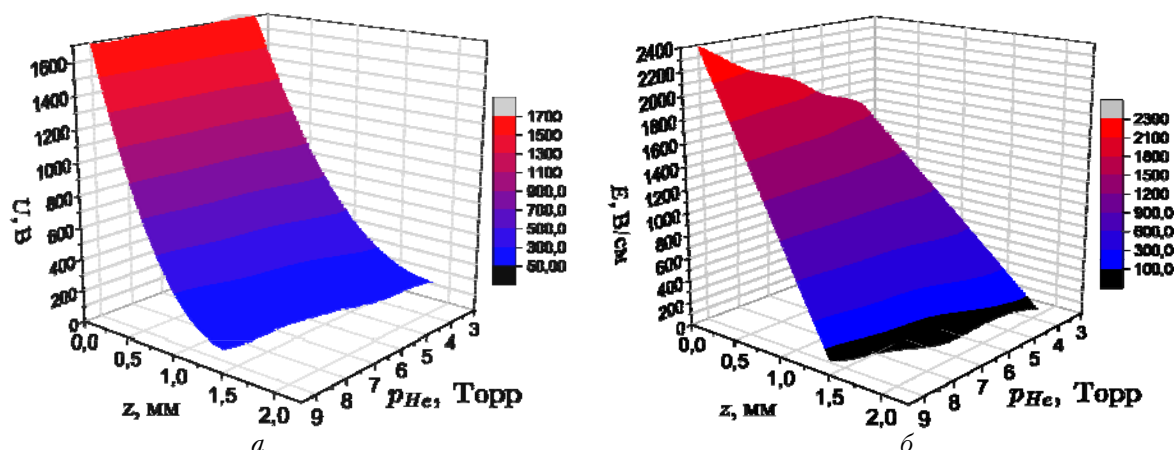


Рис. 3. Распределения $U(z)$ (а) и $E(z)$ (б) в области КПП при разном p_{He} и фиксированном напряжении на катоде 1700 В

На рис. 4 представлены значения эффективного коэффициента размножения электронов Таунсенда, рассчитанного согласно формуле (2) без учета нагрева газа и с учетом нагрева газа (т.е. изменения концентрации частиц в области КПП) аналогично работе [7]. Рассчитанные из зондовых измерений значения l_c увеличиваются при росте напряжения (и мощности). Учет нагрева газа приводит к тому, что значение l_c стремится к значению $e^{-1} \approx 0,37$ от нормальной длины КПП, что удовлетворительно согласуется с теорией [8]. На рис. 5 представлены значения эффективного коэффициента размножения электронов Таунсенда, рассчитанного согласно формуле (2) без учета и с учетом нагрева газа коррекцией концентрации атомов как $N/N_0 = T_0/T$, где N_0 – концентрация атомов при температуре $T_0 = 300$ К, N – концентрация атомов при исследуемой температуре T рабочего газа. При сопоставлении динамики коэффициента размножения электронов Таунсенда с вольт-амперными характеристиками, представленными на рис. 2, при увеличении напряжения наблюдается схожая картина поведения значений α и I . Однако, после прохождения минимума тока и при его увеличении в области значений $U > 1500$ В наблюдается небольшое увеличение тока, которое,

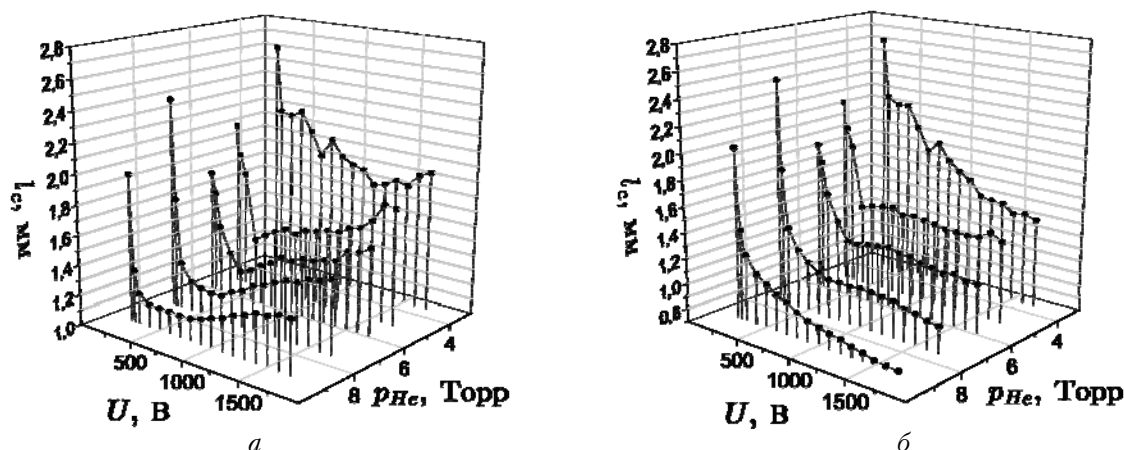


Рис. 4. Зависимость l_c от U на катоде и p_{He} без учета нагрева газа (а) и с учетом нагрева газа (б)

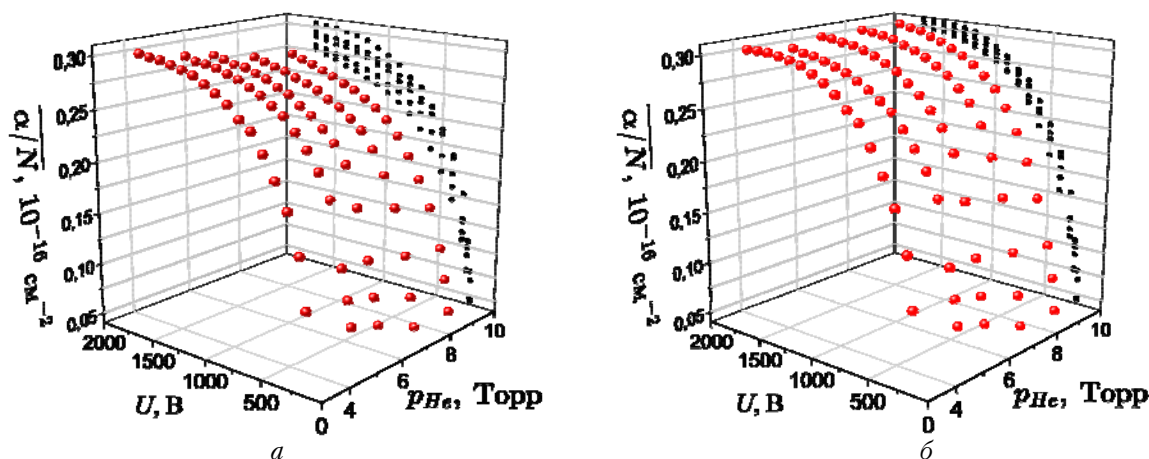


Рис. 5. Зависимость $\overline{\alpha/N}$ от U и p_{He} без учета нагрева газа (а) и с учетом нагрева газа (б) (серые точки – проекции на плоскость $\overline{\alpha/N} - U$)

должно быть более выраженным при дальнейшем увеличении напряжения [3]. Коэффициент размножения электронов при $U \approx 1500$ В практически достигает своего максимального значения, а в дальнейшем уменьшается. Дальнейшее увеличение тока связано со сменой механизма поддержания разряда на фотоэмиссионный [2, 7].

Заключение

В работе показано, что в «физически чистых» условиях в диапазоне давлений гелия 3,5–9 Торр ВАХ разряда с холодным медным катодом носят немонотонный характер. Исследование распределения электрического поля в области катодного падения потенциала и рассчитанные зависимости эффективного коэффициента размножения электронов Таунсенда продемонстрировали корреляцию последнего с ВАХ и смену механизма разряда на фотоэмиссионный при достижении минимума тока при $U \sim 1500$ В для условий настоящей работы.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 24-19-00037.

Финансирование. Часть работы выполнена в рамках Государственного задания, проект № FWGW–2025–0019.

Список литературы

1. Бохан П.А. О физических процессах в «открытом» разряде // Успехи Физических Наук. 2018. Т. 188. С. 1361–1366.
2. Бохан П.А. и др. Исследование свойств аномального тлеющего разряда с генерацией электронных пучков в гелии, кислороде и азоте // Физика плазмы. 2019. Т. 45, № 11. С. 1022–1040.
3. Bokhan P.A. et al. Current–voltage characteristics and mechanisms of electron emission from cold cathodes in a helium discharge // Plasma Sources Sci Technol. 2022. V. 31 N 12. P. 125009.
4. Den Hartog E.A., Doughty D.A., Lawler J.E. Laser optogalvanic and fluorescence studies of the cathode region of a glow discharge // Phys Rev. 1988. V. 38, N 5. P. 2471–2491.
5. Hartmann P. et al. Heavy-Particle Hybrid Simulation of a High-Voltage Glow Discharge in Helium // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. V. 42, Part 1, N 6A. P. 3633–3640.
6. Bokhan A.P., Bokhan P.A., Zakrevsky D.E. Means for efficient electron beam generation in wide-aperture open-discharge light sources // Plasma Phys. Rep. 2006. V. 32, N 7. P. 549–562.
7. Bokhan P.A. et al. Investigation of the properties of glow discharge in helium under spectroscopically pure conditions // Phys Plasmas. 2025. V. 32, N 6. A. 063505.
8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 3-е изд. Долгопрудный: Интеллект, 2009.

P.A. Bokhan, P.P. Gugin, M.A. Lavrukhin, D.E. Zakrevsky, G.V. Shevchenko. **Probe diagnostics of abnormal glow discharge in pure conditions.**

The work is devoted to the study of a direct current abnormal glow discharge in helium with a copper cathode under “physically pure” conditions. In pressure range 3.5-9 Torr of helium, the nonmonotonic current-voltage characteristics of a discharge with a cold copper cathode were demonstrated. The study of the distribution of the electric field in the region of the cathode sheath and the calculated dependences of the effective Townsend electron multiplication coefficient demonstrated the correlation of the latter with the current-voltage characteristics and a change in the discharge mechanism when the minimum current is reached at a voltage of ~ 1500 V for the conditions of this work.