

УДК 533.9.082.76

Шаровая локализация анодного электронного потока тлеющего разряда

Козырев Александр Валентинович

kozykryl@gmail.com

Баршак Дмитрий Александрович

d.barshak@mail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Проведено феноменологическое исследование свойств гелий-неонового разряда. По виду вольтамперной характеристики и внешнему виду разряда установлено, что разряд аномальный, тлеющий с растущей вольтамперной характеристикой. Результаты, полученные по определению характеристик напряжения горения и удельной мощности разряда, показали, что в исследованных режимах наблюдается контракция разряда на аноде. При этом наблюдалась резкая неоднородность потока электронов на анод рабочего устройства. Получена зависимость феноменологических свойств контракции электронного потока на аноде в зависимости от удельной мощности разряда. Эффект наблюдается в определенном диапазоне удельных мощностей, и при уменьшении удельной мощности разряда эта локализация исчезает, а анодный поток становится практически однородным, диффузным. Механизм контракции может быть объяснен взаимодействием электронного потока с внешним и собственным магнитными полями. Это утверждение требует дополнительных детальных исследований.

Ключевые слова: тлеющий разряд, контракция, анодная область, плазма, вольтамперная характеристика, удельная мощность, магнитная изоляция

Spheric localization of the anode electron flux in a glow discharge

Kozyrev Aleksandr Valentinovich

kozykryl@gmail.com

Barshak Dmitry Alexandrovich

d.barshak@mail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This paper presents a phenomenological study of the properties of a helium-neon discharge. Based on the current-voltage characteristic and the discharge's appearance, it was established that the discharge is anomalous, glowing, and has an increasing current-voltage characteristic. The results obtained from determining the discharge voltage and specific power revealed that discharge contraction at the anode is observed in the studied conditions. Furthermore, a sharp non-uniformity of the electron flow to the anode of the working device was observed. A dependence of the phenomenological properties of electron flow contraction at the anode on the specific discharge power was obtained. The effect is observed within a certain range of specific powers, and as the specific discharge power decreases, this localization disappears, and the anode flow becomes virtually uniform and diffuse. The contraction mechanism can be explained by the interaction of the electron flow with the external and internal magnetic fields. This assertion requires further detailed research.

Keywords: glow discharge, contraction, anode region, plasma, current-voltage characteristic, specific power, magnetic insulation

Введение. Тлеющий разряд представляет собой классическую форму низкотемпературной плазмы, самоподдерживающийся разряд, возникающий при низких давлениях и умеренных напряжениях. Он характеризуется пространственной неоднородностью и наличием специфических областей, таких как катодное и анодное падения потенциала, положительный столб и другие [1]. Несмотря на многолетнее изучение, ряд тонких эффектов, в том числе пространственные неоднородности, такие как контракция (локализация токовой трубки), остаются предметом активного исследования [2, 3]. Контракция положительного столба — это переход тлеющего разряда от радиально-плавного профиля к суженной токовой трубке или оптически сжатой зоне возбуждения.

В Ne и Ar при достижении критических токов (десятки–сотни мА) и давлений (десятки–сотни Торр) наблюдается скачкообразный переход с гистерезисом и формированием тонкого токового шнура; ведущий механизм — кинетический. Не преобладает оптическая контракция: сужается зона излучения/ионизации, тогда как профиль $n_e(r)$ остается сравнительно плавным; доминирует тепловой механизм с характерными временами вплоть до нескольких минут (после прогрева).

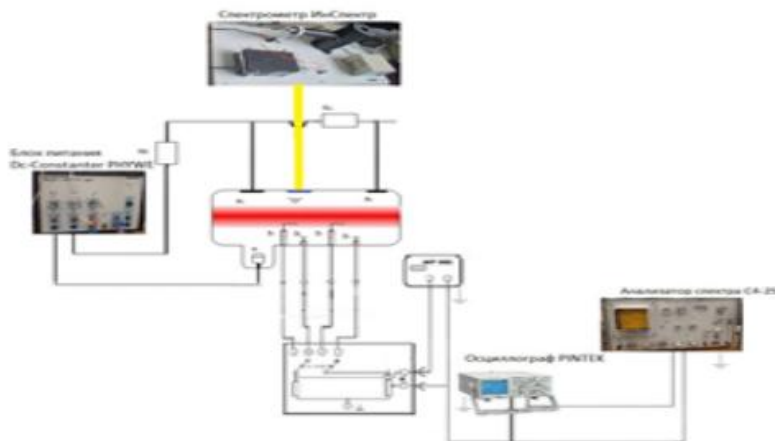
Для смеси Ne–Ne (9:1) при $p \approx 1$ Торр ожидаемо доминирует «гелиевая» (оптическая) составляющая; по мере роста U_r и $w = U_r I_r / V$ контракция проявляется и усиливается постепенно. Это согласуется с нашими наблюдениями: локализация у анода есть во всем исследованном диапазоне $U_r \approx 480\text{--}580$ В, усиливаясь при увеличении w .

Контракция на аноде, в частности, может быть связана с неустойчивостью анодного падения напряжения, изменением электронной температуры и локальными токовыми филаментами [4]. Данная проблема актуальна как с точки зрения фундаментального понимания процессов в газоразрядной плазме, так и для прикладных задач в области микрообработки материалов, плазмохимии и разработки плазменных источников [5, 6].

В работе проведено феноменологическое исследование условий возникновения и свойств контракции анодного электронного потока в тлеющем разряде Ne–Ne смеси.

Материалы и методы. Исследования проводились на установке «Плазма-2» на газоразрядной трубке с Ne–Ne наполнением при давлении около 133 Па. Диаметр трубки составлял 5 см, длина — 15 см, что соответствует объему $V \approx 2,95 \times 10^{-4} \text{ м}^3$.

Установка «Плазма-2» имеет наполнение Ne–Ne в отношении 9:1, используемое в гелий-неоновых лазерах в качестве активной среды (Ne–Ne-плазма). Самостоятельный разряд с токами разряда 5–10 мА и напряжением 0–600 В поддерживается ионной бомбардировкой алюминиевого полого холодного катода. Для зажигания разряда используется пьезоэлектронный игнайтер. В состав установки (рис. 1, а) входит адсорбционный узел восстановления рабочей среды газоразрядной трубки с напряжением накала 6,3 В и балластным резистором 5 кОм. Магнитное поле с индукцией 40–45 мТл создается постоянными магнитами (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Схема (а) и внешний вид установки «Плазма 2» (б)

В состав установки входили: источник питания 0–600 В; измерительные зонды 31-34, цифровой осциллограф PINTEK; цифровой мультиметр UNI-T UT61E.

Наблюдаемый эффект контракции представлен на рис. 2. Исследование проводилось по стратификации разряда (рис 2, а) и шаровой локализации разряда вблизи анода (рис 2, б). Анодная контракция в виде токовых трубок, оканчивающаяся шаровой локализацией, имеет четко выраженную регулярную структуру, вписывающаяся приблизительно в правильный многоугольник, повторяющий круговую поверхность плоского анода.



Рис. 2. Наблюдаемые разряды (а) стратифицированный разряд и эффект контракции на аноде А2 при удельной мощности 78,8 кВт/м³ (б)

Методика измерений. Методика измерений включала следующие этапы.

1. Получение устойчивого тлеющего разряда.
2. Снятие вольтамперной характеристики (ВАХ) разряда.
3. Визуальное наблюдение и фиксация структуры разряда, в частности, вблизи анода А2
4. Расчет удельной мощности разряда: $w = \frac{U_r \cdot I_r}{V}$ с погрешно-

стью: $\frac{\delta w}{w} = \sqrt{\left(\frac{\delta U_r}{U_r}\right)^2 + \left(\frac{\delta I_r}{I_r}\right)^2}$.

5. Анализ коэффициента гамма (γ), который определяется как отношение радиального диффузионного потока электронов ($\Gamma_{rad,e}$) к дрейфовому потоку электронов, обусловленному радиальным электрическим полем (E_r) $\gamma = \frac{\Gamma_{rad,e}}{\Gamma_{E_r}}$ [7].

Если значение коэффициента γ велико, то имеет место преобладание амбиполярных диффузионных потоков электронов по сравнению с дрейфовыми потоками электронов в радиальном электрическом поле.

Результаты. При исследовании была получена вольтамперная характеристика разряда (гистерезис отсутствует) (рис. 3) и установлена зависимость тока разряда I_r и с помощью двойных зондов Ленгмюра определена зависимость температуры T_e и концентрация электронов n_e в зависимости от удельной мощности разряда w (рис. 4). Визуально зафиксирован переход от диффузного режима к контрактированному при превышении критического значения удельной мощности разряда.

Экспериментальные данные и рассчитанные величины

U_r (В)	I_r (мА)	P (Вт)	w (кВт/м ³)	n_e ($\times 10^{16}$ м ⁻³)	T_e (эВ)
478	8,0	3,8	13,0	0,40	2,0
486	11,5	5,6	19,0	0,60	2,4
500	16,0	8,0	27,2	0,95	2,8
518	21,5	11,1	37,8	1,05	3,1
580	40,0	23,2	78,8	1,20	3,4

На рис. 3 и 4 соответственно представлены графики зависимостей тока разряда I_r от напряжения U_r и зависимость этого же тока I_r концентрации электронов n_e и температуры T_e от удельной мощности разряда w .

Анализ коэффициента γ показал его сильную зависимость от режима работы разряда и наличие областей с ухудшенной магнитной изоляцией, что коррелирует с наблюдением контракции (рис. 5) [7].

Обсуждение полученных результатов. Анализ результатов показывает, что в исследованном диапазоне удельной мощности $w \approx 13\text{--}79\text{ кВт/м}^3$ контракция анодной области присутствует во всех режимах и усиливается с ростом w . По мере увеличения U_r и I_r наблюдается постепенное сужение светящегося канала у анода и согласованный рост n_e при умеренном увеличении T_e и без скачкообразного перехода параметров и критического значения

удельной мощности w . Изменение ВАХ имеет практически линейную зависимость; границей контракции является гашение разряда при $Ur \approx 480$ В.

Полученная зависимость хорошо согласуется с теоретическими представлениями о нарушении баланса между ионизацией и диффузией при высоких плотностях энергии в плазме. Уравнение баланса частиц: $\frac{dn_e}{dt} = \nu_i n_e - \frac{n_e}{\tau_D} \approx 0$, где ν_i — частота ионизации; τ_D — время диффузии, нарушается в сторону преобладания ионизации в узкой области, что и приводит к контракции [8, 9].

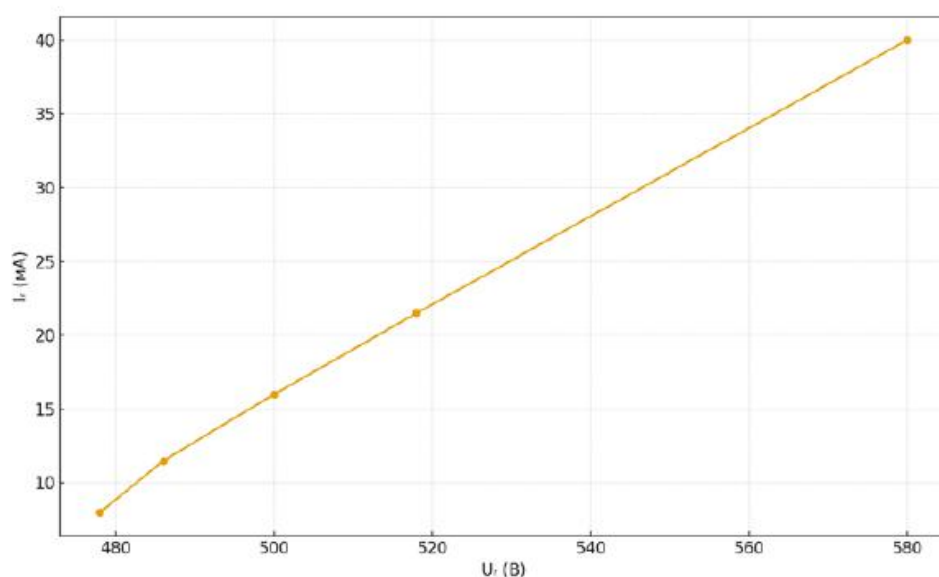


Рис. 3. ВАХ $I_r(U_r)$ для тлеющего He-Ne разряда

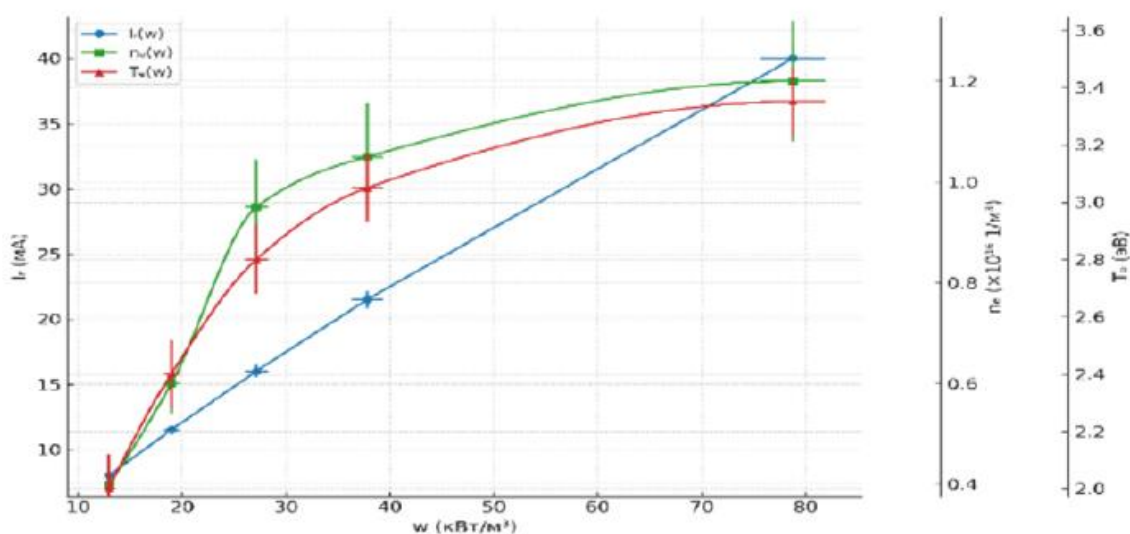


Рис. 4. Зависимость тока I_r , концентрации электронов n_e и температуры T_e от удельной мощности w

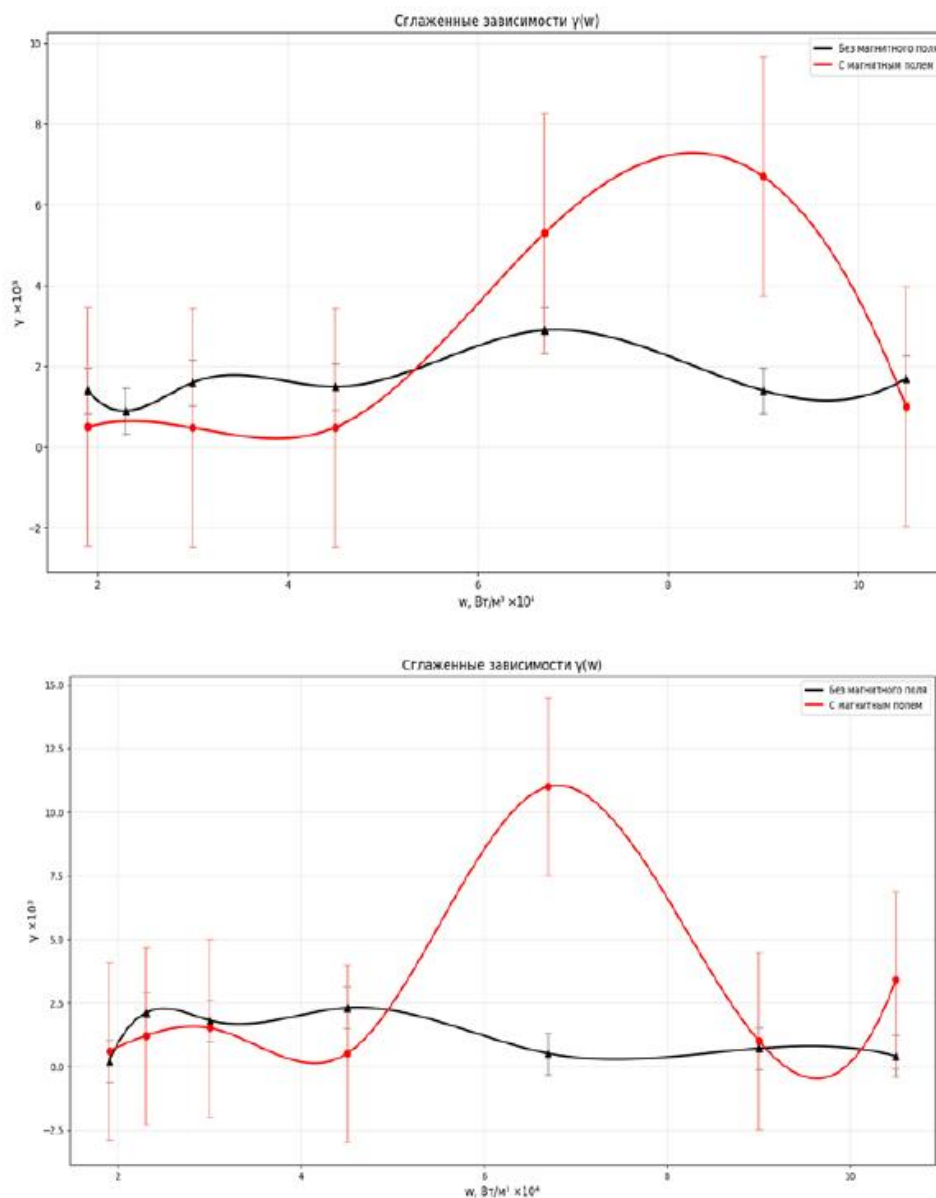


Рис. 5. Зависимость коэффициента магнитной изоляции γ от удельной мощности w [7]

Наблюдаемые особенности поведения коэффициента γ указывают на возможную связь механизма контракции с взаимодействием электронного потока токовых каналов с магнитными полями (как внешними, так и собственными, возникающими в токовых каналах), что приводит к усилению диффузионных потерь и дестабилизации разряда [10].

Заключение. В ходе работы проведено экспериментальное исследование аномального тлеющего разряда в смеси He–Ne (9:1) при низком давлении (≈ 1 Торр). Показано, что в исследованном диапазоне напряжений $U_r \approx \approx 480\text{--}580$ В (удельная мощность $w \approx 13\text{--}79$ кВт/м³) контракция анодной области наблюдается во всех режимах и усиливается с ростом w . Скачкообразного перехода и выделяемого критического значения удельной мощности

не обнаружено; границей режима выступает гашение разряда при $U \approx 480\text{В}$. Экспериментальные зависимости показывают практически линейный рост I_r и w с увеличением U_r . Зависимости $I_r(w)$, $n_e(w)$ и $T_e(w)$ согласуются с усилением локализации токовых анодных трубок по мере увеличения удельной мощности; влияние магнитного поля в диапазоне 40–45 мТл отмечается как перспективное направление для отдельной серии измерений. Визуальные наблюдения хорошо согласуются с электрическими измерениями. Анализ коэффициента γ выявил режимы с ухудшенной магнитной изоляцией плоского зонда у стенки газоразрядной трубки, что коррелирует с наблюдением контракции. Полученные результаты важны для фундаментального понимания физики тлеющего разряда и для оптимизации параметров плазменных устройств. Для дальнейшего исследования механизма контракции, связанного с магнитными полями, планируется проведение дополнительных экспериментов с контролируемым внешним магнитным полем и численное моделирование процесса.

Список источников

- [1] Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Москва, Наука, 1987, 592 с.
- [2] Богаертс А., Нейтс Э., Гейбельс Р., ван дер Мюллен Й. Газоразрядная плазма и ее применения. *Spectrochimica Acta. Часть В: Атомная спектроскопия*, 2002, т. 57, № 4, с. 609–658. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00406-2)
- [3] Годяк В.А. Нелокальная кинетика электронов в плазме газового разряда. *Источники плазмы: наука и технология*, 2006.
- [4] Fitzpatrick R. *Plasma Physics: An Introduction*. CRC Press, 2014, 293 p.
- [5] Смирнов Б.М. *Свойства газоразрядной плазмы*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2010, 357 с.
- [6] Цендин Л.Д. Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме. *Успехи физических наук*, 2010, т. 180, вып. 2, с. 139–164.
- [7] Козырев А.В., Айрапетянц А.В. Влияние ионно-звуковой турбулентности на магнитную изоляцию плоского зонда в аномальном тлеющем разряде. *Будущее машиностроения России. XVIII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. уч.): сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026, т. 2, с. 607–612.
- [8] Каменецкий Д.А. *Лекции по физике плазмы*. Москва, Атомиздат, 1968, 286 с.
- [9] Рожанский В.А. *Теория плазмы*. Санкт-Петербург, Лань, 2012, 320 с.
- [10] Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. *Физика тлеющего разряда*. Санкт-Петербург, Лань, 2010, 512 с.