

Особенности распределения параметров прианодной плазмы короткого тлеющего разряда с плоским и полым катодом

© С. Zhou, А.М. Астафьев, А.А. Кудрявцев, С. Yuan

Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

E-mail: astafev-aleksandr@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 4 июля 2025 г.

Принято к публикации 22 июля 2025 г.

Выполнены зондовые измерения коротких (без положительного столба) разрядов в гелии с полым и плоским катодом. Определены зависимости от давления плавающего потенциала, потенциала пространства, а также электронной температуры для обоих разрядов. Установлено, что потенциал изолированного зонда является более отрицательным (на величину порядка нескольких электронных температур) по отношению к потенциалу плазмы, при этом потенциал плазмы является положительным по отношению к аноду при низких давлениях газа. Проведенные измерения показали, что в разряде с полым катодом в прианодной области реализуются условия, когда электронная концентрация падает в ускоряющем электроны на анод поле.

Ключевые слова: потенциал зонда, тлеющий разряд, разряд с полым катодом, разряд с плоским катодом, анодное падение напряжения.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61678.8126

Ввиду большей (примерно на два порядка и более) подвижности электронов по сравнению с подвижностью ионов ток в немагнитной плазме переносится в основном электронами. Поскольку на катод поступает преимущественно ионный ток, а на анод — электронный, в приэлектродных областях газового разряда происходит перестройка потоков заряженных частиц и их сопряжение с плазмой.

В отличие от хорошо изученного однородного в продольном направлении положительного столба (РС) тлеющего разряда характеристики плазмы приэлектродных областей исследованы недостаточно. Основными причинами этого являются малые масштабы и резкая пространственная неоднородность в распределении их основных параметров, что приводит к трудностям диагностики. В свою очередь, поскольку размеры приэлектродных областей меньше длины энергетической релаксации электронов, для их описания традиционная гидродинамическая модель неприменима и требуется кинетический анализ (подробнее см., например, [1,2]). Следует отметить, что для стабильного поддержания разряда прианодная область разряда так же важна, как и прикатодная, однако первой уделяется меньшее внимание и процессы в ней исследованы гораздо менее подробно [1,2]. Принято выделять два механизма прианодных явлений в разряде.

Первый из них сформулирован еще Ленгмюром: поскольку дрейфовый электронный ток в плазме значительно меньше, чем тепловой (хаотический) электронный ток из слоя на анод, электрическое поле в прианодном слое (АФ) должно тормозить электроны и вблизи анода отсутствует светящаяся область. Это соответствует отрицательному АФ, потенциал которого равен нескольким электронным температурам T_e .

Поскольку электроны находятся в потенциальной яме, пространственное распределение их плотности соответствует традиционному распределению Больцмана в зависимости от потенциальной энергии и температуры.

С другой стороны, фон Энгелем было указано, что возможна ситуация, когда ионный ток монотонно растет с увеличением расстояния от анода, приближаясь к его значению в РС. В этом случае ионы рождаются в тонком положительном АФ, при этом вблизи анода наблюдается яркое свечение, а больцмановское распределение не имеет места [1,2]. Если в такой сильно неравновесной плазме с вытягивающим электроны на анод поле их плотность падает по направлению к аноду, то возможна реализация инверсии функции распределения электронов (EDF) (подробнее см. [3]).

Напомним, что предсказание и реализация инверсных заселенностей возбужденных состояний атомов и молекул позволили на практике создать обширный класс различных лазеров, которые широко используются в разных технологических приложениях. По аналогии с инверсной заселенностью возбужденных состояний в лазерах среда с инверсной EDF в газах с рамзауэровским минимумом сечения упругого рассеяния может усиливать электромагнитные волны. Поэтому поиски плазменных сред с падающей по направлению к аноду плотностью электронов в ускоряющем на анод поле представляет большой интерес для решения задачи создания инверсной EDF [3].

Анализ, проведенный Цендиным в [2], показал, что до сих пор остаются неясными даже физические механизмы и отсутствует количественный критерий знака анодного падения потенциала относительно плазмы положительного столба разряда. С другой стороны, в коротком (без РС) тлеющем разряде с плоскими электродами вопрос

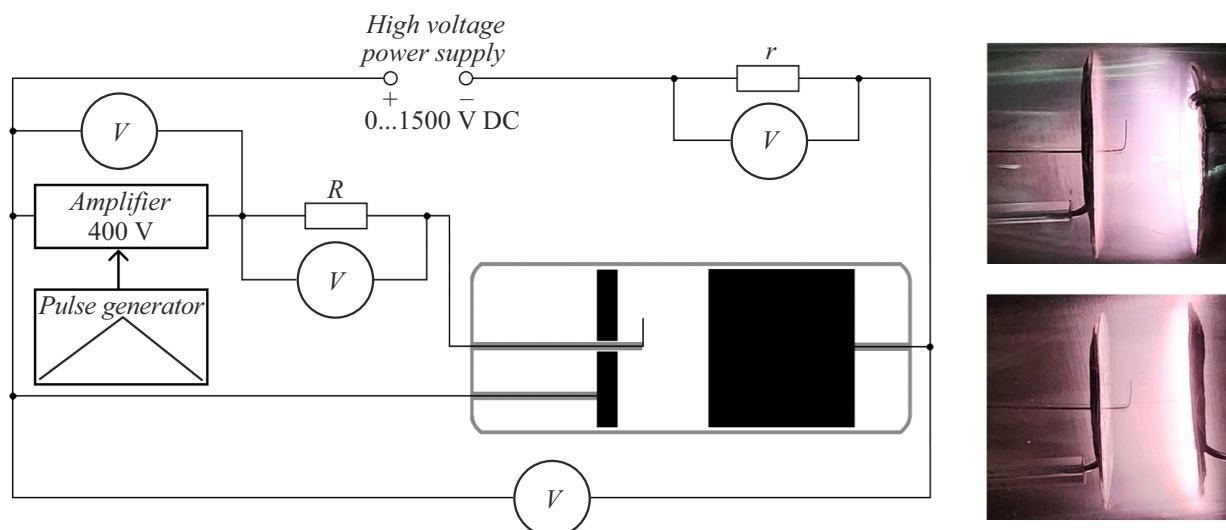


Рис. 1. Схема системы диагностики разряда и изображения разрядов в гелии с полым и плоским катодами (на вставках).

о знаке анодного падения имеет вполне определенную интерпретацию с точки зрения как теории, так и эксперимента [1,4].

Пока разряд состоит только из катодного слоя (CF) и плазмы отрицательного свечения (NG), максимум плотности плазмы, соответствующий минимуму потенциала и точке обращения знака электрического поля, расположен в NG [1]. Поэтому электроны в плазме NG находятся в потенциальной яме с больцмановским распределением плотности, знак потенциала AF отрицательный (описанный Ленгмюром механизм) [1,4]. Его величина порядка температуры электронов: $e\varphi_A \approx T_e \ln(M_i/m_e)$, где m_e и e — масса и заряд электрона, M_i — масса иона, φ_A — потенциал анода. Полный перепад потенциала в этой яме мал (менее 1–2 eV), поскольку он определяется сравнительно низкой (менее 1 eV) температурой запертых электронов T_e , при этом сам анод не светится [1,4].

Поскольку в РС поле прямое и ускоряет электроны к аноду, при увеличении параметра pL (увеличении длины тлеющего разряда L или давления p) с последующим формированием после NG фарадеева темного пространства (FDS) в этой переходной к РС области поле снова меняет знак. Потенциал AF является положительным (порядка потенциала ионизации газа), и появляется яркая светящаяся пленка на аноде [1,4]. При дальнейшем увеличении параметра pL светящаяся область прорастает от анода к катоду и образуется РС.

К настоящему времени прианодная плазма исследована как теоретически, так и экспериментально для короткого разряда с плоскими электродами. Однако для ряда приложений интерес представляет разряд с полым катодом, физические характеристики которого отличаются от соответствующего разряда с плоскими электродами [5].

В настоящей работе выполнены эксперименты в коротких разрядах с плоским и полым катодом в гелии.

Результаты для разряда с плоскими электродами в целом соответствуют данным [4]. В свою очередь для разряда с полым катодом картина качественно подобна разряду с плоскими электродами: при малых давлениях наблюдается отрицательный потенциал AF, в то время как с повышением давления он становится положительным, когда поле вытягивает электроны на анод при сравнительно низком значении T_e . При дальнейшем увеличении давления температура электронов растет с формированием ярко светящегося РС.

Для проведения измерений в разрядах с плоским и полым катодом была использована экспериментальная установка, представленная на рис. 1. Расстояния между электродами (15 mm), диаметр разрядной трубки (25 mm), плоский анод и зонд были одинаковыми для обоих типов разрядов. Держатель зонда из кварцевого капилляра с внешним диаметром 1 mm вставлялся через центр плоского анода, а сам зонд диаметром 0.2 mm и длиной 5 mm был загнут на 90° относительно оси разрядной ячейки и располагался на расстоянии 3 mm от плоского анода.

Для зажигания разряда использовался регулируемый источник постоянного напряжения (HSPY-1500-005 до 1500 V), который подключался к разрядной ячейке через балластное сопротивление r величиной 5 kΩ. Для измерения зондовых вольт-амперных характеристик в цепь зонда включались высоковольтный (до 400 V) усилитель подаваемого от генератора (Rigol DG1022Z) сигнала треугольной формы и токизмерительный резистор R величиной 1 kΩ. Зондовые характеристики, а также напряжение и ток разряда регистрировались четырехканальным осциллографом высокого разрешения (Rigol DHO 4204). Для регистрации тока разряда использовался дифференциальный пробник (Rigol RP1100D), который подключался к балластному сопротивлению r . Для зажигания разряда использовался сверхчистый гелий.

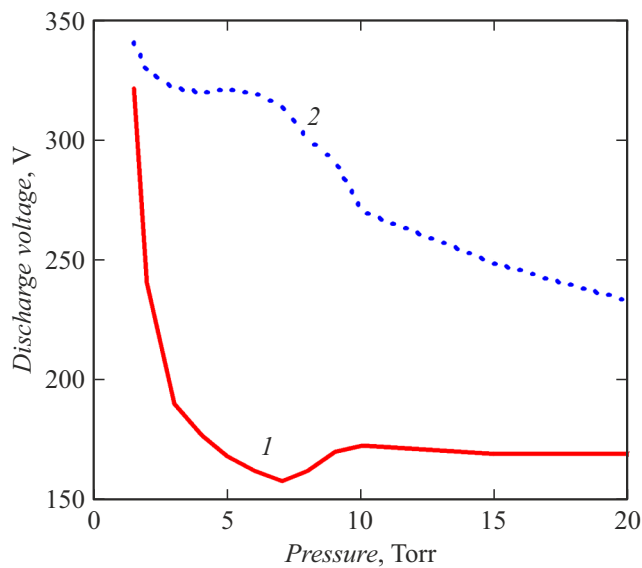


Рис. 2. Напряжения горения разрядов с плоским (1) и полым (2) катодами.

На вставках к рис. 1 представлены изображения разряда в гелии с полым и плоским катодом.

В процессе измерений выяснилось, что для достоверного определения отрицательного потенциала АФ простое измерение плавающего потенциала непригодно, а требуется знание потенциала пространства. Для этих целей использовалось положение нуля второй производной зондового тока по его потенциалу. Данная система позволяла проводить измерения в автоматизированном режиме при разных давлениях гелия.

На рис. 2 представлены результаты измерений напряжения горения разрядов с плоским и полым катодом при одинаковом значении тока разряда 4 мА. Видно, что напряжение горения в целом падает при росте давления, что характерно для короткого (без положительного столба) разряда с растущими вольт-амперными характеристиками [1]. Резкий провал на зависимости напряжения горения от давления для разряда с плоским катодом, а также немонотонная зависимость для разряда с полым катодом в интервале давлений 3–10 Torr могут быть связаны с S-образной формой кривой Пашена [6].

На рис. 3 представлены зависимости плавающего потенциала зонда (кривые 1a, 2a) и потенциала пространства (кривые 1b, 2b) при токе 4 мА для разряда с плоским и полым катодом от давления гелия. Оказалось, что для всех исследованных условий они отрицательны, что соответствует полю, вытягивающему электроны на анод, т.е. сценарию фон Энгеля. Однако отсутствие сценария Ленгмюра для разряда с плоскими электродами при низких давлениях, когда он состоит только из CF и плазмы NG, противоречит как теории [1], так и эксперименту [4]. Измерения электронной температуры показали, что, как и ожидалось [1,4], она при этом низкая и равна менее 1 эВ (рис. 4). Поэтому перепад потенци-

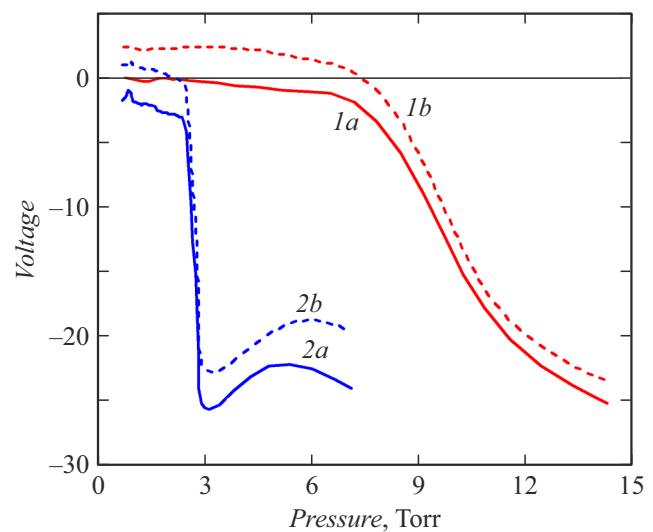


Рис. 3. Зависимости плавающего потенциала зонда (1a, 2a) и потенциала пространства (1b, 2b) разряда с плоским (1a, 1b) и полым (2a, 2b) катодами от давления гелия.

ала между плазмой и анодом при низких давлениях мал и составляет величину порядка 1 В, что требует более тщательного определения его значения. Известно (см., например, [7]), что потенциал изолированного зонда является более отрицательным (на величину порядка нескольких T_e) по отношению к потенциалу плазмы. Это маскирует реальную картину. Действительно, зависимости потенциала пространства, представленные кривыми 1b, 2b на рис. 3, разрешают возникший парадокс.

Из рис. 3 видно, что как для плоского, так и для полого катода с повышением давления газа наблюдается скачкообразный переход от слабоположительных

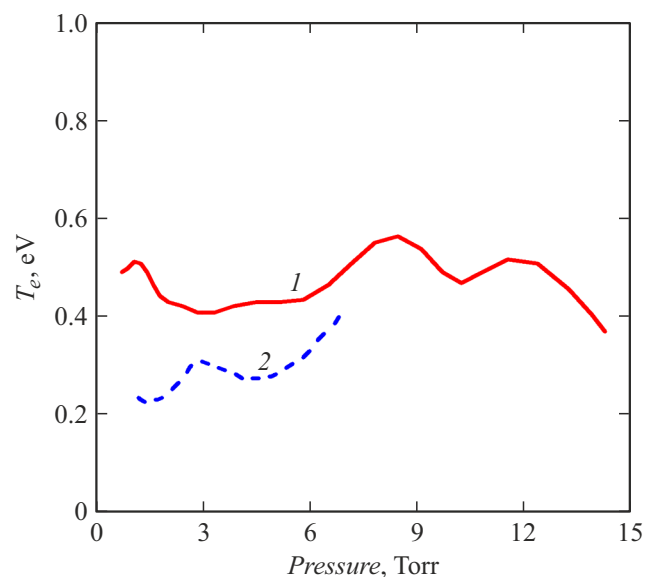


Рис. 4. Температуры электронов для разряда с плоским (1) и полым (2) катодами.

потенциалов анода (сценарий Ленгмюра) к отрицательным (сценарий фон Энгеля), составляющим величину порядка потенциала возбуждения гелия. Здесь следует отметить две особенности. Этот переход выражен более резко и наблюдается при более низких давлениях для разряда с полым катодом. Основной причиной этого является тот факт, что в случае полого катода электроны размножаются в сильном радиальном поле, перпендикулярном аксиальному току в направлении анода. Поэтому во всех случаях плазма NG сосредоточена внутри полого катода. В то же время как разрядный ток, так и пучок быстрых электронов из катодного слоя, формирующих плазму NG, направлены в одном и том же аксиальном направлении. Поэтому как длина NG, так и положение второй точки обращения поля к аноду зависят от пробега быстрых электронов и сопряжения NG и FDS более сложным образом.

Другой характерной особенностью является факт значительного диапазона условий, когда в вытягивающем на анод поле (сценарий фон Энгеля) температура электронов низкая (рис. 4) и соответствует не РС, а переходной области FDS.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в разряде с полым катодом в прианодной области реализуются условия, когда электронная концентрация падает в ускоряющем электроны на анод поле. Как показали результаты предыдущих работ, в этих условиях возможно формирование инверсной функции распределения электронов. Детальные исследования этого вопроса являются отдельной и достаточно сложной проблемой. Поскольку для этого требуется регистрировать функцию распределения электронов при низких значениях энергии, основную трудность представляют возникающие неизбежные искажения зондовых характеристик вблизи потенциала пространства за счет конечного сопротивления плазмы, а также за счет стока электронов на зонд.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Кудрявцев, А.С. Смирнов, Л.Д. Цендин, *Физика тлеющего разряда* (Лань, СПб., 2010).
- [2] Л.Д. Цендин, ЖТФ, **81** (11), 154 (2011). [L.D. Tsendin, Tech. Phys., **56** (11), 1693 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211110260].
- [3] Y. Wang, N. Chen, J. Yao, E. Bogdanov, A. Kudryavtsev, C. Yuan, Z. Zhou, Plasma Sci. Technol., **27** (5), 055401 (2025). DOI: 10.1088/2058-6272/adb895
- [4] Е.И. Прохорова, А.А. Кудрявцев, А.А. Платонов, А.Г. Слышов, Письма в ЖТФ, **50** (5), 15 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57178.19814 [E.I. Prokhorova, A.A. Kudryavtsev, A.A. Platonov, A.G. Slyshov, Tech. Phys. Lett., **50** (3), 13 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57178.19814].
- [5] Б.И. Москалев, *Разряд с полым катодом* (Энергия, М., 1969).
- [6] К.Н. Ульянов, В.В. Чулков, ЖТФ, **58** (2), 328 (1988).
- [7] В.И. Демидов, Н.Б. Колоколов, А.А. Кудрявцев, *Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы* (Энергоатомиздат, М., 1996).