

04

О кинетике электронов в прианодной области тлеющего разряда в скрещенных полях

© А.А. Платонов, А.Г. Слышов, С.Д. Вагнер

Карельский государственный педагогический университет, Петрозаводск
E-mail: platonov@kspu.karelia.ru

Поступило в Редакцию 24 июля 2006 г.

Исследована анодная область тлеющего разряда при наложении магнитного поля, скрещенного с электрическим полем у анода. Определены радиальные распределения потенциала и функции распределения электронов. Наложение магнитного поля меняет знак анодного падения и приводит к перестройке распределения потенциала и функции распределения электронов.

PACS: 52.80.Vp

Прианодная область остается одной из наименее изученных областей тлеющего разряда. Например, величина и даже знак анодного падения потенциала в отсутствие магнитного поля сложным образом зависят как от параметров самого разряда [1], так и от внешних факторов.

При малых токах профиль потенциала монотонен. При этом электронный ток на анод переносится в форме диффузионного тока медленных электронов. Это приводит к обеднению медленной части функции распределения электронов (ФРЭ), увеличивающемуся по мере приближения к аноду [2]. С ростом тока положительное анодное падение уменьшается и меняет знак. ФРЭ при этом максвеллизуется, так что возникает необходимость частично подавить электронный диффузионный ток на анод. ФРЭ разделяется на две группы — на медленную часть, соответствующую электронам, которые заперты в возникающей потенциальной яме и не участвуют в переносе электронного тока на анод, и быструю. Перенос электронного тока на анод происходит в форме диффузионного тока этих быстрых (незапертых) электронов. Таким образом, кинетика электронов играет важную, а может быть даже и определяющую роль в формировании прианодной области.

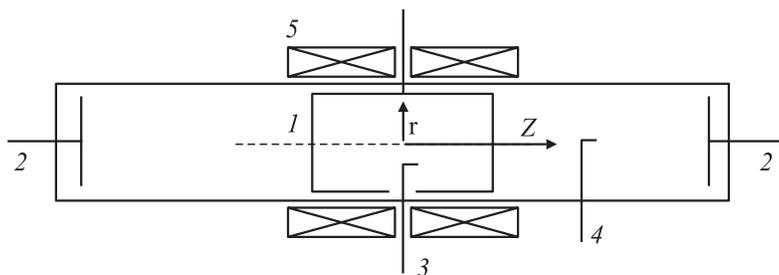


Рис. 1. Схема трубки (1 — цилиндрический анод, 2 — катоды, 3 — подвижный зонд, 4 — неподвижный зонд, 5 — катушки для создания магнитного поля). Расстояние между катодами 64 см, длина анода $L = 10$ см, диаметр трубки и анода $R_A = 7$ см.

Наложение магнитного поля делает ситуацию гораздо более сложной и разнообразной. Ясное понимание механизмов и факторов, ответственных за формирование прианодной области в этом случае, в настоящее время, по существу, отсутствует.

Представляется, что отсутствие измерений электронной функции распределения и анализа условий ее формирования явилось одной из главных причин неудовлетворительного состояния этой проблемы. Поэтому для продвижения в этой области необходимо комплексное экспериментальное исследование электрических и кинетических характеристик разряда на примере простейших его форм. Одной из таких форм разряда в магнитном поле является разряд цилиндрической геометрии в скрещенных полях.

При этом магнитное поле подавляет перенос электронов на анод, так что анодное падение потенциала становится положительным и растет с ростом магнитного поля [3].

Исследование электронной кинетики разряда в скрещенных полях было начато в [3–5]. В этих экспериментах, по существу, отсутствовал положительный столб и поэтому было затруднительно разделить влияние катода и анода на свойства разряда.

Поэтому в качестве объекта исследования была выбрана анодная область в тех условиях, когда катод находился достаточно далеко, так что прикатодная и прианодная области были пространственно разделены. С этой целью геометрия разряда имела вид, изображенный на рис. 1.

Использовалась цилиндрическая разрядная трубка, заполненная гелием, в центре которой находился анод в виде полого цилиндра. Анод размещался внутри катушек, с помощью которых создавалось аксиальное магнитное поле. Внутри анода находился подвижный цилиндрический зонд. В торцах трубки на значительном расстоянии от анода располагались два плоских катода.

Исследовалось поведение анодного падения потенциала и функции распределения электронов по энергиям вблизи анода.

ФРЭ измерялась по второй производной зондового тока методом модуляции. Потенциал плазмы относительно анода определялся по точке прохождения второй производной зондового тока через нуль. В тех случаях, когда не удавалось измерить вторую производную зондового тока, потенциал изолированного зонда относительно анода измерялся цифровым вольтметром с большим входным сопротивлением и смещался на потенциал изолированного зонда относительно плазмы. Измерения проводились при разрядных токах 25 и 50 мА, давлениях газа 0.5 и 1.0 Торг. В данном сообщении приводятся результаты измерений при давлении гелия 0.5 Торг и разрядном токе 50 мА.

На рис. 2, *a, b* представлены пространственные распределения вторых производных зондового тока по потенциалу зонда, полученные зондом 3 при различных радиусах. Следует отметить, что поскольку потенциал отсчитывался от анода, то по оси абсцисс на рис. 2, *a, b* отложена полная энергия электронов. Зависимости $\ln(i'')$ оказались близкими к линейным, что свидетельствует о том, что ФРЭ не сильно отличается от максвелловской. Это согласуется с тем фактом, что в условиях эксперимента частота межэлектронных столкновений оказывается порядка обратного времени их диффузионного ухода на анод. Формирование отрицательного анодного падения соответствует, по-видимому, тому случаю, когда диффузионный ток на анод больше полного, так что часть электронов заперта и не участвует в переносе тока.

Наложение магнитного поля сильно меняет характер ФРЭ и профиля потенциала (рис. 2, *c*). Без магнитного поля концентрация электронов спадает к аноду; при этом диффузионный поток электронов на анод одного порядка с полным электронным током. Наложение даже небольшого магнитного поля подавляло диффузионный перенос электронов на анод. При этом анодное падение становилось положительным и увеличивалось с ростом магнитного поля, достигая значений, близких

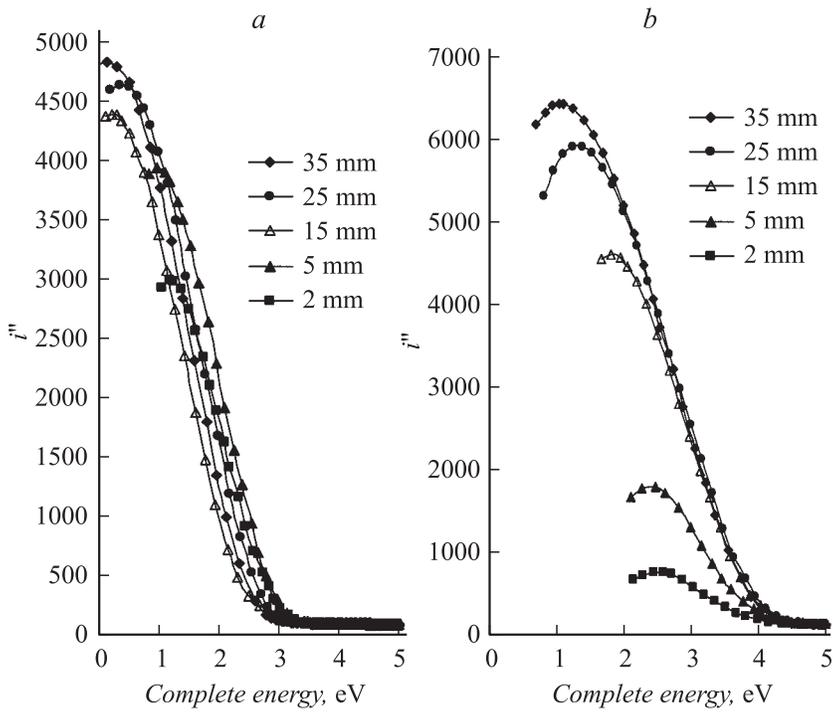


Рис. 2. Вторые производные зондового тока на различных расстояниях до анода (разрядный ток 50 мА, давление 0.5 Torr, без магнитного поля) (a). Вторые производные зондового тока на различных расстояниях до анода (разрядный ток 50 мА, давление 0.5 Torr, магнитное поле 5 мТ) (b). Радиальное распределение потенциала при различных магнитных полях (разрядный ток 50 мА, давление 0.5 Torr) (c).

к потенциалу ионизации гелия. Это согласуется с тем фактом, что ионный поток у анода, необходимый для формирования плазмы, в этом случае должен формироваться в прианодном слое. Тот факт, что положительное анодное падение порядка потенциала ионизации в отсутствие магнитного поля наблюдался в работе [1].

Для области, удовлетворяющей условию $Z \ll L$, $(R_A - r) \ll R_A$, диффузионный перенос одномерен и плотность потока электронов при

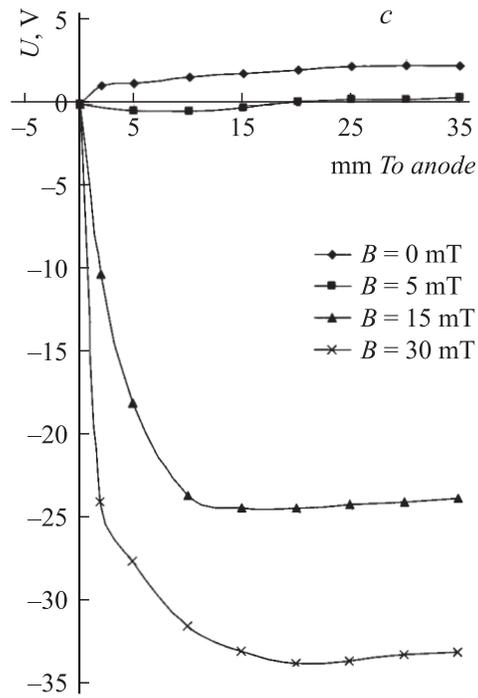


Рис. 2 (продолжение).

каждом значении полной энергии ε сохраняется. Поэтому кинетическое уравнение для электронов с энергией ε имеет вид [6]:

$$\frac{1}{vr} \frac{d}{dr} \frac{rv^3}{v(v)} \frac{1}{1 + \frac{\omega^2}{v^2}} \frac{df_0}{dr} = 0, \quad (1)$$

где $v(\varepsilon, r) = \sqrt{2(\varepsilon - e\varphi(r)/m)}$, φ — потенциал плазмы, v — электронная частота столкновений, ω — их циклотронная частота. Решение его, удовлетворяющее нулевому граничному условию, на аноде есть:

$$f_0(\varepsilon, r) = \Gamma(\varepsilon) \int_r^{R_A} \frac{v(\varepsilon, r')}{v^3 r'} \left(1 + \frac{\omega^2}{v^2} \right) dr'. \quad (2)$$

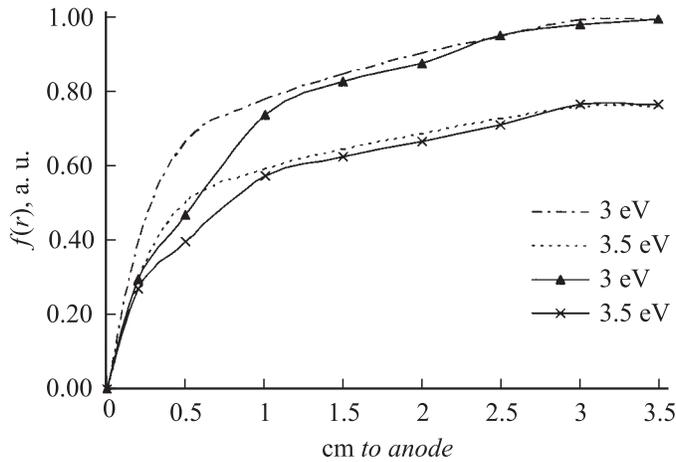


Рис. 3. Распределение ФРЭ по радиусу (пунктир — расчет по формуле (2), сплошные линии — результат эксперимента).

Значения изотропной части ФРЭ f_0 вычислены согласно (2) и сопоставлены с экспериментом на рис. 3. Сходные результаты получены и в других разрядных условиях.

Отметим, что влияние магнитного поля на ФРЭ и распределение потенциала в прианодной области происходит при очень небольших магнитных полях (5 мТ), которым соответствует значение отношения $\omega/v \sim 1$.

Заключение:

1. Выполнено комплексное исследование прианодной области разряда в скрещенных полях.
2. Обнаружено, что наложение магнитного поля меняет знак анодного падения и приводит к перестройке распределения потенциала и ФРЭ.
3. Перенос электронов вблизи середины анода является одномерным.

Авторы признательны Л.Д. Цендину за интерес к работе и полезное обсуждение.

Исследования, описанные в данной работе, выполнялись в рамках программ „Фундаментальные исследования и высшее образование“ и „Развитие научного потенциала высшей школы“, поддерживаемых Министерством образования и науки РФ и Американским фондом гражданских исследований и развития (CRDF).

Список литературы

- [1] Клярфильд Б.Н., Неретина Н.А. // ЖТФ. 1953. Т. XXVIII. В. 2. С. 296–315.
- [2] Голубовский Ю.Б., Цендин Л.Д., аль-Хават Ш.Х. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 7. С. 1285–1291.
- [3] Вагнер С.Д., Котельникова О.Ю., Пядин В.П. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 8. С. 24–28.
- [4] Платонов А.А., Слышов А.Г., Цендин Л.Д., Вагнер С.Д. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 22–26.
- [5] Passot E., Golubovskii Yu.B. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. P. 2655–2665.
- [6] Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О., Порохова М.А., Цендин Л.Д. Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. СПб.: Изд-во С.-Петербургского государственного университета, 2004.