

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

04

Журнал технической физики, т. 65, в. 11, 1995

© 1995 г.

ЭФФЕКТ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПОЛЯ
В ПЛАЗМЕ ПОЛОГО КАТОДА

Б.И.Москалев

Научно-производственное объединение "Исток",
141120, Фрязино, Московская область, Россия
(Поступило в Редакцию 17 ноября 1994 г.)

Современная физика газоразрядных процессов приходит к выводу, что наличие отрицательного градиента потенциала электрического поля между зонами отрицательного свечения и положительного столба в тлеющем разряде с плоским катодом надежно установлено [1,2]. В тлеющем разряде с полым катодом наличие такого поля является определяющим для возникновения парадоксального явления, впервые описанного в [3], — пространственного разделения считавшейся ранее однородной плазмы внутри полого катода на ряд обособленных плазменных зон. Сначала объяснение такому разделению плазмы внутри полости находили во влиянии на эмиссионные явления фотоэффекта [4]. Впервые на возможность большого влияния фотоэффекта на процессы внутри полого катода было обращено в [5]. Однако в [6] прямыми опытами было показано, что фотоэффект в тлеющем разряде играет незначительную роль в общей эмиссии с катода. В [7] экспериментально было продемонстрировано, что область, которая разделяет две плазмы, образующиеся внутри полости при достаточной длине полого катода, характеризуется наличием в ней отрицательного градиента потенциала. В [8] этому было дано теоретическое обоснование. Поскольку в обычном тлеющем разряде зона отрицательного поля отделяет отрицательное свечение от положительного столба [1,2], сопутствуя зоне фарадеева темного пространства, то и в случае плазмы внутри полого катода (даже при отсутствии в ней фарадеева темного пространства) эти плазмы были названы как отрицательное свечение и положительный столб [7].

Настоящая работа систематизирует результаты наблюдений о разделении плазмы внутри полого катода участками с отрицательным полем, проведенные автором на протяжении ряда лет, начиная с 1960 г.

Для наблюдений использовались полые катоды различных конфигураций и размеров, работающие в различного вида экспериментальных трубках, наполненных каким-нибудь газом или паром (He, Ne, Ar, Xe, H₂, Hg, Cs, воздух и др.). Особенностью конструкций экспериментальных трубок было то, что они позволяли иметь достаточно полное представление о пространственной конфигурации светящихся и темных зон в разрядной трубке, в том числе и внутри катодной полости, и сопоставлять эти данные с результатами зондовых измерений в различных точках газоразрядного промежутка. Разряд исследовался в широком диапазоне разрядных условий: от 10⁻⁵ до 20 мм рт. ст., от 30 В до 40 кВ и от сотен микроампер до сотен ампер. Разновидность разряда, характеризующаяся значениями тока и напряжения, лежащими в середине интервалов указанных выше величин (примерно 0.003–3 А, 100–1000 В), идентифицировалась нами как тлеющий разряд с полым катодом. Конкретные границы существования тлеющего разряда с полым катодом определялись его переходом при малых давлениях и токах в высоковольтный (электронно-лучевой) разряд с полым катодом, при больших давлениях (внутри полости) и токах — в дуговой разряд с полым катодом, при малых давлениях и больших токах — в “сверхплотный” разряд с полым катодом [9], при больших давлениях и малых токах — в обычный тлеющий разряд, в котором зоны отрицательного свечения, расположенные у различных участков катодной поверхности, не перекрываются.

Исследования показали, что во всем диапазоне существования тлеющего разряда с полым катодом возможны только три режима работы полого катода, схематически показанные на рисунке.

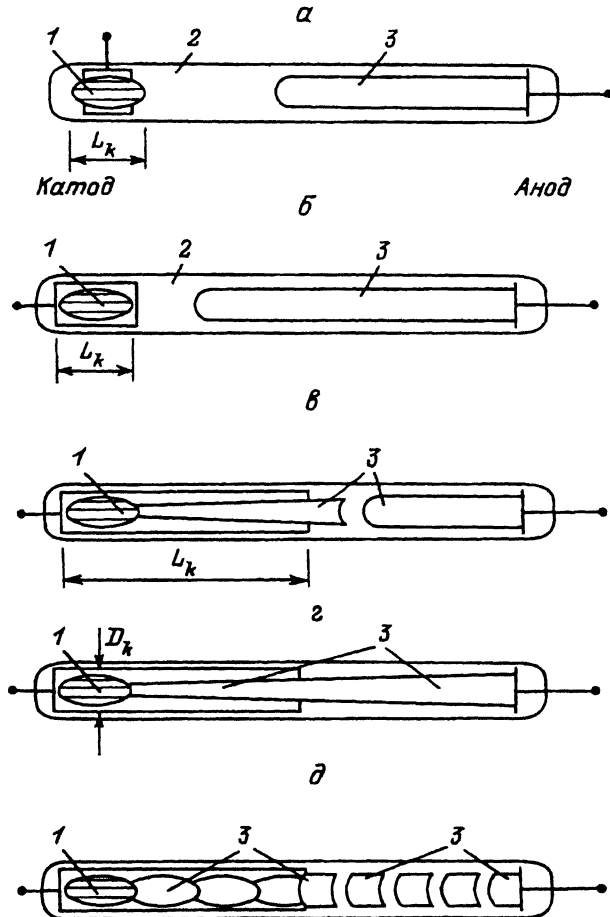
Режим I (см. рисунок, а) — в катодной полости помещается только часть отрицательного свечения; режим II (см. рисунок, б) — в катодной полости находится одно или несколько отрицательных свечений (на рисунке показан лишь первый случай, второй будет рассмотрен в другой публикации); режим III (см. рисунок, в–д) — в катодной полости находятся как отрицательное свечение, так и положительный столб.

Все публикации о структурных особенностях плазмы внутри катодной полости, которые могут показаться противоречивыми, непременно согласуются друг с другом, если учитываются характерные различия указанных трех возможных режимов тлеющего разряда с полым катодом.

В режиме I ($L_k \leq D_k$) можно добиться таких условий, когда основные параметры плазмы (температура электронов T_e , концентрация электронов N_e , потенциал пространства φ) практически неизменны по всей длине полости.

В режиме II ($L_k \cong 2-6D_k$) постоянство по длине катодной полости параметров плазмы невозможно. Наблюдается колоколообразное распределение концентрации электронов по оси полого катода и в области, ближайшей к аноду, участок с отрицательным градиентом потенциала.

Сложный характер приобретает структура плазменных образований внутри полости, когда внутрь нее проникает положительный столб (режим III). При обнаружении этого факта [3] одно время казалось [10], что можно осуществить режимы, в которых отрицательное свечение внутри полости исчезнет, будучи заменено внедрившимся в полость



Основные виды плазменных структур тлеющего разряда с полым катодом.
 а — режим I; б — режим II; в — режим III, вариант 1; г — режим III, вариант 2; д — режим III, вариант 3; 1 — отрицательное свечение, 2 — фарадеево темное пространство, 3 — положительный столб.

положительным столбом. К этому побуждали наблюдения над световыми явлениями внутри катодной полости, в которых регистрировалось отсутствие при некоторых условиях фарадеева темного пространства в разряде. Однако при дальнейших исследованиях, сопровождавшихся зондовыми измерениями, оказалось, что, несмотря на возникавшую вследствие отсутствия темного пространства большую трудность визуального различения границ отрицательного свечения и положительного столба внутри полого катода, эти зоны, разделяясь участком с отрицательным полем, сохраняют резкое различие между собой по внутренней структуре [7], что с несомненностью следовало из измерений пространственного изменения электрических локальных параметров (T_e , N_e , φ) внутри каждой зоны. Нам неизвестны условия, в которых отрицательное свечение внутри полого катода действительно бы отсутствовало, поэтому многообразие форм режима III (конкретно внутри круговой трубки) сводится к следующим трем вариантам.

Вариант 1. В глубине полого катода располагается отрицательное свечение, переходящее в направлении к аноду в сплошной положительный столб. Между положительным столбом внутри катодной полости и обычным положительным столбом (расположенным вне полости) наблюдается темное пространство (см. рисунок, е).

Вариант 2. Сплошной положительный столб, простирающийся от анода, непосредственно (не разрываясь темным пространством) внедряется в катодную полость, переходя далее в отрицательное свечение (см. рисунок, з).

Вариант 3. Положительный столб, соединяющий отрицательное свечение внутри полости с анодом, не сплошной, а слоистый как внутри полого катода, так и вне его, т.е. состоит из ряда неподвижных страт.

Специальное исследование [11] обнаружило, что в условиях режима III в варианте 2 бегущие страты, присутствуя в положительном столбе вне полости, тем не менее отсутствуют в положительном столбе, внедрившемся в катодную полость.

В заключение следует отметить, что проблема существования или отсутствия отрицательного электрического поля была актуальна только для катодных частей тлеющего разряда. Это обусловилось тем, что хотя работы Лэнгмюра и Мотт-Смис [12], посвященные разработке зондовой методике измерения N_e , T_e и φ в газоразрядной плазме, дали широкую возможность определения этих параметров в различных плазмах, однако некоторые типы плазм оказались весьма трудными для проведения в них зондовых измерений. Так, зона отрицательного свечения тлеющего разряда на протяжении более чем полувека поставляла противоречивые данные о своих параметрах по зондовым измерениям. О знаке электрического поля $E(\varphi_1 - \varphi_2)$ в этой области нельзя было судить достоверно. В монографии Ларроу [13], опубликованной в 30-х годах этого столетия, было сообщено, что поле в отрицательном свечении тлеющего разряда имеет обратный знак (т.е. задерживает электроны, движущиеся к аноду), но тут же в примечании сообщалось, что полученные перед самой публикацией монографии новые материалы ставят это утверждение под сомнение. Далее вплоть до 80-х годов существование отрицательного поля в катодных частях тлеющего разряда то утверждалось, то отвергалось. И только использование лазерной методики непосредственного измерения знака электрического поля в локальной области разряда [1] позволило в конце 80-х годов с несомненностью считать, что обратное поле в отрицательном свечении тлеющего разряда существует.

Наряду с вышеизложенным необходимо указать, что для многих других объектов изучения, как для низковольтной электрической дуги [14], анодных пятен [15], неподвижных страт [16], термоэмиссионных преобразователей энергии [17], наличие отрицательного электрического поля не вызывало сомнения, поскольку в этих случаях использовавшиеся методы измерений не так сильно искажали наблюдаемые явления и давали достоверные сведения.

Теория отрицательного свечения обычного тлеющего разряда, учитывающая наличие в нем отрицательного поля, к настоящему времени обсуждена достаточно подробно [18,19]. В то же время теория отрицательного свечения в разряде с полым катодом [8,20,21], имея дело с более сложным комплексом процессов, нуждается в ее дальнейшем развитии.

- [1] *Gettsho R.A., Mitchell A., Scheller G.R.* // Phys. Rev. A. 1989. Vol. 40. P. 6407.
- [2] *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н.* // ТВТ. 1991. Т. 29. № 6. С. 1041.
- [3] *Москалев Б.И.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1962. № 12. С. 65.
- [4] *Моченев С.Б.* // Радиофизика. 1964. Т. 7. № 5. С. 1005.
- [5] *Little P.F., von Engel A.* // Proc. Roy. Soc. 1954. Vol. A224. P. 209.
- [6] *Клярфельд Б.Н., Москалев Б.И.* // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 6. С. 1066.
- [7] *Moskalev B.I.* // Proc. 9-th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Bucharest. 1969. P. 166.
- [8] *Москалев Б.И.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 10. С. 2056.
- [9] *Абрамович Л.Ю., Клярфельд Б.Н., Настич Ю.Н.* // ЖТФ. 1966. Т. 36. С. 714.
- [10] *Moskalev B.I.* // 7th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Beograd, 1965. P. 38.
- [11] *Москалев Б.И.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1969. № 9. С. 92.
- [12] *Langmuir I., Mott-Smith H.M.* // The collected Works of Irving Langmuir. Vol. 4. P. 99 (Phys. Rev. Vol. 28. N 4. 1926).
- [13] *Дарроу К.К.* // Электрические явления в газах. Харьков; Киев, ОНТИ, 1937. С. 87.
- [14] *Клярфельд Б.Н., Соболев В.Д.* // ЖТФ. 1947. Т. 17. Вып. 3. С. 319.
- [15] *Клярфельд Б.Н., Неретина Н.А.* // ЖТФ. 1958. Т. 28. С. 296.
- [16] *Клярфельд Б.Н.* // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 66.
- [17] Термомиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б.Я.Мойжеса, Г.Е.Пикуса. М.: Наука, 1973. 301 с.
- [18] *Райзер Ю.П.* // Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [19] *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 3. С. 362.
- [20] *Москалев Б.И.* Разряд с полым катодом. М.: Энергия. 1969. 184 с.
- [21] *Москалев Б.И.* Канд. дис. М., 1968. 127 с.

01;04;10
© 1995 г.

Журнал технической физики, т. 65, в. 11, 1995

СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ

С.Ю.Удовиченко

Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,
189631, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 24 октября 1994 г.
В окончательной редакции 8 декабря 1994 г.)

Введение

Квазистационарные сильноточные электронные пучки находят все большее применение в плазменной СВЧ электронике, плазмохимии, газовых лазерах с электронной накачкой. Перспективно использование мощных электронных пучков и для передачи энергии на большие расстояния. В связи с этим возникает необходимость изучения равновесия электронно-пучковой плазмы, созданной при ионизации газа быстрыми электронами.