

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В ПЛАЗМЕ ВОЛЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Р.Р. Арсланбеков, А.А. Кудрявцев, А.П. Мельников, И.А. Мовчан

В настоящее время большой интерес представляют также способы создания газоразрядной плазмы, когда подводимая энергия наиболее эффективно передается в возбуждение, ионизацию и диссоциацию частиц среды. С этой точки зрения важным объектом исследования является плазма отрицательного свечения (ОС), которое создается за счет релаксации быстрых электронов, эмитируемых катодом и набравших энергию $\epsilon = 10^2 - 10^3$ эВ при прохождении ими узкого слоя катодного падения.

Наиболее известными и распространенными устройствами создания протяженной плазмы ОС являются разнообразные полые катоды (ПК), широко используемые в различных приложениях [1]. Менее изучены аналоги, конструктивно отличающиеся от ПК, например системы спиральных или кольцевых электродов [2] или стержневых электродов, расположенных по окружности вдоль внутренней поверхности цилиндрической трубки (вольерный разряд) [3]. Для понимания особенностей формирования и свойств плазмы, образующейся в подобных конструкциях, важное значение имеет знание вида функции распределения электронов по энергиям (ФРЭ). Выполненные в [3] зондовые измерения в ОС вольерного разряда в неоне зарегистрировали максвелловскую ФРЭ вплоть до энергий $\epsilon \leq 7$ эВ, в то время как измерения в ОС цилиндрического ПК [4] указывают на значительное ($10^{-1} \text{г} - 10^{-3} \text{г}$) число быстрых электронов, образующих характерную «ступеньку» на ФРЭ в упругой области $\epsilon \leq \epsilon_1$ (ϵ_1 — порог неупругих процессов). Целью данной работы являлось измерение ФРЭ в вольерном разряде в широком диапазоне энергий и выявление ее характерных особенностей.

Разрядное устройство представляло собой стеклянный цилиндр радиуса $R = 2.0$ см, вдоль внутренней поверхности которого располагалось 16 чередующихся стержневых катодов и анодов радиуса $\rho = 0.2$ см (рис. 1). Для заданного давления газа p и расстояния $l = 6$ мм между соседним катодом и анодом выполнялись условия затрудненного разряда $p < p_{0l}$ — соответствующая величина, необходимая для существования нормального короткого тлеющего разряда [3]. В подобных условиях разряд формируется вдоль оси трубки в виде цилиндрического светящегося столба ОС, в силу симметрии заполняющего весь объем, за исключением узких темных зон вблизи электродов.

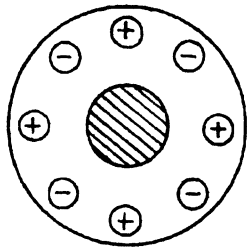


Рис. 1. Поперечное сечение разрядной трубки.

Рабочим газом служил гелий при давлениях $p = 0.5 - 4$ Тор. В трубке зажигался разряд постоянного тока $I = 20 - 50$ мА при напряжении на электродах $U = 200 - 600$ В. ФРЭ измерялась методом модуляции зондового тока подвижным цилиндрическим зондом радиуса 0.08 мм и длиной 6 мм. Типичные результаты измерений ФРЭ на оси разряда при давлении $p = 23.2$ и 0.8 Тор и токе $I = 30$ мА представлены на рис. 2. Видно, что ФРЭ состоит из двух составляющих $f = f_m + f_f$. В области $0 - 3$ эВ сосредоточена основная группа электронов с $n_e = 3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-3}$ при $p = 2.2$ Тор и $n_e = 5.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при $p = 0.8$ Тор. Распределение этих тепловых электронов f_m близко к максвелловскому из-за сильного межэлектронного взаимодействия при сравнительно низкой электронной

температуре T_e . Величина $T_e = 0.2$ эВ при $p = 2.2$ Тор и увеличивается с уменьшением давления до $T_e = 0.6$ эВ при $p = 0.8$ Тор. В области энергий $\varepsilon = 3-20$ эВ ФРЭ сильно обогащена электронами по сравнению с максвелловской при той же T_e . Их распределение f_1 близко к «ступеньке», которая формируется источником рождения быстрых электронов, поступающих в область $\varepsilon < \varepsilon_1$ за счет потерь энергии на ионизацию и возбуждение электронами с $\varepsilon > \varepsilon_1$. Другим источником образования быстрых электронов может служить пеннинговская ионизация при парных столкновениях двух метастабильных атомов. В области энергии появления этих электронов при $p = 2.2$ Тор виден небольшой излом на ФРЭ. Возникающие быстрые электроны в зависимости от условий релаксируют по энергиям на упругих электрон-атомных столкновениях или диффундируют на аноды. При $\varepsilon > \varepsilon_1 = 19$ эВ резкий спад ФРЭ связан с включением неупругих процессов возбуждения и ионизации. Сравнение с результатами измерений ФРЭ в ПК [4], где также зарегистрировано обогащение энергетического распределения по сравнению с максвелловскими, указывает на их определенное качественное сходство.

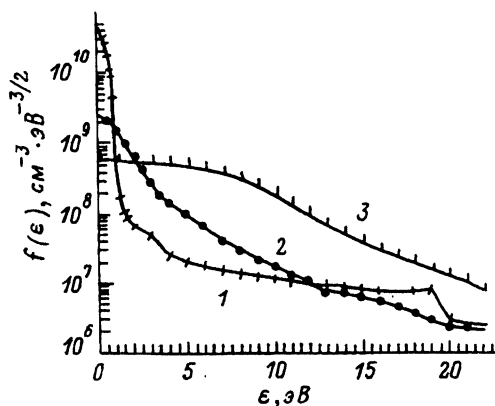


Рис. 2. Функция распределения электронов по энергиям на оси вольерного разряда при токе $I = 30$ мА и различном давлении гелия. 1 - 2.2, 2 - 0.8, 3 - 0.5 Тор.

На рис. 2 представлены также результаты измерений при давлении $p = 0.5$ Тор, которые качественно отличаются от рассмотренных выше. В этом режиме ФРЭ нельзя разделить на две составляющие, что может быть связано с переходом разряда в другую фазу. Визуально при изменении давления от 0.8 до 0.5 Тор свечение разряда сосредоточивается в осевой части разрядной трубки при соответствующем увеличении темных приэлектродных зон.

Необходимо также отметить, что измерения показывают слабое изменение быстрой части ФРЭ по радиусу в пределах области свечения.

Таким образом, в работе выполнены измерения ФРЭ в вольерном разряде при различных условиях и установлены ее характерные особенности.

Список литературы

- [1] Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969.
- [2] Rosza K. // Magyar fiz. folyoirat. 1986. N 1. P. 1-56.
- [3] Васильева Н.В., Волков Н.В., Новгородов М.З., Соболев Н.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. С. 619-624.
- [4] Каган Ю.М., Лягущенко Р.И., Хворостовский С.И. и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 2. С. 1839-1846.

С.-Петербургский университет

Поступило в Редакцию

17 июля 1991 г.