

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДОВ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В ПИЭЛ стационарная плазма чаще всего создается с помощью газовых разрядов. Свойства разряда влияют на все параметры ПИЭЛ, рассмотренные в гл. 1. Разряд, применяемый для получения эмиттирующей плазмы (см. рис. 1, а – в), должен удовлетворять нередко противоречивым требованиям, выполнение которых вызывает значительные трудности. Поэтому в каждом конкретном случае для разработки и применения ПИЭЛ требуется рациональный выбор его типа и вида разряда.

Преимущества ПИЭЛ перед электронными пушками с термокатодом в полной мере проявляются лишь при использовании разрядов с холодным катодом. Условия для зажигания таких разрядов при низких давлениях и высокую степень ионизации газа можно обеспечить с помощью электродов нужной конфигурации, а также рациональным сочетанием электрического и магнитного полей. Из газоразрядных систем с холодным катодом в разборных установках часто применяют устройства на основе разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях (пеннинговского, магнетронного, типа гомополяр). Особенно широко применяется отражательный или пеннинговский разряд, который зажигается при низких давлениях вплоть до высокого вакуума и устойчиво горит в широком диапазоне изменения тока и давления. Ниже описываются свойства отражательного разряда, существенные для его использования в ПИЭЛ, и электронные источники с таким разрядом.

6. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА РАЗРЯДА В ПЕННИНГОВСКОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Отражательный разряд реализуется в пеннинговской электродной системе, которая обычно образуется двумя плоскими катодами и расположенным между ними анодом в виде кольца, полого цилиндра, прямоугольной рамки и т. д. При этом система находится в аксиально-симметричном магнитном поле.

В зависимости от совокупности параметров, главную роль среди которых играют давление газа и напряженность магнитного поля, различают несколько типов отражательного разряда.

Высоковольтный разряд низкого давления существует при $p \leq 10^{-4}$ мм рт. ст., когда средняя длина свободного пробега электронов много больше размеров электродной системы. Напряжение горения разряда при этом обычно составляет $U_p > 10^3$ В, а плотность катодного тока $j \leq 5 \cdot 10^{-3}$ А/см².

Магнитное поле не позволяет электронам в пеннинговской системе сразу попасть на анод, и они совершают продольные колебания между катодами, одновременно участвуя в циклотронном вращении и азимутальном дрейфе в скрещенных полях. Радиальное положение центра циклотронной орбиты электронов изменяется лишь в результате их столкновений с атомами.

Различают два основных режима разряда низкого давления, один из которых существует при слабых магнитных полях, а другой – при сильных. В первом режиме зависимость разрядного тока от магнитного поля линейна, в разряде отсутствуют ВЧ-колебания, распределение отрицательного пространственного разряда в анодном цилиндре близко к равномерному. Во втором режиме ток относительно слабо зависит от магнитного поля. В разряде наблюдаются интенсивные ВЧ-колебания, вблизи анода образуется слой отрицательного пространственного заряда.

Переходная форма разряда. С увеличением давления газа при некоторых условиях возникает переходная от высоковольтного режима низкого давления к низковольтному

режиму высокого давления форма разряда. В этой форме разряда еще сохраняется прианодная электронная оболочка с неравномерным азимутальным распределением заряда, но уже существует характерный для тлеющего разряда прикатодный ионный слой. Приложенное напряжение делится между этими двумя областями, разделенными плазмой. Напряжение горения разряда остается высоким, а ток достигает нескольких десятков миллиампер.

Тлеющий отражательный разряд. Повышение давления газа в разряде приводит обычно при $p > 10^{-3}$ мм рт. ст. к переходу в низковольтную форму. При токах $I_p < 1$ А и отсутствии катодных пятен разряд во многом подобен аномальному тлеющему разряду с положительным столбом в магнитном поле. Основная часть напряжения сосредоточена в катодном падении потенциала. Ионный ток на катоде составляет 50–80%. При токах в несколько сот миллиампер и более напряжение горения разряда достигает 10^3 В, что ограничивает применение такого разряда в ПИЭЛ из-за низкой энергетической эффективности, жестких требований к системе охлаждения разрядной камеры и интенсивной эрозии катодов за счет бомбардировки их высокоэнергетичными ионами. Ниже данные приведены для отражательного разряда при $U_p < 700$ В в магнитном поле с $B < 10^{-1}$ Тл.

Зависимости параметров отражательного разряда от давления водорода при постоянном разрядном токе i от разрядного тока при постоянном давлении приведены на рис. 5. С ростом тока и повышением давления происходит понижение электронной температуры плазмы вблизи центра анода. В обоих случаях доля анодной мощности P_a стремится к постоянному значению, которое хорошо согласуется со значением, полученным для больших разрядных токов в аргоне при относительно высоких напряжениях.

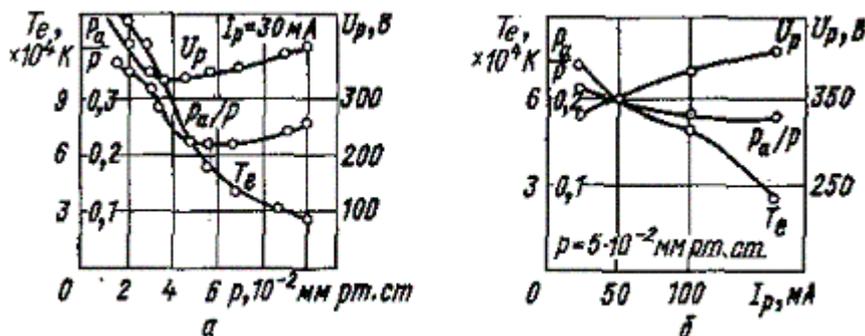
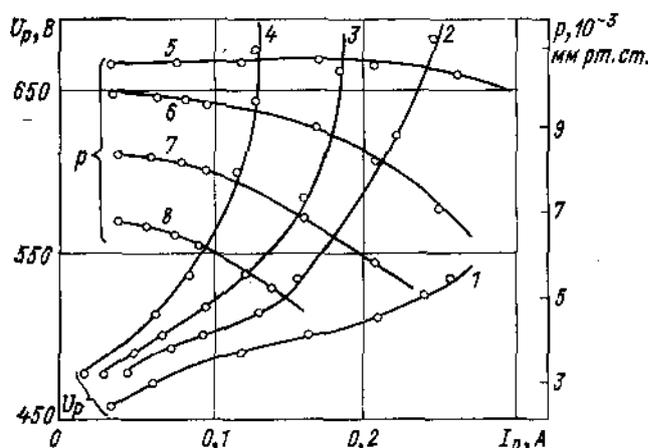


Рис. 5. Зависимость параметров разряда от давления (а) и разрядного тока (б) Fe – H₂, B = 6,8 · 10⁻² Тл

При работе ПИЭЛ обычно поддерживается постоянным поступление газа в разрядную камеру, а не давление. Вольт-амперные характеристики отражательного разряда, полученные при постоянном расходе газа в непрерывном режиме, а также зависимости давления в разрядной камере от тока даны на рис. 6. В качестве материала катода используется алюминий; рабочим газом служит воздух. Разрядная камера откачивается через отверстие диаметром 1,5 мм. Установлено, что снижение давления в камере, приводящее к резкому увеличению напряжения, вызывается в основном откачивающим действием разряда. Откачка газа происходит главным образом за счет адсорбции нейтралей распыленным материалом катодов, поскольку аналогичное падение давления наблюдалось и при разряде в химически инертных аргоне и гелии. При использовании катодов из



материалов «низковольтной» группы, таких, как Al, Mg, Be, имеющих на поверхности окисную пленку, напряжение горения может быть увеличено также распылением этой пленки.

Рис. 6. Вольт-амперные характерис-

тики отражательного разряда для Fe – воздух, $B = 4,5 \cdot 10^{-2}$ Тл:

1, 5 – $Q = 72$ см³/ч; 2, 6 – $Q = 42$ см³/ч; 3, 7 – $Q = 30$ см³/ч; 4, 8 – $Q = 19$ см³/ч

Дуговой отражательный разряд. С ростом тока тлеющий отражательный разряд может переходить в дугу с катодным пятном. Использовать плазму такого разряда для получения электронных пучков невозможно из-за нестабильности локальных параметров плазмы, которая образуется при перемещении катодных пятен, возникающих попеременно на обоих катодах. Однако, как будет показано в гл. 4, этот разряд применяется для инициирования других разрядов в ПИЭЛ.

Среди различных металлов (Fe, Mg, Al, Sn, Cu) наименьший ток перехода из отражательного тлеющего разряда в дугу ($I_p \leq 1$ А) при работе на аргоне и воздухе обеспечивают магниевые катоды. В тех случаях, когда поверхность катода покрыта диэлектрической пленкой, при переходе тлеющего разряда в дугу с катодным пятном возникают когерентные колебания потенциала на катодах. Колебания вызываются импульсным поступлением электронов в разрядный промежуток при пробое диэлектрического катодного покрытия.

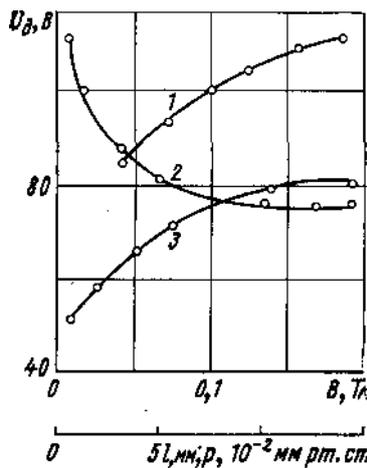


Рис. 7. Характеристики дугового отражательного разряда: 1 – $U_d = f(B)$, $p = 2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. $l = 10$ мм; 2 – $U_d = f(p)$: $B = 0,1$ Тл, $l = 10$ мм; 3 – $U_d = f(C)$: $B = 0,1$ Тл, $p = 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Зависимости напряжения горения импульсной отражательной дуги от магнитного поля, давления воздуха и расстояния между катодами приведены на рис. 7. Уменьшение отношения l/R от 1 до 0,3 (R – радиус катода, l – расстояние между катодами) приводит к росту требуемой напряженности магнитного поля. Увеличение B до 10^{-1} Тл вызывает некоторое уменьшение времени запаздывания разряда, которое остается неизменным ($\sim 10^{-6}$ с) при дальнейшем усилении поля. Подсоединение одного из катодов к аноду требует для зажигания разряда более высокого давления $pS^*8 - 10^{-2}$ мм рт. ст. и увеличивает время запаздывания разряда.