

1.14. ДУГОВОЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ

Цель лекции: изучение дугового разряда в вакууме, его назначения, параметров и способов возбуждения.

1.14.1. ПЕРЕХОД ИЗ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ДУГОВОЙ

Дуговой разряд является одним из основных типов газового разряда в вакууме. Вольт-амперные характеристики дугового разряда в вакууме приведены на рис. 1.45. Дуговой разряд возникает тогда, когда между двумя электродами возрастает ток и происходит падение напряжения.

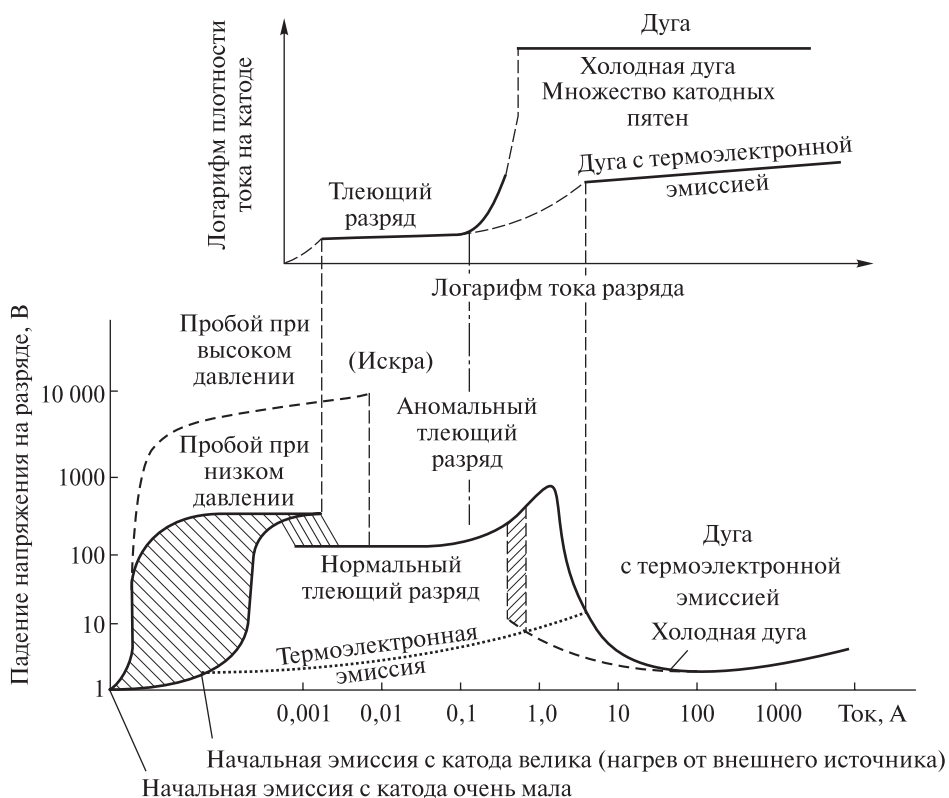


Рис. 1.45. Вольт-амперные характеристики дугового разряда в вакууме

Переход от тлеющего разряда к дуговому может быть постепенным (см. рис. 1.45, гладкая кривая) в случае накаливаемого катода с термоэлектронной эмиссией или в случае очень тугоплавкого материала, нагревающегося до высокой температуры за счет тока аномального тлеющего разряда. Такой переход в общем случае происходит резко (штриховая кривая и заштрихованная область) для большинства материалов, являющихся холодными катодами, таких как медь или железо. На подобных материалах ток создается многочисленными «катодными пятнами», а не однородной термоэлектронной эмиссией. Напряжение горения короткой дуги лежит обычно в диапазоне 10...50 В. Эта разность потенциалов состоит из анодного и катодного падения (обычно порядка 10 В; анодное падение часто значительно выше катодного) и падения напряжения на столбе дуги, зависящего от его длины. Значения тока дуги обычно составляют от одного до многих тысяч ампер.

Следует отметить, что самое лучшее определение дуги принадлежит Комптому: дуга — это разряд в газе или паре с падением напряжения в катодной области порядка минимального потенциала ионизации того газа или пара, в котором этот разряд происходит.

1.14.2. ПАРАМЕТРЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Все дуги можно разделить на два довольно общих типа, отличающихся в основном атмосферой, в которой они горят. Это дуги высокого давления, горящие в газе или паре с плотностями, которые соответствуют давлениям выше нескольких десятков мм рт. ст. (например, обычная электрическая дуга при атмосферном давлении), и дуги низкого давления, горящие в газе или паре с давлением ниже 10 мм рт. ст., т. е. в условиях, когда средняя длина свободного пробега весьма велика.

В большинстве случаев возникновение вакуумной дуги происходит так, как это идеализированно показано на рис. 1.46. Пар, необходимый для горения дуги, поставляется множеством очень подвижных катодных пятен (КП), которые хаотически перемещаются по отрицательному электроду. Плотность тока в каждом из этих небольших пятен чрезвычайно высока и часто достигает значений 10^6 А/см² и более. Причем то, что визуально воспринимается как одно пятно, оказывается совокупностью большого числа небольших активных участков, весь комплекс которых можно заставить быстро двигаться под действием поперечного магнитного поля. В КП возникают струи металлического пара, скорости которых достигают 1000 м/с. В этих струях, являющихся основным источником пара в вакуумной дуге, один удаленный атом металла может приходиться примерно на каждые десять эмитированных электронов.

Основная особенность дугового разряда — его внутренняя нестабильность. Как отмечалось выше, разряд горит в отдельных КП, которые, в свою очередь, состоят из элементарных ячеек. Каждая ячейка имеет свое время жизни. Поэтому при неизменном токе на катоде осуществляется непрерывный процесс самопроизвольной гибели старых и образования новых ячеек.

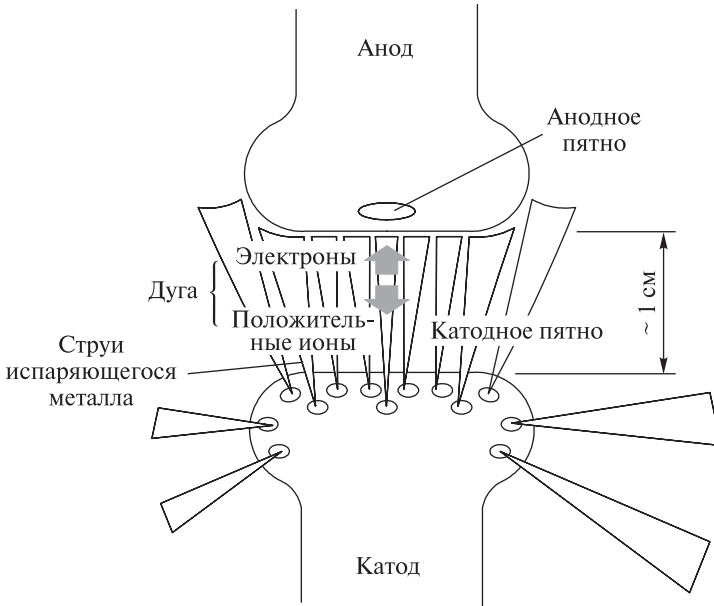


Рис. 1.46. Принципиальная схема вакуумной дуги

Их распад и образование происходят с частотой $10^5 I \text{ с}^{-1}$, где I — разрядный ток, А. Таким образом, дуговой разряд устойчив, пока поддерживается динамическое равновесие между процессами распада и возникновения элементарных ячеек.

Поскольку время жизни отдельной ячейки — случайная величина, продолжительность горения дуги в целом также оказывается случайно величиной, и определяется соотношением

$$N_t = N^{-t/\theta}, \quad (1.40)$$

где N_t — число дуг с временем горения, большим t ; N — полное число возникших дуг; θ — среднее время существования дуги, которое экспоненциально растет с увеличением тока и зависит также от теплофизических характеристик материала катода и параметров внешней электрической цепи.

Когда ток и общее число элементарных ячеек достаточно велики, горение разряда дуги становится стационарным. Разряд статистически устойчив при наличии на рабочей поверхности не менее двух КП. Минимальный ток при котором еще возможно стационарное существование дуги (критический ток), зависит от материала катода, расстояния между электродами и параметров внешней электрической цепи. Если рабочий ток разряда превышает критический, то при уходе одного из КП из рабочей области и его гибели оставшееся пятно спонтанно делится на два, обеспечивая стационарное существование разряда. При прочих равных условиях I_{\min} тем меньше, чем ниже температура кипения материала катода. Наложение магнитного поля резко уменьшает I_{\min} .

Разряд горит при напряжении, несколько превышающем (иногда в 2–3 раза) потенциал ионизации материала катода. Основную часть этого напряжения составляет катодное падение потенциала. Наименьшее значение катодного падения соответствует материалам с более низким значением параметра $T_{\text{кип}} k^{0,5}$, где $T_{\text{кип}}$ — температура кипения материала катода, К; k — теплопроводность материала катода, Вт/(м·К). Исключение составляют только алюминий и никель.

Току дуги свойственны колебания с частотой $10^5 \dots 10^7$ Гц, параметры которых зависят в основном от теплофизических свойств материала катода.

Физические процессы в вакуумных дугах определяются поведением КП. По своей природе их можно разделить на электровзрывные и тепловые. Электровзрывные КП развиваются как результат циклического возбуждения взрывной электронной эмиссии. Они оставляют на поверхности характерные микрократеры и предшествуют тепловым. Последние формируются в тех же областях катода при его нагреве до критической температуры, соответствующей переходу от взрывного эмиссионного механизма к термоавтоэлектронному. Время жизни тепловых пятен примерно пропорционально квадрату их размера. В зависимости от условий возникновения, продолжительности существования и подвижности различают КП трех типов.

Пятна первого типа (КП-I) появляются в начальный период разряда и затем расходятся, занимая все большую площадь. Они наиболее подвижны; скорость их движения в зависимости от материала катода составляет 10...100 м/с. Длительность фазы разряда, в течение которой существуют только КП-I, зависит от теплофизических характеристик катода; она лежит в пределах 0,1...0,5 мс и уменьшается с ростом тока.

В следующий период на участках наиболее частого пребывания КП-I возникает КП второго типа (КП-II). Вначале пятна обоих типов сосуществуют, а затем могут существовать и независимо. Время жизни КП-II слабо зависит от материала катода и колеблется в пределах 0,5...1,5 мс; их скорость — 0,1...10 м/с. Длительность фазы горения с КП второго типа определяется током разряда; она может быть и неограниченной.

Пятна третьего типа (КП-III) возникают лишь при токах, больших I_{min} , и представляют собой групповые образования из нескольких КП-II, расположенных на расстояниях, сравнимых с их размерами. Время жизни таких пятен достигает нескольких миллисекунд; они малоподвижны.

Динамика развития КП сильно зависит от концентрации остаточных газов. В форвакууме возможно одновременное существование КП всех типов или их парных комбинаций. Средний ток, приходящийся на одно КП для данного материала, почти не связан с параметрами разряда, поэтому при увеличении тока общее число КП возрастает. При сохранении стабильности из разрядной плазмы могут экстрагироваться ионные токи до 7–10 % полного разрядного тока. Линии электрического поля в зоне КП направлены по нормали к поверхности катода.

Плазма дугового разряда обладает специфическими характеристиками. Вблизи поверхности катода энергия электронов близка к 1 эВ. С удалением

от поверхности энергия электронов возрастает вследствие развития ионно-звуковой турбулентности и на расстоянии от КП более 10 мм достигает примерно 10 эВ. Средняя концентрация электронов обратно пропорциональна квадрату расстояния от КП. Вблизи КП на расстоянии 15 мкм она близка к 10^{19} см⁻³. В противоположность этому концентрация нейтральных атомов катодного вещества увеличивается к периферии разряда, а средняя скорость ионов ограничена инфразвуковой скоростью (0,5...1,0 км/с).

Разряд сопровождается образованием быстрых паровых струй материала катода со скоростями до 10 км/с. В струях присутствуют ионы с энергией до 300 эВ. Средняя энергия ионов также намного превышает ту, которую мог бы приобрести однозарядный ион под действием статической разности потенциалов на разрядном промежутке. Аномально высокие энергии ионов связаны с неустойчивостями, развивающимися в плазме. Не исключена возможность газодинамического ускорения частиц в прикатодной зоне, где существуют области с паровой фазой очень высокого давления. Степень ионизации струй для различных металлов достигает 25–100 %, возрастая для более тяжелых элементов; для них же характерна и более высокая энергия ионов.

Тесты к лекции 14

1. Дуговой разряд характеризуется:

- а) относительно низким напряжением и высоким током;
- б) относительно высоким напряжением и низким током;
- в) наличием процесса распыления катода.

2. Катодные пятна являются источником:

- а) быстрых паровых струй материала катода;
- б) распыления материала катода;
- в) слабого рентгеновского излучения.

3. К дуговому разряду относится процесс:

- а) дуговой сварки;
- б) катодного распыления;
- в) термического испарения.