

Лекция 6.

Общая тема: ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТЕРМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

Термически неравновесная низкотемпературная плазма, генерируемая в электроразрядных плазмотронах, широко используется в различных отраслях науки, техники и производства. Обычно, в условиях функционирования реальных плазмотронов следует говорить о той или иной степени удовлетворения параметров плазмы условиям термического равновесия. Например, параметры плазмы генерируемых ЭДП при атмосферном давлении и выше в большей степени удовлетворяют условиям термического равновесия, а при пониженных давлениях об этом не скажешь. В слабоионизованной плазме, генерируемой плазмотронами других типов, отклонения от равновесия более значительны, т.е. плазма практически неравновесная. Таким образом, в каждом конкретном случае вопрос о существовании термического равновесия в плазме электроразрядного плазмотрона заданного типа требует довольно тщательного обоснования и часто остается дискуссионным.

В данном разделе рассмотрим основные физические процессы, протекающие в плазмотронах, генерирующих в большей степени термически неравновесную плазму, а также их конструктивные особенности и свойства.

1. Плазмотроны тлеющего разряда

С первых исследований электрических явлений в газах в XIX в. было положено начало изучению свойств тлеющего разряда, как одной из форм газовых разрядов. Однако только после 1964 г. начались активные разработки плазмотронов тлеющего разряда, а также интенсивные исследования свойств и характеристик ТР в каналах с потоками газа. Связано это, преимущественно, с созданием первых конструкций газовых лазеров непрерывного действия с излучением в инфракрасном диапазоне длин волн, пригодных для резки и сварки металлов, а также обработки различных материалов. Отличительной особенностью электроразрядных

газовых лазеров является накачка лазерно активной газовой среды в области положительного столба тлеющего разряда [76]. В настоящее время созданы различные конструкции плазмотронов ТР, составляющих основу конструкций электроразрядных газовых лазеров непрерывного действия повышенной мощности, используемых для резки, сварки и сверления металлов и других материалов. Различными фирмами в США, ФРГ, Японии, Великобритании и других развитых стран созданы промышленные электроразрядные газовые лазеры для нужд машиностроения и металлообработки. Например, фирма "AVCO" (США) разработала металлорежущий станок, использующий CO_2 лазер с мощностью излучения 15 кВт. Известной фирмой "Панасоник" разработано семейство электроразрядных лазеров с мощностью излучения от 300 Вт до 5 кВт, предназначенных для обработки различных материалов [77].

Несмотря на многообразие типов и конструкций плазмотронов ТР, в основе их функционирования лежат общие физические закономерности, связанные с особенностями ТР и течения потоков слабоионизованной неравновесной плазмы в каналах с электрическим током.

2. Структура и особенности тлеющего разряда постоянного тока

В данном разделе приведем описание свойств и особенностей классического ТР постоянного тока в цилиндрическом канале, которые отражены во многих фундаментальных учебниках по физике плазмы и газовым разрядам [6, 10, 78,79 и др.].

На рис. 7.1 изображены типичная структура тлеющего разряда в трубке, характерные распределения интенсивности излучения и потенциала электрического поля вдоль оси канала

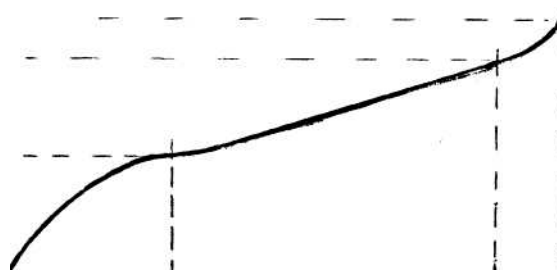
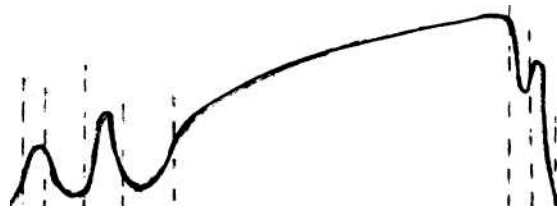
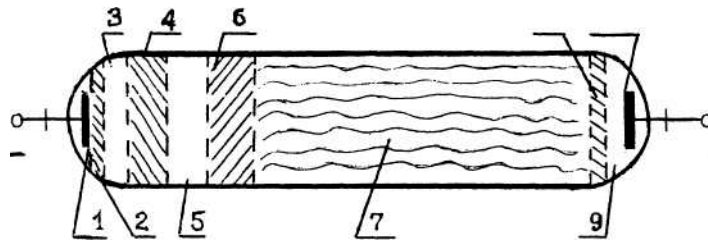


Рис. 7.1. Структура нормального тлеющего разряда (а), характерные распределения интенсивности излучения (в) и потенциала электрического поля (с) вдоль оси канала: 1 — катод; 2 — темное астаново пространство; 3 — катодный светящийся слой; 4 — катодное темное пространство; 5 — область отрицательного свечения; 6 — фардеево темное пространство; 7 — положительный столб; 8 — анодное темное пространство; 9 — область анодного свечения; 10 — анод; $\Delta\varphi_k$ и $\Delta\varphi_a$ — области катодного и анодного падения потенциала

Плазмообразующий газ в трубке находится при пониженных давлениях $P = 0,1—0,5$ кПа, к электродам приложено постоянное высокое напряжение ~ 2 кВ или более, ток разряда составляет несколько миллиампер. В указанных условиях разряд горит в диффузионном режиме, что подтверждается характерным свечением газа, которое охватывает почти весь объем трубки.

Тлеющие разряды относятся к разрядам с холодным катодом, т.е. процессы термоэлектронной эмиссии с катода здесь не играют значительной роли. Как известно, существуют нормальный и аномальный режимы горения ТР. В нормальном режиме ТР, при малой величине силы тока, только часть поверхности катода охвачена "размытым" катодным пятном. По мере увеличения силы тока площадь, охваченная катодным пятном, увеличивается таким образом, чтобы плотность тока на катоде $j = I/S$ оставалась постоянной. Причина такого поведения катода пока остается невыясненной. Аналогичная картина наблюдается и в анодном пятне на поверхности анода. После заполнения всей поверхности катода разрядной зоной дальнейшее увеличение тока ведет к переходу в аномальный режим горения. В аномальном режиме горения ТР с ростом силы тока его плотность на катоде растет до определенного предела. Увеличение силы тока больше критического значения приводит к развитию различных видов неустойчивостей ТР. Анодное пятно скачком стягивается в яркую точку, напряжение между электродами резко падает, разряд контрагирует и переходит в дуговой режим горения. Из изложенного видно, как велика роль приэлектродных процессов в вопросах устойчивости ТР.

Рассмотрим структуру нормального ТР в установившемся режиме (рис. 7.1). В разрядной трубке с далеко расположенными электродами в ТР выделяются области с различной интенсивностью излучения вдоль оси канала. Как видно из рис. 7.1, эти области располагаются в соответствии с

характерным распределением потенциала. С учетом малой степени ионизации плазмы ТР и квантового характера излучения и поглощения энергии проведем анализ причин, обуславливающих наблюдаемую слоистость разряда в объеме разрядной трубки.

В области катодного падения потенциала выделяется несколько характерных слоев. Непосредственно к катоду примыкает тонкий слой темного астанова пространства. Причиной отсутствия здесь излучения является то, что электроны, эмитирующие с катода, имеют малые скорости и не в состоянии возбудить нейтральные частицы при столкновениях. Энергию, достаточную для возбуждения нейтральных частиц при столкновениях, электроны приобретают ближе к внешней границе астанова пространства.

Катодный светящийся слой, излучение которого имеет линейчатый спектр, имеет несколько большую протяженность. Здесь электроны теряют часть энергии на возбуждение тяжелых компонентов плазмы. В то же время, ускоряясь в сильном электрическом поле в пределах светящегося слоя, электроны приобретают такие значения энергии, которые превышают пороговые значения энергии возбуждения тяжелых частиц. Далее наблюдается опять темный слой, называемый *катодным темным пространством*.

Катодное темное пространство отличается высокими значениями напряженности поля и интенсивными процессами ионизации газа. Первичные и образовавшиеся вторичные свободные электроны, ускоренные полем, устремляются к аноду. Однако тяжелые положительно заряженные ионы получают в поле меньшее ускорение по направлению к катоду, поэтому быстрое убегание электронов к аноду ведет к появлению в области катодного темного пространства избыточного объемного заряда, образованного положительно заряженными ионами. Этот положительный объемный заряд сильно искажает электрическое поле вблизи катода и

влияет на эмиссию электронов. Следует отметить, что в условиях ТР определенную роль играют процессы автоэлектронной эмиссии за счет поля объемного заряда. Но основным механизмом эмиссии электронов с катода является бомбардировка поверхности катода положительно заряженными ионами, этот процесс называется *ион-электронной эмиссией*.

Следующая светящаяся область называется *областью отрицательного свечения* и характеризуется меньшими значениями напряженности поля. Излучение здесь вызвано за счет энергии относительно медленных вторичных электронов, которые еще не успели ускориться, а также первичных электронов, потерявших скорость в процессах ионизации в области катодного темного пространства.

Между слоем отрицательного свечения и ПС разряда существует промежуточная область, которая называется *фарадеевым темным пространством*. В ней свободные электроны, потерявшие часть энергии в светящейся области, продолжают ускоряться при относительно низких напряженностях электрического поля. Существенное отличие катодного и фарадеевого темных пространств заключается в том, что в первой области кинетическая энергия электронов слишком велика, а во второй — слишком мала для квантового возбуждения электрически нейтральных частиц при неупругих соударениях.

Наиболее протяженной областью длинных разрядов является ПС. Эта область разряда существует независимо от при электродных частей. В области ПС имеют место практически все механизмы рождения и гибели зарядов, которые в установившемся режиме горения разряда сбалансированы. Концентрация электронов в ПС определяется равновесием процессов объемной ионизации, объемной рекомбинации и амбиполярной диффузии к стенкам разрядной камеры.

За ПС разряда располагается область анодного падения потенциала. В этой области выделяются два участка: узкое темное пространство и участок анодного свечения. Причина такого разделения объясняется тем, что положительно заряженные ионы ПС тормозят убегающие к аноду электроны. В результате, вблизи анода образуется слой отрицательного объемного заряда, который, в свою очередь, также тормозит вновь набегающие электроны. Описанный механизм подтверждается отсутствием свечения в этой области. Электроны, сумевшие преодолеть потенциальный барьер отрицательного объемного заряда, вновь ускоряются в анодном поле и, испытывая неупругие столкновения с тяжелыми компонентами плазмы, вызывают анодное свечение [6].

Как видно, рассмотренные участки ТР характеризуются различными энергетическими состояниями свободных электронов и положительно заряженных ионов. Размеры структурных слоев ТР зависят от давления, свойств газа, расстояния между электродами и других факторов. Например, если уменьшать межэлектродное расстояние, приближая электроды друг к другу, то постепенно исчезают область анодного падения потенциала и затем область ПС, а фардеево темное пространство может достигать поверхности катода. С повышением давления газа увеличивается плотность тока. Это происходит за счет роста концентрации электронов. Увеличение концентрации электронов сопровождается расширением спектра возможных значений их кинетических энергий. При этом возрастают вероятности самых различных актов столкновений электронов с другими частицами, активизируются процессы термического разогрева плазмы, что в итоге может привести к исчезновению катодного темного пространства.