

Лекция 7.

1.Высокочастотные емкостные плазмотроны

В настоящее время имеются различные конструкции ВЧЕ плазмотронов. Мы рассмотрим особенности их функционирования на основе схемы плазмотрона, приведенного на рис. 7.10. Цилиндрическая разрядная камера ВЧЕ плазмотрона изготавливается из кварцевой трубы, стекла пирекс или другого диэлектрика. На трубу устанавливаются два кольцевых электрода, узлы подачи плазмообразующего газа и охлаждающей воды, а также система поджига разряда (рис. 7.10). На электроды подается высоковольтное напряжение от внешнего ВЧ генератора. В плазмотронах промышленного типа мощностью от 1 до 100 кВт на электроды подается напряжение в диапазоне от 5 до 20 кВ. В зависимости от мощности плазмотрона и давления газа ток ВЧЕ разряда может меняться от десятка тА, при пониженных, и до 50 А при атмосферных и выше давлениях. Диапазон частот ВЧ электромагнитного поля ограничен областью разрешенных для ВЧ установок частот, как и в ВЧИ плазмотронах. Конструктивно разрядная камера плазмотрона может быть изготовлена по-разному. Обычно кольцевые электроды бывают изолированы от плазмы диэлектрической стенкой РК, но могут быть и оголенными, и непосредственно соприкасаться с плазмой.

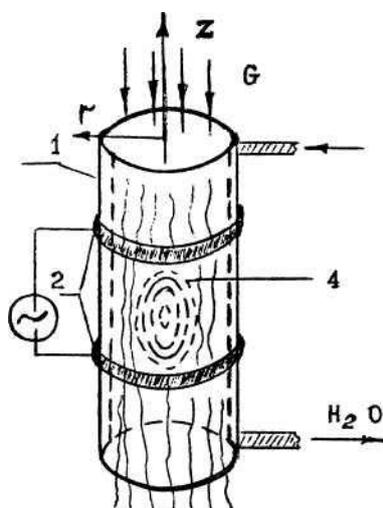


Рис. 7.10. Схема ВЧЕ плазмотрона с изолированными электродами: 1 — кварцевая камера; 2 — электроды; 3 — ВЧ генератор; 4 — плазменный сгусток; G — поток газа

Возможен и промежуточный вариант, когда один из электродов изолирован, а другой контактирует с плазмой. На практике используют вихревой и аксиальный способы подачи плазмообразующего газа. Очевидно, что физические процессы, протекающие в РК, характеристики ВЧЕ разряда и генерируемой плазмы сильно зависят от особенностей расположения электродов и способа подачи газа.

Физические основы функционирования ВЧЕ плазмотрона рассмотрим на основе плазмотрона с изолированными от плазмы электродами и вихревой подачей газа. Как видно из рис. 7.10, электроды в данной схеме РК можно рассматривать как обкладки конденсатора, подключенного последовательно в цепь с переменной ЭДС. Если электропроводности в объеме РК нет, то механизм прохождения тока в электрической цепи такой же, как и в обычном колебательном R, L, C контуре.

После поджига разряда в объеме РК образуется плазменный сгусток, стабилизированный близи оси канала. Плазменная струя формируется из потока газа, разогретого в области плазменного сгустка. В отличие от ВЧИ разряда плазма ВЧЕ разряда обладает осевой симметрией. На оси РК, при $r = 0$, наблюдаются максимальные значения величин n_e , T_e , j и др. По мере удаления от оси значения указанных величин уменьшаются.

Некоторые особенности электропроводности ВЧЕ плазмы в установившемся режиме можно проанализировать на основе уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (7.6)$$

Подставляя формулу (3.2) $\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{E} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$ получим выражение

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial\vec{P}}{\partial t} \quad (7.7)$$

В нашей схеме плазмотрона линии тока проводимости разомкнутые, так как они обрываются на стенках РК. Как видно из формулы (7.7), плотность полного тока в плазме, связанного с направленным перемещением зарядов, складывается из тока проводимости j и тока поляризации $\partial P / dt$. Величина $\epsilon_0 \partial E / dt$ представляет собой ток "смещения", не связанный с перемещением зарядов, и является просто одной из причин создания вихрей магнитного поля — $rotH$ в объеме РК.

Воспользуемся известными формулами $j = \sigma E$, $P = \epsilon_0(s-1)E$ и $div(rotH) = 0$. Тогда из (7.7) получим

$$div \left[\sigma \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon_0(\epsilon - 1) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] = 0 \quad (7.8)$$

Из векторного анализа известно, что если дивергенция векторной величины равна нулю, то силовые линии такой величины замкнутые и не имеют источников и стоков. Таким образом, формула (7.8) показывает замкнутость силовых линий напряженности электрического поля и вектора $\partial \vec{E} / dt$. Причем вектор $\partial \vec{E} / dt$ физически отвечает за перемещение электронов от одного электрода к другому во внешней цепи, не содержащей плазму. Из сказанного следует, что на энергию свободных электронов и процессы разогрева плазмы токи "смещения" не влияют. Особенности физических процессов разогрева плазмы в ВЧ электромагнитном поле и особую роль в этом столкновений типа (e/a) мы рассмотрели в предыдущем разделе.

В установившемся состоянии ВЧЕ разряда процессы ионизации в объеме РК должны полностью компенсироваться процессами рекомбинации зарядов. При пониженных давлениях газа заряды рекомбинируют, преимущественно, на стенках в результате процессов амбиполярной диффузии. Основными

механизмами теплопереноса являются теплопроводность и излучение. С повышением давления возрастает роль процессов рекомбинации зарядов в объеме плазмы, а в процессах теплообмена возрастает роль конвективного теплопереноса.

Напряженности электрического поля в ВЧЕ разрядах с потоком газа обычно лежат в пределах от 100 до 400 В/см в зависимости от режима работы плазмотрона, а ток разряда невелик. В этих условиях слабоионизованная плазма ВЧЕ разряда является термически неравновесной.

Как видно, рассмотренные специфические свойства низкотемпературной плазмы, генерируемые ВЧ плазмотронами, связаны с особенностями движения свободных заряженных частиц, в основном электронов, а также энергообмена между электронами и другими компонентами плазмы при наличии ВЧ электромагнитного поля.