

Под газовым разрядом понимают все процессы прохождения электрического тока через газ. В значительной степени интерес к изучению разрядов обусловлен созданием в них ионизованного газа или так называемой плазмы.

В настоящее время плазменные технологии активно развиваются. Плазма применяется во многих областях жизни и науки, например, для создания газовых лазеров, источников света, плазменных ускорителей, сварочных аппаратов, при производстве микросхем и особых покрытий. Также плазменные технологии находят применение и в области экологии.

Плазма состоит из заряженных и нейтральных частиц. Положительно заряженными частицами являются положительные ионы, а отрицательно заряженными – электроны и отрицательные ионы. Состав нейтрального компонента плазмы может быть довольно сложным: в плазме могут присутствовать атомы и молекулы, находящиеся в возбужденных состояниях.

Важным параметром плазмы, характеризующим ее состав, является степень ионизация - отношение числа ионизованных атомов к их полному числу. По степени ионизации плазму обычно делят на слабоионизованную (10^{-3}) и полностью ионизованную, т. е. плазму, состоящую только из заряженных частиц.

Частицы, входящие в состав плазмы, находятся в состоянии постоянного хаотического теплового движения. Для характеристики этого движения вводят понятие температуры плазмы в целом T и отдельных ее компонентов T_α . Чаще в плазме наблюдается лишь частичное термодинамическое равновесие, когда отдельные ее компоненты находятся в состоянии термодинамического равновесия с различными температурами T_α . Такая плазма называется неизотермической. Так, например, в плазме газового разряда функция распределения электронов по скоростям является максвелловской с температурой порядка десятков тысяч К. Атомы же подчиняются распределению Больцмана с температурой порядка сотен К.

Двигаясь хаотически в каждом соударении электроны теряют в среднем очень малую часть своей энергии, из-за разницы масс электронов и ионов. В этом и кроется причина того, что температура электронов, которые фактически только и получают энергию от поля, сильно превышают температуру газа.

Чтобы назвать ионизированный газ плазмой нужно также, чтобы он обладал так называемым свойством *квазинейтральности*, т. е. в среднем за достаточно большие промежутки времени и на достаточно больших расстояниях был в целом нейтрален.

Оценим временной масштаб разделения зарядов. Пусть какой-либо электрон плазмы отклонился от своего первоначального равновесного положения. Возникает возвращающая сила по порядку величины равная средней силе взаимодействия частиц. В результате электрон начнет колебаться около равновесного положения с частотой:

$$\omega_{Le} \approx \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{3m}}$$

называется электронной ленгмюровской плазменной частотой и является важной характеристикой плазмы. За временной масштаб разделения зарядов принимают время обратное частоте

Рассмотрим теперь пространственный масштаб разделения зарядов. Он определяется длиной, на которую может сместиться возмущение плотности заряженных частиц вследствие их теплового движения за время, равное периоду плазменных колебаний.

Тогда пространственный масштаб разделения зарядов равен $r_{De} = \sqrt{\frac{\chi T_e}{4\pi e^2 n_e}}$ носит название электронного дебаевского радиуса.

Итак, плазма - это квазинейтральный ионизированный газ, характерные размеры объема которого много больше дебаевского радиуса этого газа.

В общем смысле электрическим пробоем называется процесс превращения непроводящего вещества в проводник в результате приложения к нему достаточно сильного поля.

Главным элементом процесса пробоя является электронная лавина, которая развивается в газе под действием поля. Явление ионизации имеет ярко выраженный пороговый характер, что связано с резкой зависимостью скорости ионизации атомов от энергии электронов, которая определяется электрическим полем и частотой столкновений.

Порог пробоя определяется соотношением между скоростями рождения и гибели электронов. Судьба лавины очень чувствительна к значению поля. Даже если поле чуть ниже порогового, скорость ионизации заметно меньше скорости гибели и размножения не происходит. Если же поле больше порогового, процесс ионизации катастрофически разгоняется. Решающим фактором для возникновения плазмы в разряде является преодоление значения напряженности поля над пороговым значением, характерным для данных условий.

Стационарное состояние проводимости в разрядном промежутке (стационарный разряд) поддерживается, если каждый вышедший из катода электрон, двигаясь к аноду, производит столько актов ионизации и возбуждения атомов, что под действием образованных им ионов и фотонов из катода выходит один электрон. Условие стационарности, которое носит название критерий Таунсенда, имеет вид:

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1$$

Падающий участок вольт-амперной характеристики (участок 2) в интервале токов ($10^{-5} \div 10^{-4}$ А) соответствует переходу от темного таунсендовского разряда к тлеющему. При больших токах реализуется тлеющий разряд в нормальном режиме (участок 3), вольт-амперная характеристика которого почти параллельна оси абсцисс. Участок 4 и участки 5,6 принадлежат соответственно аномальному тлеющему и дуговому разрядам.

Тлеющему разряду присущи отличительные особенности: характерное пространственное распределение интенсивности светящихся и темных областей, потенциала вдоль разрядной трубки и прочих характеристик разряда. Условие стационарности тлеющего разряда также можно описать указанным на слайде

соотношением, где в качестве d надо брать длину d_k катодной области, заканчивающейся в начале области отрицательного свечения.

В качественном отношении *высокочастотным* следует называть разряд при таких минимальных частотах ω_n , когда пространственный объемный заряд в разрядном промежутке не успевает перестраиваться в течение одного периода ВЧ поля. Еще одним, количественным условием является требование, чтобы амплитуда колебаний электронов A в ВЧ поле в газоразрядной плазме не превышала половины расстояния d между электродами $\frac{d}{2}$.

Амплитуды скорости и смещения электрона соответственно равны значениям, изображенным на слайде, получены интегрированием уравнения движения усредненное по большому количеству столкновений электрона с атомами

Выделим важное свойство газового разряда ВЧ диапазона. Для частоты 13.56 МГц и напряженности электрического поля $5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$, амплитуда колебаний электронов (при отсутствии столкновений) составляет величину порядка 1 см, амплитуда колебаний ионов $\sim 10^{-5}$ см. Это означает, что в ВЧ диапазоне электроны следуют за изменением ВЧ поля, а ионы «чувствуют» лишь усредненные по времени поля.

Все виды ВЧ разрядов можно разбить на две большие группы, различающиеся способами возбуждения ВЧ поля в разрядном объеме: индукционные и емкостные. Индукционные методы основаны на использовании явления электромагнитной индукции, в результате чего линии электрического поля оказываются замкнутыми, а само поле – вихревым. При емкостном способе ВЧ напряжение от генератора подается на электроды, линии электрического поля начинаются и заканчиваются на них, а поле является с большой степенью точности потенциальным.

Простейшая и наиболее распространенная схема индукционного разряда показана на рис. 5а. Через катушку-соленоид пропускают вырабатываемый ВЧ генератором ток. Под действием переменного магнитного поля внутри индуцируется кольцевое электрическое. Это электрическое поле может возбуждать и поддерживать разряд в газе. Как правило, для этого внутрь соленоида помещают диэлектрическую трубку или сосуд с исследуемым газом. Индукционный разряд является в принципе безэлектродным.

Схемы емкостного разряда показаны на рисунке б, в, г(безэлектродный), д(одноэлектродный).

Основной особенностью емкостного разряда является образование, так называемых приэлектродных слоев.

Рассмотрим качественную картину эволюции плотности зарядов, поля и потенциала. В однородной плазме, очевидно, однородно и электрическое поле. Следовательно, электронный газ повсюду колеблется с одинаковой амплитудой A около среднего положения. Те электроны, которые в момент прохождения средней точки, отстояли от электродов на расстоянии, меньших амплитуды A , в результате первых же качаний либо уходят в металл, либо прилипают к диэлектрику. При последующих качаниях электроны лишь на мгновение касаются твердых поверхностей. Таким образом, в момент прохождения электронным газом положения равновесия по обе стороны от плазмы остаются слои некомпенсированного положительного заряда толщиной A . При этом газ в целом оказывается заряженным положительно.

Существует два режима горения индуктивного разряда, а именно режимов с низкой и высокой плотностью плазмы, называемых соответственно Е- и Н-разрядами.

Существование любого разряда возможно только тогда, когда достигается баланс частиц и мощности, вкладываемой и затрачиваемой в разряде. Отсюда можно получить выражение для значения минимального тока I_{min} текущего через антенну, при котором возможно существование Н-моды. Переход из Е- в Н-моду происходит при достижении током, текущим через антенну, величины I_{min} .

В любом индуктивном ВЧ разряде, даже горящем в Н-моды, неизбежно формируется емкостной канал вводы ВЧ мощности, связанный с наличием паразитных емкостей между антенной и плазмой.

В работе исследованы основные понятия и закономерности физики газового разряда. Рассмотрены различные способы возбуждения емкостных и индукционных разрядов. Изучено поведение электронов в высокочастотных разрядах. Собрана экспериментальная установка, с помощью которой произведено визуальное наблюдение особенностей емкостного разряда.