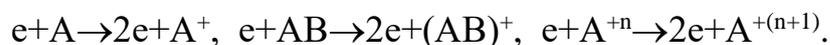


Лекция 8. Методы получения плазмы

При изучении принципов работы различных ФУ представляют интерес следующие классы столкновений:

1.Ионизация атома или молекулы электронным ударом:



2.Ионизация с участием возбужденного атома:



3.Фотоионизация: $A+h\nu \rightarrow A^++e.$

4.Возбуждение атомных и молекулярных уровней электронным ударом:



5.Захват электрона атомом или молекулой:

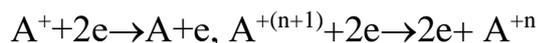


6.Перезарядка: $A+B^+ \rightarrow A^++B.$

7.Резонансная перезарядка: $A+A^+ \rightarrow A^++A.$

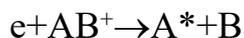
Для этого класса столкновений характерны большие сечения и он имеет важное значение для объяснения ряда процессов в плазменных ФУ.

8.Тройная электрон-ионная рекомбинация:



- процессы обратные ионизации электронным ударом.

9.Диссоциативная рекомбинация:



- процесс обратный ионизации с участием возбужденного атома и образованием молекулярного иона

10.Фоторекомбинация: $A^++e \rightarrow A+h\nu$

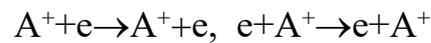
- процесс обратный фотоионизации.

11. Рекомбинация на стенках рабочего объема оказывает влияние на процессы в рабочем объеме ФУ при низких давлениях (<10Па). Ее скорость определяется формулой:

$$v_{pc} = rJ_i S,$$

где S - площадь поверхности, на которой происходит рекомбинация, r - коэффициент поверхностной рекомбинации, представляющий собой долю прорекомбинировавших ионов из их числа, падающих на стенку. Этот коэффициент определяется материалом стенки и ее температурой и для материалов, используемых в плазменных ФУ, может меняться в пределах (10^{-3} - $2.5 \cdot 10^{-1}$).

12. Кулоновские электрон- ионные столкновения представляют собой упругие процессы вида:



Рассмотрим известные методы получения плазмы. К ним относятся.

1. Термическое воздействие на газ посредством протекания химической реакции с большим выделением тепла или обмен энергией со смежной средой. В этом случае число носителей заряда в плазме будет расти с увеличением температуры. На основании принципа детального равновесия была получена следующая формула (М.Саха, 1920г.):

$$\frac{n_i n_e}{n_a} = K(\theta) = A \theta^{3/2} \exp\left(-\frac{U_i}{\theta}\right),$$

где $n_{i,e,a}$ соответственно концентрации ионов, электронов и нейтральных атомов в плазме, U_i - потенциал ионизации атома, A - константа определяемая типом атома. **Формула Саха** определяет степень ионизации плазмы в зависимости от ее температуры.

При достижении определенного значения температуры, зависящего от концентрации частиц, типа ионизируемого вещества и геометрии рабочего объема, начинают выполняться плазменные критерии.

2. Поверхностная ионизация осуществляется на поверхности сильно разогретого тугоплавкого металла, работа выхода, которого существенно превосходит работу выхода ионизируемого газа. В некоторых устройствах этот эффект используется для получения плазмы. В частности плазмотроны с

поверхностной ионизацией ионов применяют в МГД генераторах. В таком плазмотроне в качестве рабочего газа используются пары Cs. Ионизация осуществляется на поверхности разогретого тугоплавкого металла (W, Ta, Mo) с работой выхода существенно превышающей потенциал ионизации паров Cs. При падении на поверхность металла атом Cs сорбируется поверхностью металла. При этом электроны внешней оболочки Cs могут захватываться в металле. Высокая температура металла обеспечивает достаточно большую вероятность последующей десорбции Cs, но уже в виде иона.

3. Ионизация под действием внешней радиации, которая может представлять собой потоки заряженных частиц или фотонов от внешних источников с энергиями достаточными для ионизации атомов вещества.

4. Ионизация и образование плазмы при прохождении электронов под действием высокого напряжения приложенного между двумя электродами. Ускоряясь в электрическом поле, электрон приобретает энергию достаточную для совершения акта ионизации электронным ударом. На пути движения электрона будут образовываться новые электроны и ионы в результате ионизации электронным ударом, часть из которых может прорекомбинировать (в том числе и первоначальный электрон). Вновь образовавшиеся электроны также начинают ускоряться электрическим полем и могут вызывать новые акты ионизации. Пусть электрическое поле направлено вдоль оси x . Если на участке длиной dx поток электронов N при определенном напряжении в среднем увеличивается на величину

$$dN = \alpha N dx, \quad (5.1)$$

то говорят о создании условий возникновения электронной лавины.

Коэффициент пропорциональности α называется **коэффициентом ионизации** или **1-м коэффициентом Таунсенда**. Он определяется давлением и напряженностью электрического поля в рассматриваемом газовом промежутке. Если электрическое поле неоднородно, то этот

коэффициент зависит от x . После интегрирования в (5.1) имеем для потока электронов на аноде следующее выражение:

$$N_A = N_K \exp\left[\int_0^d dx \alpha(x)\right], \quad (5.2)$$

где d - расстояние между катодом и анодом. Такой нарастающий поток электронов называют **электронной лавиной**. Экспоненциальный множитель в (5.2) иногда называют **коэффициентом газового усиления** электронного тока. При этом поток ионов на катод будет определяться числом ионов, образованных при ионизации электронным ударом и дошедших до катода. Что составляет величину

$$N_i = N_A - N_K.$$

Ион, попадающий на катод, обладает определенной энергией, которая может передаваться электронам, связанным на катоде. В результате возникает эффект ионно-электронной эмиссии, при котором на каждый падающий ион катод в среднем испускает γ электронов. Таким образом, в рассматриваемом случае катод должен испускать в единицу времени

$$\gamma(N_A - N_K)$$

электронов. Параметр γ называют **коэффициентом ионно-электронной эмиссии** или **2-м коэффициентом Таунсенда**. Значение общего потока электронов с катода будет определяться выражением:

$$N_K = N_0 + \gamma(N_A - N_K). \quad (5.3)$$

где N_0 - собственный поток электронов с катода, испускаемых за счет активных средств (термоэмиссия, фотоэмиссия и т.д.) в отсутствие ионной бомбардировки, обеспечивающий первичную ионизацию газа. Помимо катодных электронов факторами первичной ионизации могут являться ионизирующие излучения различного вида, а так же высокая температура газа (см. формулу Саха).

Совместное решение уравнений (5.2) и (5.3) приводит к следующей формуле для потока электронов на анод:

$$N_A = \frac{N_0}{1 - \gamma \left\{ \exp \left[\int_0^d dx \alpha(x) \right] - 1 \right\}} \exp \left[\int_0^d dx \alpha(x) \right]. \quad (5.4)$$

Когда знаменатель в этом выражении составляет конечную положительную величину, рассмотренный процесс ионизации в газовом промежутке (**газовый разряд**) носит принудительный **несамостоятельный** характер, зависящий от фактора, определяющего первичную ионизацию или эмиссию электронов с катода, характеризуемую параметром N_0 . В случае, когда выполняется условие:

$$\int_0^d dx \alpha(x) = \ln \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} \right), \quad (5.5)$$

знаменатель в (5.4) обращается в ноль, в газовом промежутке ток перестает зависеть от N_0 и газовый разряд становится **самостоятельным**. Переход от несамостоятельного разряда к самостоятельному можно определить как **наступление пробоя** газового промежутка.

Коэффициенты α и γ , в общем случае, являются функциями напряжения на электродах, расстояния между электродами и давления в газе. Поэтому формула (3.4) задает в неявном виде функцию $\frac{U}{d} = f(pd)$, где U - напряжение зажигания самостоятельного разряда, p - давление газа. Характерный вид этой функции (**кривая Пашена**) представлен на рис. 3.1.

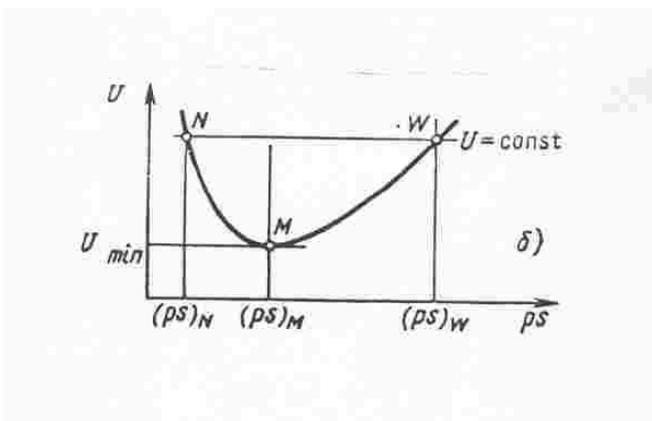


Рис. 5.1. Кривая Пашена

5. **Тлеющий разряд**- это разновидность самоподдерживающегося разряда с катодом, испускающим электроны только под действием

бомбардировки ионами из плазмы и рекомбинационных фотонов (**холодный катод**). Его отличительным признаком является существование вблизи катода слоя со значительным падением потенциала ($>100\text{В}$). Оно называется **катодным падением**. При этом вблизи анода существует достаточно протяженная плазменная область (**положительный столб**), отделенная от анода (анодный слой). Разряд зажигается при малых давлениях газа ($10\text{-}10^3$) Па. Тлеющий разряд находит большое количество применений. К ним можно отнести газоразрядные осветительные приборы, газовые лазеры, тиратроны, плазменные дисплеи, источники ультрафиолетового излучения и т.д.

5. Разряд Пеннинга- это тлеющий разряд в продольном магнитном поле. Параметры электродной и магнитной систем подбираются таким образом, чтобы в разрядной камере максимально удлинялись электронные траектории. Это в свою очередь приводит к увеличению эффективности ионизации разрядной среды. Электродная система может состоять из катода, антикатода и анода. За счет этого обеспечивается осцилляция замагниченных электронов в пространстве между катодами и дрейф электронов в скрещенных электромагнитных полях.

6. Разряд Кауфмана со скрещенными электромагнитными полями реализуется в системах близких по конструктивному устройству к системе Пеннинга, но горит в режиме несамостоятельного разряда с термокатодом.

7. Разряд с полым катодом является разновидностью тлеющего разряда. Эффект полого катода состоит в более эффективной ионизации газа в катодной полости электронами ионно-электронной и фото эмиссии. Такие электроны, попадая в катодную полость теряют энергию при столкновениях и уже не могут оседать на противоположенной стороне катодной поверхности, а отражаясь от нее, продолжают ионизировать газ. При этом в полости катода происходит эффективное образование плазмы. Одной из разновидностей разряда с полым катодом является орбитронный разряд, возникающий в системе с нитевидным анодом, охватываемым цилиндрическим катодом. В результате такой конфигурации электроны

совершают множественные осцилляции, не попадая на анод, за счет чего значительно удлиняются электронные траектории и увеличивается эффективность ионизации разрядной среды.

8. ВЧ-разряд (разряд под действием высокочастотного электромагнитного поля) осуществляется при воздействии на газовый объем переменного электромагнитного поля с частотой составляющей десятки МГц. В этом поле электроны набирают энергию, совершая вынужденные колебания и ионизируют газ. Энергия, теряемая при столкновениях, компенсируется, за счет энергии электромагнитного поля. Различают плазменные ВЧ-источники с разрядами типа Е и типа Н. Возможные схемы их возбуждения показаны на рис.5.2.

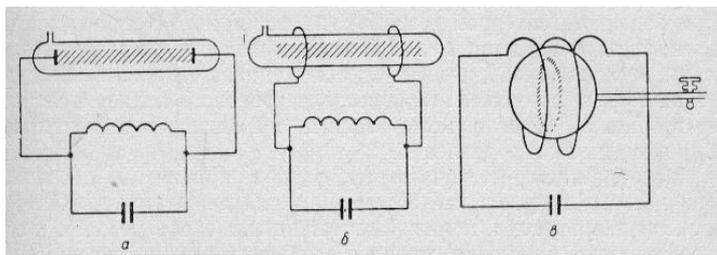


Рис. 5.2. Типы ВЧ- разряда: а, б- Е- разряд; в- Н- разряд

В первом случае разряд протекает в продольном переменном электрическом поле, во втором случае- в азимутальном. При этом питание ионных источников осуществляется через резонансные LC контуры, как это показано на рисунке, мощность питания, как правило, не превышает 1кВт.

В источниках водородной плазмы давление рабочего газа может быть $\sim(0.1-1)$ Па.

Процесс набора энергии электроном и передачи ее в плазму можно описать, используя приближенное уравнение движения электрона в направлении, совпадающем с вектором напряженности электрического поля:

$$m \frac{dV}{dt} + mv\nu = eE_0 \cos \omega t ,$$

в котором ν - средняя частота столкновений электрона с частицами окружающей его среды (газ или плазма). Решая это уравнение, можно получить следующее выражение для скорости электрона:

$$V(t) = \frac{eE_0}{m\sqrt{v^2 + \omega^2}} \cos(\omega t - \psi),$$

где $\psi = \arctg\left(\frac{\omega}{v}\right)$.

Среднее количество энергии, передаваемой электронами в единицу объема плазмы, в единицу времени за счет столкновений будет определяться следующим соотношением:

$$\langle Q \rangle = neE_0 \langle \cos \omega t V(t) \rangle = \frac{ne^2}{mv} \cdot \frac{1}{2} E_0^2 \frac{v^2}{v^2 + \omega^2} = \frac{\sigma_0}{2} E_0^2 \frac{v^2}{v^2 + \omega^2}.$$

Таким образом, имеется механизм ионизации газа, последующей накачки энергии в плазму, ее нагрева и обеспечения необходимой концентрации носителей заряда в плазме.

В случае Н- разряда в объеме плазменного источника, охватываемом соленоидом с переменным током $I_0 \cos \omega t$, возникает переменное магнитное поле, индукцию, которого можно оценить по известной формуле для магнитного поля соленоида:

$$B(t) \approx \mu_0 I_0 w \cos \omega t, \quad (5.3)$$

где w - число витков соленоида, приходящееся на 1 длины.

Используя закон электромагнитной индукции:

$$E_\varphi \cdot 2\pi r \approx -\pi r^2 \frac{\partial B}{\partial t},$$

приходим, с учетом (5.3), к следующему выражению для напряженности электрического поля:

$$E_\varphi \approx r \frac{I_0 w}{2\omega} \sin \omega t.$$

С учетом этого выражения механизм накачки энергии в плазму может быть рассмотрен по аналогии с Е- разрядом.

9. Образование плазмы при СВЧ- разрядах может осуществляться в резонаторах или волноводах, заполненных рабочим газом при давлениях (0.2-1) Па. Плазменные СВЧ- источники отличаются от ВЧ- источников

спецификой подвода электро- магнитной мощности с помощью волновода и большими значениями индукции магнитного поля $B \sim 10^{-1}$ Тл. Резонансный характер накачки энергии в плазму (электронный циклотронный резонанс), в отличие от ВЧ- источника, обеспечивается близостью частоты электромагнитных колебаний к электронным частотам Лармора и Ленгмюра, лежащих в диапазоне (10^9-10^{10}) Гц. При этом контрагирование разрядной плазмы становится не основной, а вспомогательной функцией внешнего магнитного поля.

10. Оптический пробой газа с образованием плазмы с высокой электронной концентрацией осуществляется при фокусировке в нем интенсивного лазерного излучения. Такое излучение генерируется лазерами в режиме «модулированной добротности». Для пробоя воздуха при атмосферном давлении проговая интенсивность излучения рубинового лазера составляет $\sim 10^{15}$ Вт/м².

11. Дуговой разряд возникает, если есть условия для достижения на катоде температур, обеспечивающих термоэмиссионный ток с катода $> 10^6$ А/м². В большинстве случаев первой стадией дугового разряда является тлеющий разряд. Основными отличиями дугового разряда от тлеющего являются большой разрядный ток и сравнительно небольшое падение потенциала. В области электродов дуга, как правило, локализована. При этом на электродах образуются локальные пятна, разогретые до высоких температур. Разряд может гореть при достаточно высоких давления, вплоть до атмосферного.

12. Дуговой разряд в вакууме, в отличие от дугового разряда, горит в вакууме при низких давлениях. При этом разрядной средой, являются пары металла и десорбируемый газ, выделяемые из разрядных электродах при их локальном разогреве.

13. Стриммерный разряд возникает, как правило, из тлеющего разряда, если максимальная плотность ионов в головной области электронной лавины

превысит значение $7 \cdot 10^{17}$ ион/м³ (**критерий Мика**). Распространение стриммера характеризуется скоростью более чем на порядок, превышающей скорость распространения обычной лавины. Возникновение стриммера связана с высокой интенсивностью рекомбинационного ультрафиолетового излучения из его головной части, которое вызывает фотоионизацию перед лавиной и дальнейшее распространение фронта ионизации со скоростью на порядок превышающей скорость распространения лавины. Ярким примером стриммера может служить природная молния. Наибольшее применение стриммерный разряд нашел в различных искровых разрядниках.

14. Лазерная плазма, в отличии от плазмы образуемой при оптическом пробое, образуется при воздействии на поверхность твердого тела (лазерная мишень) сфокусированного импульса излучения (длительность < 100 нс) оптического квантового генератора (лазера), работающего в режиме «модулированной добротности». При этом плотность потока энергии (плотность мощности) в области образования плазмы должна превышать 10^{15} Вт/м². В области фокусировки происходит практическое мгновенное испарение вещества лазерной мишени, а затем происходит процесс его ионизации. В результате образуется сгусток полностью ионизованной плазмы с начальной электронной плотностью $\sim (10^{26} \div 10^{27})$ м⁻³, разлетающийся в пространство перед мишенью со скоростью ударной волны.

Из-за большого градиента давления ионизированное вещество выбрасывается из области фокусировки излучения. Образуется газодинамическая ударная волна, распространяющаяся со скоростью $\sim 10^5$ м/с. Разлет плазмы носит автомодельный характер, при котором газодинамическая скорость пропорциональна расстоянию от центра плазменного сгустка до точки наблюдения. После прекращения действия лазерного излучения, в процессе расширения плазма остывает. В результате рекомбинации количество носителей заряда в плазме уменьшается до тех пор, пока размеры плазменного сгустка более чем на порядок не превысят

его первоначальные размеры. На этом этапе разлета плазмы процессы рекомбинации и ионизации практически прекращаются и происходит закалка ионизационного состояния плазмы на уровне (1-10)% от общего числа частиц в разлетающемся сгустке.

Лазерная плазма используется для получения интенсивных импульсных ионных потоков, в экспериментах по инициированию термоядерных реакций в системах с инерциальным удержанием, устройствах для напыления тонких пленок и т.д.

15. Пробой в вакууме по поверхности диэлектрика связан с наличием неоднородностей электрического поля, возникающих в области одновременного соприкосновения трех сред (диэлектрик, металл, вакуум), а так же при наличии шероховатостей на его поверхности. Кроме того, поверхность диэлектрика может содержать загрязнения или сорбировать газы. Разряд по поверхности диэлектрика используется иногда для стимулирования вакуумной дуги в ряде плазменных устройств.

16. Электрический взрыв проводников происходит при протекании по нему импульсного тока большой плотности ($\geq 10^{12}$ А/м²), приводящему к образованию плазмы и ударной волны. Разновидностью этого явления является **взрывная эмиссия**, при которой происходит взрыв острия или неоднородности на катоде под действием автоэлектронного тока.