

• Типы самостоятельных разрядов

В зависимости от давления газа, конфигурации электродов, параметров внешней цепи можно выделить 4 типа самостоятельных разрядов:

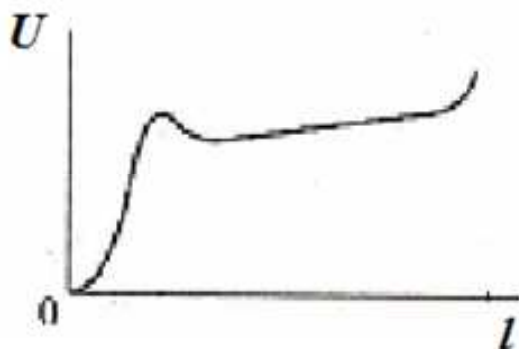
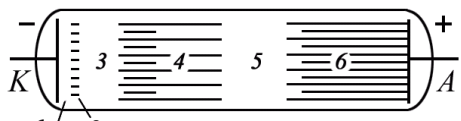
- **Тлеющий разряд** наблюдается при низком давлении ($\sim 0,01$ мм. рт. ст.), является следствием ударной ионизации и вторичной электронной эмиссии.
- **Коронный разряд** возникает при атмосферном давлении в сильно неоднородном электрическом поле на электродах с малым радиусом кривизны. Может возникнуть на остриях («огни святого Эльма»).
- **Искровой разряд** является следствием возникновения стримеров и ударной ионизации.
- **Дуговой разряд** является следствием термоэлектронной эмиссии и термической ионизации молекул газа.

Разряд в газах сопровождается свечением газа: при соударении электрона с молекулой молекула может перейти в возбужденное состояние. Время жизни $\tau = 10^{-8}$ с. Возвращаясь в исходное состояние, молекула излучает избыток энергии в виде кванта света – фотона. Излучение фотона возможно и при рекомбинации электрона с ионом.

Тлеющий разряд

Возникает при низком давлении. Схема эксперимента: в стеклянную трубку длиной 30-50 см впаяны электроды, к которым прикладывается постоянное напряжение в несколько сот вольт. При атмосферном давлении такое напряжение недостаточно для пробоя газа и трубка остается темной.

- При давлении $p \approx 50$ мм рт. ст. наблюдается разряд в виде шнура красноватого цвета, идущего от катода к аноду. При понижении давления шнур утолщается.
- При $p \approx 2-3$ мм рт. ст. свечение заполняет всю трубку. При давлении 0,1-0,01 мм рт. ст разряд имеет вид, изображенный на рисунке.



Основные причины: вторичная электронная эмиссия электронов из катода и ударная ионизация молекул газа электронами.

1 – Астоново темное пространство, названное в честь Ф. Астона (1877 – 1945), впервые наблюдавшего его. В этой области электроны, исходящие из катода, еще не успевают приобрести скорости, достаточной для возбуждения атомов и молекул.

2 – Первое катодное свечение (катодная пленка). В этой области происходит возбуждение атомов и молекул ударами электронов, но еще нет ионизации.

Возвращаясь в исходное состояние, возбужденные атомы излучают световые кванты, что и объясняет свечение.

3 – Катодное темное пространство (круковское темное пространство). На самом деле оно не совсем темное, но кажется таким на фоне примыкающих к нему более светлых областей разряда. В этой части пространства начинается ударная

ионизация атомов и молекул и нарастание электронных лавин. Из-за возможности ионизации уменьшается вероятность возбуждения атомов, с чем связано ослабление свечения газа. Область темного катодного пространства очень важна, так как созданные здесь положительные ионы обеспечивают необходимую эмиссию электронов с катода. Образовавшиеся ионы вначале имеют малую скорость и в катодном темном пространстве создается положительный пространственный заряд, что приводит к перераспределению потенциала вдоль трубки и к возникновению катодного падения потенциала.

4. Тлеющее свечение. – Электроны, возникшие в катодном темном пространстве, проникают в область тлеющего свечения, которая характеризуется высокой концентрацией электронов и положительных ионов и суммарным пространственным зарядом, близким к нулю. Поэтому напряженность поля здесь очень мала. Благодаря высокой концентрации электронов и ионов в области тлеющего свечения идет интенсивный процесс рекомбинации электронов и положительных ионов, сопровождающийся излучением выделяющейся при этом энергии. Тлеющее свечение имеет резкую границу со стороны катода, возникает из-за рекомбинации электронов с положительными ионами. Свечение возникает также вследствие излучения возбужденных атомов.

5 – Фарадеево темное пространство. В эту область электроны и ионы проникают за счет диффузии (не долетают быстрые электроны электронных лавин). Вследствие меньшей концентрации заряженных частиц вероятность рекомбинации в фарадеевом темном пространстве резко падает. Поэтому фарадеево пространство и кажется темным.



Перечисленные пять областей называются катодными частями разряда. Именно в этой области происходят все процессы, необходимые для поддержания разряда.

6 – Положительный столб разряда. В фарадеевом темном пространстве уже имеется поле. Отсюда электроны проникают в область положительного столба. В области положительного столба концентрация электронов и

ионов примерно одинакова и очень велика. Свечение в положительном столбе возникает в основном за счет рекомбинации электронов с положительными ионами.

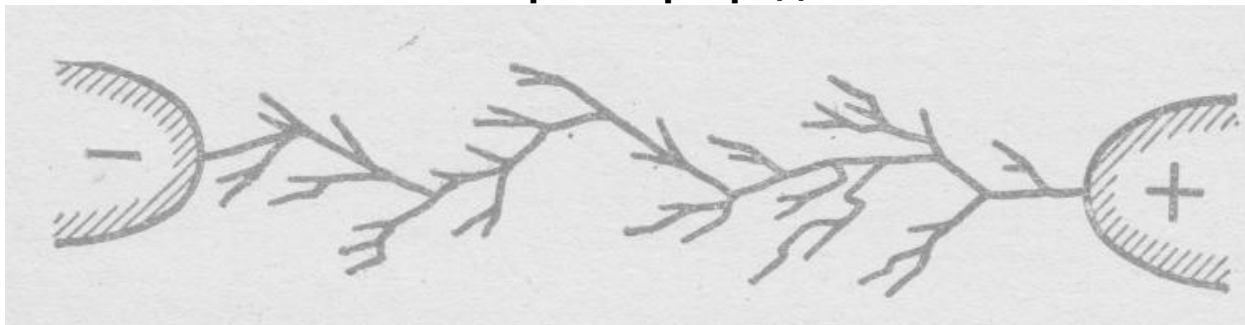
Цвет свечения зависит от природы газа:

- При дальнейшем понижении давления, меньших 0,1-0,01 мм рт.ст., электронный пучок движется в трубке почти без столкновений. Такие электронные пучки получили исторически название катодных лучей. При свечении газа ослабевает, но возникает свечение стенок трубки – **катодолюминесценция**. Так как концентрация молекул остаточного газа мала, электроны, ускоренные полем, преимущественно ударяются о стеклянные стенки трубки, вызывая их свечение. Катодные лучи используются в рентгеновских трубках для получения рентгеновских лучей.

Если в катоде газоразрядной трубки сделать узкий канал, часть положительных ионов проникает в пространство за катодом и образует резко ограниченный пучок ионов, называемый каналовыми лучами. Именно так впервые были получены пучки положительных ионов.

Применение: лампы дневного света – в трубке пары ртути; газосветные трубки – неон дает красный свет, аргон – синевато-зеленый.

Искровой разряд



Возникает при больших напряжениях электрического поля $\approx 3 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ в газе, находящемся под давлением порядка атмосферного. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвлений, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга. Эти полосы называются искровыми каналами.

Казалось, что причины те же, что и в случае тлеющего разряда. Но тогда время развития разряда между электродами $10^{-4} - 10^{-5}$ с, в то время как фактически 10^{-7} с.

Объяснение искрового разряда дается на основе стримерной теории.

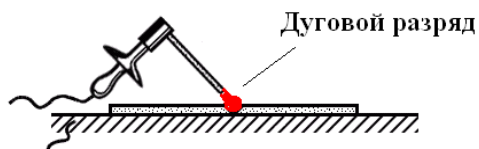
Вначале происходит ионизация молекул газа и возбуждение молекул и атомов газа. Возникает электронная лавина. На ее пути происходит ионизация и возбуждение молекул газа. Световые кванты, распространяясь к аноду со скоростью света, сами вызывают ионизацию газа и дают начало новым электронным лавинам. Возникают слабо светящиеся скопления ионизованного газа, называемые стримерами.

Лавины, следуя одна за другой, образуют проводящие каналы из стримеров, следствием чего является образование канала искрового разряда.

Характерный пример: **молния**. Разные части грозового облака несут заряды различных знаков. Чаще всего часть облака, обращенная к Земле, заряжена отрицательно, а верхняя – положительно. Поэтому при сближении двух облаков разноименно заряженными частями между ними проскакивает молния. Кроме того, проходя над Землей, грозовое облако создает на ее поверхности большие индуцированные заряды, и поэтому облако и поверхность Земли образуют две обкладки большого конденсатора. Если напряженность между Землей и облаком будет достаточно большой, может произойти пробой, то есть молния, ударяющая в Землю. При этом молния иногда поражает людей и вызывает пожары. Главный канал молнии имеет диаметр от 10 до 25 см, а длина молнии может достигать нескольких километров. Максимальная сила тока молнии достигает десятков и сотен тысяч ампер (10^5 А). Напряжение между облаком и Землей $\sim 10^8 \text{ В}$. При выделении энергии возникают ударные волны – мощные раскаты грома. Возникают к тому же при отражении от облаков, гор и т. д. 1753 г. – смерть Г. Рихмана.

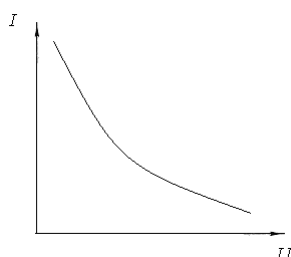
Применение: свеча зажигания, искровые разрядники, электроискровая обработка металлов.

Дуговой разряд



Впервые дуговой разряд был получен В.В. Петровым в 1802 г. Возникает после зажигания искрового разряда при уменьшении расстояния между электродами, что приводит к резкому возрастанию тока (до сотен ампер). При этом напряжение на разрядном промежутке падает (~ десятки вольт).

Основными факторами являются термоэлектронная эмиссия с катода и термическая ионизация молекул газа в межэлектродном пространстве. При этом все межэлектродное пространство заполнено высокотемпературной плазмой. Температура плазмы достигает 6000 К, катод раскаляется вследствие бомбардировки положительными ионами примерно до 3500 К. Анод разогревается еще сильнее. В результате анод интенсивно испаряется и на его поверхности образуется углубление – кратер.



Вольтамперная характеристика (ток падает при увеличении напряжения между электродами) обусловлена тем, что при увеличении напряжения сопротивление падает быстрее, чем растет ток.

Применение: электросварка, дуговые электропечи, мощные источники света.

Коронный разряд

Коронный разряд возникает при сравнительно высоких давлениях газа (порядка атмосферного) в сильно неоднородном электрическом поле. Такое поле можно получить между двумя электродами, поверхность одного из которых обладает большой кривизной (острие). Наличие второго электрода не обязательно, его роль могут играть окружающие незаземленные предметы. При коронном разряде ионизация и возбуждение молекул происходит не во всем межэлектродном пространстве, а лишь вблизи электрода с малым радиусом кривизны, где напряженность поля достигает значений, превышающих $E_{\text{проб.}} \sim 30 \text{ кВ/см}$. Свечение по форме напоминает корону.

В зависимости от знака коронирующего электрода различают отрицательную или положительную корону.

- Если корона возникает вокруг отрицательного электрода – отрицательная корона. В противоположном случае – положительная корона.

В случае отрицательной короны положительные ионы, образуемые электронными лавинами, ускоряются в сильно неоднородном электрическом поле вблизи катода. Попадая на анод, они выбивают из катода электроны. Они порождают на своем пути электронные лавины. Так как поле убывает при удалении

от проволоки, то на некотором расстоянии от электрода электронные лавины обрываются, попадают в «темную» область и прилипают к нейтральным молекулам газа. Пространственный отрицательный заряд этих ионов вблизи анода ограничивает общий разрядный ток.

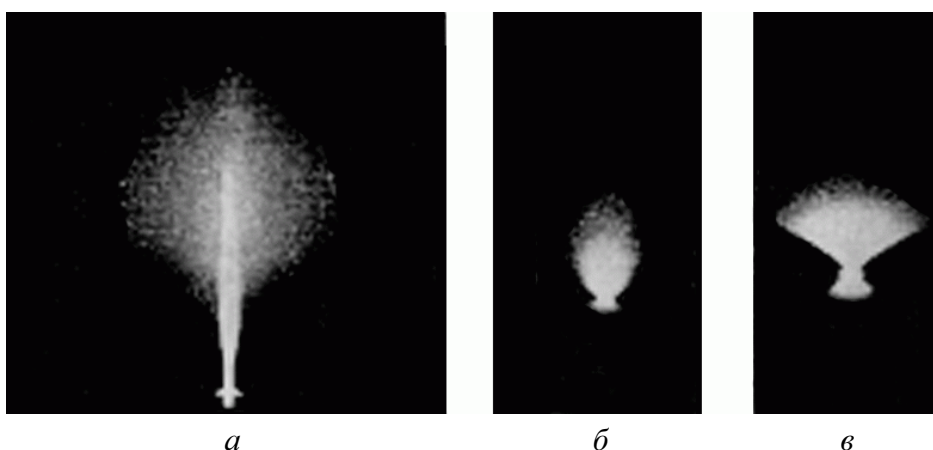
- В положительной короне электронные лавины зарождаются у внешней границы короны и устремляются к коронирующему электроду – аноду. Возникновение электронов обусловлено фотоионизацией, вызванной излучением коронирующего слоя. Они зарождаются на внешней границе коронирующего слоя и распространяются к положительному электроду (обладающему большой кривизной). Носителями тока во внешней области короны служат положительные ионы, которые дрейфуют под действием внешнего поля к катоду. При увеличении напряжения между электродами «темная» область коронного разряда исчезает и возникает искровой разряд с полным пробоем разрядного промежутка.

Коронный разряд может возникнуть на одном электроде. Второй электрод – Земля.

Коронный разряд иногда возникает в естественных условиях под влиянием атмосферного электричества на верхушках деревьев, корабельных мачт и т. д. Это явление в старину получило название огней святого Эльма. Вызывало суеверный страх. Это явление учитывают в технике высоких напряжений: образуясь вокруг проводов высоковольтных линий передач электроэнергии, корона ионизует окружающий воздух, вследствие чего возникают вредные токи утечки. Применение: молниеотводы, электрофильтры, нанесение красок в коронном разряде.

Вредное действие: радиопомехи; возникновение на проводах высоковольтных ЛЭП приводит к утечке тока (для снижения утечки высоковольтные провода делают большего диаметра).

При достаточно высоком напряжении между электродами коронный разряд переходит в искровой.



Кистеобразные формы коронного разряда в атмосферном воздухе. Острие с гиперболической вершиной (радиус кривизны 1,5 мм): *а* – потенциал острия +25 кВ, стримерная корона; *б* – потенциал острия –25 кВ, отрицательная корона в импульсном режиме; *в* – потенциал острия –60 кВ, отрицательная корона в непрерывном режиме.

Плазма

При сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в пар. Если увеличивать температуру дальше, то резко усилятся процессы термической ионизации – молекулы и атомы распадаются на положительно заряженные ионы и электроны. Термин плазма введен амер. учеными И. Лэнгмюром и Л. Тонксом в 1929 г., изучавшими низкотемпературную газоразрядную плазму.

Плазма – это ионизированный квазинейтральный газ. Квазинейтральность означает, что число зарядов противоположных знаков почти одинаково. **Плазму часто называют особым четвертым состоянием вещества.** Различают высокотемпературную плазму, возникающую при сверхвысоких температурах, и газоразрядную, возникающую при газовом разряде. Отношение числа ионизированных атомов к их полному числу в том же объеме называют степенью ионизации плазмы α . В зависимости от степени ионизации выделяют слабую (α составляет доли процента), умеренно (α несколько процентов) и полностью ионизированную плазму (α близко к 100 %).

Различают высокотемпературную плазму, возникающую при сверхвысоких температурах, и газоразрядную плазму, возникающую в газовом разряде.

В газоразрядной плазме энергию электрического поля приобретают наиболее подвижные частицы – электроны. Ионы в основном нагреваются за счет энергии, которую приобретают от «горячих» электронов при кулоновском взаимодействии с ними. Поэтому температура электронов значительно выше температуры ионов. Это означает, что температура T_e электронного газа одна, а ионного T_i – другая, причем $T_e > T_i$. Отсюда газоразрядная плазма является неравновесной, поэтому ее называют неизотермической. Убыль числа заряженных частиц в результате рекомбинации в газоразрядной плазме восполняется ударной ионизацией электронами, ускоренными электрическим полем. Прекращение действия электрического поля приводит к исчезновению плазмы. Условие существования такой плазмы – некоторая максимальная плотность заряженных частиц. Эта плотность определяется в физике плазмы из неравенства $L \gg D$, где D – так называемый дебаевский радиус экранирования, представляющий собой то расстояние, на котором происходит экранирование кулоновского поля любого заряда плазмы.

Условие квазинейтральности плазмы – линейные размеры плазмы должны значительно превышать: $L \gg D$,

Пример: тлеющий разряд – $p = 0,01$ мм рт. ст., $T_e = 50000$ °С, $T_i =$ неск. сотен градусов.

Высокотемпературная плазма является равновесной или изотермической, то есть убыль заряженных частиц компенсируются при определенной температуре в результате термической ионизации. В такой плазме средние кинетические энергии электронов и ионов равны. В состоянии такой плазмы находятся звезды. Их температура достигает нескольких миллионов градусов.

Сначала плазма вызывала интерес как особый проводник электрического тока. Положение существенно изменилось в связи с пониманием роли плазмы во

Вселенной, подавляющая часть которой (звезды и межзвездная среда), как считалось до последнего времени, являются плазмой, а также в связи с возможностью создания новых источников энергии – управляемого термоядерного синтеза, преобразования энергии плазмы непосредственно в электрическую (в магнитогидродинамических генераторах).

Плазма – наиболее распространенное во Вселенной состояние вещества: Солнце, галактические туманности, звезды и межзвездная среда. Земля окружена плазменной оболочкой, называемой ионосферой.

Основные особенности плазмы.

1 Дебаевский радиус r_D – это характерный линейный размер области зарядовой декомпенсации в плазме. Показано, что

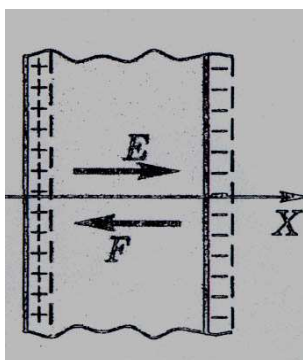
$$r_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_0}{ne^2}}.$$

Дебаевский радиус характеризует расстояние, на котором плазма экранирует себя от локального избытка заряда. Понимается это так:

Пусть в плазме оказался некоторый заряд $q > 0$. Ближайшие к нему электроны плазмы будут им притягиваться, а ионы, например, отталкиваться. В результате вокруг заряда q возникает сферически симметричное электронное облако. Оно будет экранировать заряд q от расположенной вокруг плазмы, так что на некотором расстоянии от заряда q поле, образованное этим зарядом и электронным облаком, будет исчезающе малым. Это расстояние практически равно радиусу электронного облака, то есть размеру области, в пределах которой сказывается действие заряда q . Радиус этой области порядка дебаевского радиуса r_D .

Плазма экранирует не только действие помещенного в нее заряда, но и действие внешнего электрического поля. Последнее проникает в плазму на расстояние тоже дебаевского радиуса.

2. Условие квазинейтральности. Чтобы плазма сохраняла квазинейтральность, ее линейные размеры L должны намного превосходить дебаевский радиус r_D . И только при соблюдении квазинейтральности плазма ведет себя как связанный коллектив заряженных частиц. Это значит, что в плазме одновременно взаимодействует громадное число частиц, в отличие от обычных газов, где частицы взаимодействуют друг с другом в основном только при взаимодействиях. Этим свойством плазма обязана дальнедействию кулоновских сил, вовлекающих во взаимодействие множество частиц. С этим связана возможность разнообразных коллективных колебаний плазмы.



3. Плазменные колебания. Плазменные колебания. При нарушении электронейтральности в какой – либо области плазмы в ней возникает электрическое поле и в результате – продольные колебания зарядов с некоторой частотой $\omega_{пл}$, которую называют плазменной частотой. **Пример:**

Под действием некоторой причины электронная компонента плазмы, имеющая форму плоского слоя, сместилась на некоторое расстояние x перпендикулярно

слою (см. рисунок). Вследствие этого возникли поверхностные заряды (как на плоском конденсаторе) и соответствующая возвращающая сила, что привело к возбуждению плазменных колебаний. Найдите циклическую частоту этих колебаний, если концентрация электронов равна n .

На электронную компоненту плазмы в этом случае будет действовать сила $\vec{F} = q\vec{E}$, где q – суммарный заряд электронов ($q < 0$). Если суммарная масса электронов равна m , то согласно основному уравнению динамики

$$m\ddot{x} = qE_x, \quad (1)$$

где E_x – проекция напряженности электрического поля, создаваемого зарядами на поверхности слоя. Если сопоставить с плоским конденсатором с поверхностной плотностью заряда σ , то

$$E_x = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{enx}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

где nx – число электронов на единицу площади заряженного поверхностного слоя. При этом в рассматриваемый момент $E_x > 0$ и $x > 0$. Подставим (2) в (1) и учтем, что $m = Nm_e$ и $q = N(-e)$. Тогда (1) примет вид

$$\ddot{x} + \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e} x = 0. \quad (3)$$

Следовательно, получили уравнение гармонических колебаний с циклической частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e}}.$$

Соответствующие колебаниям волны можно рассматривать как движение квазичастиц – *плазмонов* с энергией $\epsilon = \hbar\omega$. В металле концентрация свободных электронов велика и соответствующая энергия плазмона может быть порядка десятка электрон-вольт. Плазмоны с такой энергией могут возникать, если через металл пролетают частицы высокой энергии. Нагреванием таких плазмонов не создать, так как для этого нужны температуры, которые ни один металл не выдержит.

Применение плазмы. В космическом пространстве плазма – наиболее распространенное состояние вещества. Поэтому изучение ее физических свойств позволяет решать проблемы астрофизики, с другой, объект исследования по управляемому термоядерному синтезу.

Низкотемпературная плазма ($< 10^5$ К) используется в газовых лазерах, в термоэлектронных преобразователях и магнитогиродинамических генераторах (МГД-генераторах) – установках для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую и т.д.,

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики Т. 3: Электричество: учебное пособие: М. Физматлит: Изд-во МФТИ, 2003. — 654 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. М. Высшая школа, 1999.
3. Д.И. Вайсбурд, Ю.А. Сивов, Ю.И. Тюрин, Л.Ю. Лельчук. Сборник вопросов и задач по физике для студентов элитного технического отделения: Методическое пособие для технических университетов. Часть III. / Под редакцией проф. Ю.И.Тюрина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 228 с.
- С. Г. Калашников С.Г. Электричество. - М. Наука, 1977. – 664 с.