**1.8. Ионизация и возбуждение молекул газа**

Если при столкновениях происходят изменения в состояниях молекул или атомов, то соударения уже нельзя рассматривать абсолютно упругими. В результате столкновения могут возникнуть новые заряженные частицы, существенно влияющие на протекание различных физических процессов.

В нейтральном атоме заряд электронов на орбитах равен положительному заряду ядра. Чем дальше расположена орбита электрона от ядра, тем меньше силы связи электронов с атомом. Наиболее дальние орбиты являются неустойчивыми; на них электроны могут находиться только в течение малого периода времени (возбужденное состояние атома), а затем они переходят на основные более близкие к ядру орбиты с испусканием фотонов.

В атомах, связанных в молекулы, электроны взаимодействуют не только с собственным ядром, но и с ядрами других атомов молекулы. Поэтому при рассмотрении процессов газового разряда молекулы газа рассматриваются как целостное образование, взаимодействующее с электронами.

При отрыве одного электрона от нейтрального атома или молекулы возникает однозарядный ион. Процесс отрыва электронов от атома или молекулы называется ***ионизацией***. Для ионизации необходимо затратить определенную величину энергии. Если для ионизации используется достаточно большая энергия, то возможен отрыв двух или трех электронов и образование двухзарядного или трехзарядного положительного иона.

В атомных процессах энергию принято измерять в электрон-вольтах (эВ). Энергия в 1 эВ равна кинетической энергии, которую приобретает электрон при свободном движении между двумя точками с разностью потенциалов в 1 В (1 эВ = 1,6.10-19 Дж). Так как заряд электрона постоянен, энергию  можно также численно характеризовать величиной напряжения (или потенциала) *U*, В.

При передаче молекуле или атому энергии возможен не только полный отрыв электрона, но и переход электрона на более удаленную неустойчивую орбиту. Этот процесс называется ***возбуждением***молекулы или атома. Возбужденное состояние молекулы неустойчиво, поэтому в течение времени порядка 10-10 с происходит обратный переход электрона на устойчивую орбиту с излучением фотона. Значения потенциалов ионизации  и возбуждения  для некоторых газов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Значения первых потенциалов ионизации и возбуждения молекул различных газов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Газ | , В | , В |
| АзотN2 | 15,8 | 6,1 |
| Водород H2 | 15,4 | 11,2 |
| Гелий He2 | 24,6 | 19,8 |
| Кислород O2 | 12,5 | 7,9 |

**1.9. Основные механизмы ионизации и возбуждения**

**молекул и атомов газа**



Рис. 1.3. Схема ударной ионизации нейтральных молекул и атомов электронами

1.8.1. Ударная ионизация и ударное возбуждение. Ударная ионизация является основным механизмом процесса увеличения количества носителей зарядов в газе и возникает при столкновении молекулы или атома с электроном, ускоренным в электрическом поле. Упрощенная схема ионизации при столкновении с электроном показана на рис. 1.3. В результате ионизации возрастает число свободных электронов - происходит, как говорят, размножение электронов.

Для анализа ударного механизма ионизации и возбуждения, как и в разделе 1.6, рассмотрим лобовое, но уже неупругое, столкновение шаров. Полагаем, что при столкновении неподвижная частица массой  изменяет свое состояние, т.е. ее потенциальная энергия увеличивается на величину . Найдем долю энергии заряженной частицы 1 , которая идет при неупругом столкновении на увеличение потенциальной энергии частицы 2, т.е. на ее возбуждение или ионизацию. Для этого запишем и решим систему уравнений, но уже для неупругого соударения шаров. При этом учтем, что после неупругого столкновения . Тогда

 (1.39)

Решая эту систему уравнений найдем:

. (1.40)

Так как до соударения энергия частицы 1 была равна

, (1.41)

то

. (1.42)

 Из (1.42) следует, что электрон () отдает практически всю свою кинетическую энергию молекуле (), а ион () - только половину (). Поскольку, кроме того, электроны в электрическом поле способны приобретать существенно большую энергию, чем ионы, то они в процессе ударной ионизации играют основную роль. **В связи с этим в процессе размножения носителей зарядов при ударных процессах в газе обычно учитывают только соударения молекул с электронами.** Ионы оказывают существенное влияние на процесс размножения в основном на поверхности твердого вещества.

Определим минимальную эффективную длину свободного пробега электрона, необходимую для ионизации () и возбуждения () молекулы. В поле с напряженностью электрического поля  электрон с зарядом  приобретает на пути свободного побега  вдоль поля кинетическую энергию, равную . Для ионизации молекулы необходимо, чтобы эта энергия была не меньше энергии ионизации молекулы газа . Приравнивая энергию электрона энергии ионизации, находим

. (1.43)

Аналогичный вид имеет формула для расчета :

. (1.44)

Определим теперь число ионизаций, совершаемых электроном **на единичном пути** своего пробега. Необходимую для ионизации молекул кинетическую энергию электрон приобретает от электрического поля на пути свободного пробега . Согласно закону Клаузиса вероятность того, что электрон пролетает без столкновений путь не менее , равна

. (1.45)

λ – средняя длина свободного пробега.

Поскольку при длине свободного пробега электрона более  и последующем соударении с нейтральной молекулой всегда происходит ионизация, то вероятность в (1.45) совпадает с вероятностью ионизации при их столкновении. Число столкновений на единице длины в среднем равно 1/. Умножая это число на вероятность ионизации при столкновении, получаем число ионизаций электроном **на единичном пути**

. (1.46)

Данное число ионизаций называется ***коэффициентом ударной ионизации*** (первый ионизационный коэффициент Таунсенда). Если учесть, что , а число столкновений на единице длины 1/, пропорционально относительной плотности газа  (, где  - коэффициент пропорциональности в случае ионизационных процессов, изменяющийся для разных газов ориентировочно от  до  м-1), то выражение (1.46) можно представить в виде

. (1.47)

 Значения , рассчитанные по формуле (1.47) бывают несколько завышенными. В связи с этим для более точного определения  зависимость (1.47) представляют в общем виде

 (1.49)

и снимают экспериментально. Эту экспериментальную зависимость используют обычно для нахождения критических значений электрических полей при различных условиях. В качестве иллюстрации на рис. 1.4 представлена такая зависимость для воздуха. Видно, что заметная ионизация начинается при величинах  кВ/см. С ростом  коэффициент  быстро растет.

Фотоионизация и фотовозбуждение. *Фотоионизацией* называется ионизация в результате поглощения молекулой кванта излучения (фотона). Для фотоионизации необходимо, чтобы энергия фотона , где  =6,626.10-34 Дж.с - постоянная Планка,  - частота излучения, была больше энергии ионизации.

Для фотовозбуждения все аналогично. Условия фотоионизации и фотовозбуждения выражаются соотношениями

, (1.50)

. (1.51)



Рис. 1.4. Зависимость  для воздуха

Как следует из этих формул наибольшей ионизирующей способностью обладают фотоны с большей частотой излучения: космические лучи (длина волны меньше 5.10-4 нм), - излучение радиоактивного распада (длина волны 0,0005 - 0,01 нм), рентгеновское излучение (длина волны 0,01 - 0,15 нм) и световые волны в ультрафиолетовой части спектра (длина волны 15 - 380 нм).

Посредством фотоионизации главным образом возникают первичные электроны, необходимые для начала любого разрядного процесса.

При протекании разряда в газе источником фотонов, ионизирующих нейтральные частицы, служат не только внешние излучатели, но и сами молекулы и атомы, участвующие в процессе разряда. Так, при возбуждении молекулы в результате столкновения, электрон возвращается на устойчивую орбиту с испусканием фотона, который может ионизировать другую ранее возбужденную молекулу. Процесс ионизации вторичными фотонами играет решающую роль в формировании искрового разряда.

Термоионизация и термовозбуждение. С повышением температуры в молекулах и атомах заселенность более удаленных от ядра электронных орбит в соответствии с распределением Больцмана возрастает. Так как электроны, находящиеся на удаленных орбитах, связаны с ядром слабее, чем электроны, находящиеся на близких к ядру орбитах, то с повышением температуры возможность отрыва электрона от нейтральной молекулы или атома облегчается. С другой стороны, с повышением температуры газа кинетическая энергия частиц () возрастает. В результате указанных явлений при температуре газа в несколько тысяч градусов становится возможной ионизация и возбуждение нейтральных молекул и атомов в процессе различных столкновений **даже без внешнего электрического поля.** Такой механизм ионизации и возбуждения называется *термоионизацией* и *термовозбуждением*.

Чаще всего термоионизация носит ступенчатый характер за счет многократных возбуждений молекул газа при соударениях. Важную роль при этом играют фотоны, излученные возбужденными молекулами.

При газовом разряде термическая ионизация существенна лишь в заключительной фазе, когда образуется высокопроводящий канал и его температура резко возрастает вследствие выделения большого количества энергии. Процесс термоионизации играет, в частности определяющую роль в столбе электрической дуги, температура которого составляет от 4000 до 15000 К.

**1.10. Прилипание электронов**

Свободные электроны при определенных условиях могут быть захвачены некоторыми нейтральными молекулами. В результате такого захвата образуются отрицательные ионы. Данный процесс называется *прилипанием электронов*.

При прилипании электронов не меняется общее число носителей заряда. Однако уменьшается число свободных электронов в газе, что очень важно для ионизационных процессов. Прилипание электронов существенно тормозит развитие разряда. Энергия связи прилипших электронов особенно велика для галогенов.

Газы, способные захватывать электроны и образовывать отрицательные ионы, называются *электроотрицательными*. В равновесном состоянии большая часть электронов в таких газах находится в захваченном состоянии, и лишь немногие из них свободны. Подобные газы отличаются тем, что число свободных электронов в них, необходимых для начала разряда, очень мало.

В холодном воздухе в отсутствие поля электроны прилипают к молекулам кислорода. В электрическом поле, когда электроны приобретают энергию в несколько электрон-вольт, идут реакции диссоциативного прилипания, требующие затрат энергии на разрушение молекул, облегчающее прилипание.

 При небольшой влажности воздуха основную роль играет прилипание к кислороду. Интенсивность реакции повышается с температурой газа.

Азот, основной компонент воздуха, не обладает способностью захватывать электроны. Кислород и воздух в целом проявляют слабые электроотрицательные свойства. Элегаз () имеет существенно большие сечения прилипания, особенно при малых энергиях электронов.

Используя ход рассуждений вывода формул для коэффициента ударной ионизации, выведем для электроотрицательных газов упрощенную зависимость *коэффициента прилипания* , численно равного числу прилипания электрона к молекулам на единичном пути своего пробега, от напряженности электрического поля. Примем, что прилипание всегда имеет место, если энергия электрона меньше энергии сродства . Для этого длина свободного пробега электрона в электрическом поле должна быть меньше длины пробега, соответствующей энергии . Из закона Клаузиса следует, что вероятность пролета электроном без столкновений пути не более  равна

. (1.53)

Эта вероятность и равна вероятности прилипания электрона к молекулам газа на пути пролета . Следует обратить внимание, что здесь под  понимается не эффективная, а средняя длина свободного пробега. Число соударений на единице длины, приводящих к прилипанию электрона к молекуле, в среднем равно 1/. Умножая число столкновений на вероятность прилипания электрона к молекуле при столкновении и учитывая соотношения  и , получим выражение для числа прилипания электрона  на единичном пути

. (1.54)

Из (1.54) и видно, что с ростом  коэффициент  убывает.

**1.11. Рекомбинация заряженных частиц**



Рис. 1.5. Схема электронно-ионной (а) и ионной (б) механизмов рекомбинации

Процесс *рекомбинации* заключается во взаимной нейтрализации зарядов противоположно заряженных частиц при их столкновении (рис. 1.5). Возможен электронно-ионный механизм рекомбинации, заключающийся в рекомбинации электрона с положительным ионом с появлением нейтральной молекулы. Возможен также ионный механизм рекомбинации при столкновении положительного и отрицательного ионов. В процессе этой рекомбинации лишний электрон с орбиты отрицательного иона переходит на орбиту положительного иона и возникают две нейтральные молекулы. В результате рекомбинации выделяется энергия  в виде энергии излучаемых фотонов.

**1.12. Поверхностная ионизация**

***Поверхностной ионизацией*** называется эффект эмиссии (испускания) из электродов заряженных частиц, в основном свободных электронов.

В металле катода свободные электроны находятся в электрическом поле положительных ионов, образующих кристаллическую решетку. Ионы вблизи поверхности металла создают потенциальный барьер, который удерживает свободные электроны внутри металла. Для выхода из металла электроны должны получить энергию, достаточную для преодоления поверхностного потенциального барьера. Значения **энергии выхода**  электронов из некоторых металлов приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2

|  |  |
| --- | --- |
| Металл | Энергия выхода, эВ |
| Алюминий | 1,8 |
| Медь | 3,9 |
| Железо | 3,9 |
| Серебро | 3,1 |

Поверхностная ионизация с катода может иметь различные механизмы эмиссии, определяемые способом сообщения электронам энергии выхода.

Вторичная электронная эмиссия происходит под действием бомбардировки поверхности катода положительными ионами, ускоренными электрическим полем между электродами.

Количество эмитированных электронов, приходящихся на один ион, называется *вторым коэффициентом Таунсенда* . Так как  обычно больше, чем кинетическая энергия иона, то величина  незначительно зависит от электрического поля и определяется в основном родом газа и материалом катода. Для воздуха, элегаза и обычных материалов электродов  имеет порядок 10-5.

Фотоэлектронная эмиссия происходит при падении на поверхность катода фотонов достаточно высокой энергии. Для однократной фотоэлектронной эмиссии необходимо выполнение условия

. (1.62)

Анализ экспериментальных данных показывает, что по сравнению с фотоионизацией газа для эмиссии электронов с поверхности катода достаточно излучения с существенно меньшей частотой. *Коэффициент фотоэлектронной эмиссии*  определяется как число эмитированных электронов одним фотоном.

Термоэлектронная эмиссия - это эмиссия, при которой свободные электроны в металле за счет его нагрева приобретают энергию, достаточную для преодоления поверхностного потенциального барьера. При нормальной температуре термоэлектронная эмиссия не наблюдается. Однако при определенной пороговой температуре эмиссия резко возрастает.

Автоэлектронная эмиссия заключается в том, что электроны под действием сил электрического поля, созданного между электродами, вырываются из катода вследствие их волновых свойств и туннельного эффекта. Автоэлектронная эмиссия происходит при напряженностях поля вблизи катода порядка 106 В/см. Напряженность такого порядка можно создать на остриях в средах, в которых отсутствуют другие формы ионизации, например в вакууме или в масле.

**1.13. Плазма**

Наряду с тремя общеизвестными агрегатными состояниями вещества - твердым, жидким и газообразным - существует четвертое состояние, названное плазмой.

Плазма представляет собой газ, в котором ионизирована значительная часть молекул. Отличительной особенностью плазмы является ее ***квазинейтральность***. Для поддержания плазменного состояния вещества необходима некоторая определенная достаточно высокая концентрация заряженных частиц. Объясняется это следующим образом. Под действием хаотического теплового движения частиц легкие электроны стремятся уйти за пределы объема, занимаемого плазмой. Этому выходу противодействуют силы электрического поля, возникающие между вылетевшими электронами и оставшимися избыточными положительными ионами. Только при достаточной концентрации заряженных частиц силы электрического поля создают потенциальный барьер на границах плазмы, способный удерживать электроны от вылета и поддерживать тем самым плазменное состояние вещества с ее свойством квазинейтральности. Для возникновения потенциального барьера, достаточного для поддержания плазменного состояния с ее свойством квазинейтральности, необходимо, чтобы линейные размеры области, занимаемой плазмой, значительно превосходили так называемый *дебаевский радиус экранирования* , где  - концентрация электронов,  - температура электронов. При  см-3 и  К  см. Электрическое поле отдельной частицы в плазме экранируется частицами противоположного знака, т.е. практически исчезает, на расстояниях порядка  от частицы. Взаимодействие частиц в плазме является, строго говоря, не "парным", а "*коллективным*" - одновременно взаимодействует друг с другом большое число частиц. Величина  определяет и глубину проникновения внешнего электростатического поля в плазму. Квазинейтральность может нарушаться вблизи поверхности плазмы, где более быстрые электроны вылетают по инерции за счет теплового движения на длину порядка .

Плазма состоит из электронов, положительных ионов и нейтральных молекул и атомов, равномерно перемешанных между собой, но неодинаково нагретых. Из-за различия в средней кинетической энергии этих частиц в плазме при низком давлении вместо одной общей температуры различают три: электронную , ионную и атомную . Обычно . В плазме при высоком давлении практически .

 Возможные значения плотности плазмы расположены в очень широких пределах: от  см-3 в межгалактическом пространстве и порядка 10 см-3 в солнечном ветре до  см-3 в молнии и  см-3 в твердых телах.

 Плазма подразделяется на низкотемпературную ( К) и высокотемпературную ( К). Это условное разделение связано с особой важностью высокотемпературной плазмы в связи с проблемой осуществления управляемого термоядерного синтеза.

Спектр излучения низкотемпературной (например, газоразрядной) плазмы состоит из отдельных спектральных линий. В газосветных трубках, применяемых, в частности, для освещения (лампы "дневного света"), наряду с ионизацией происходит обратный процесс - рекомбинация ионов и электронов, дающая так называемое *рекомбинационное излучение* со спектром в виде широких полос. Для высокотемпературной плазмы со значительной степенью ионизации характерно *тормозное излучение* с непрерывным спектром, возникающее при столкновениях электронов с ионами.

Плазма электропроводна, отражает электромагнитные волны. В лабораторных условиях и промышленных применениях она образуется в электрическом разряде в газах (дуговом, искровом, тлеющем разрядах и пр.), в процессах горения и взрыва, используется в плазменных ускорителях, магнитогидродинамических генераторах, в установках для исследования управляемого термоядерного синтеза.

               Плазма - это наиболее распространенное состояние вещества в природе. Солнце и звезды можно рассматривать как гигантские сгустки горячей плазмы. Внешняя поверхность земной атмосферы прикрыта плазменной оболочкой - ионосферой. Радиационные пояса, расположенные в околоземном пространстве, за пределами ионосферы, представляют собой весьма разреженные плазменные образования. В земных природных условиях, в лабораториях и в технике мы встречаемся с плазмой при различных газовых разрядах, так как любой газовый разряд (молния, искра, дуга и т. д.) связан с возникновением плазмы.
               Роль главных стимулов в развитии исследований по физике плазмы всегда играли перспективы практических применений. Сначала плазма интересовала физиков как своеобразный проводник электрического тока и как источник света.
              Плазма - это материальная среда, образованная коллективом частиц, взаимодействующих друг с другом по наиболее простым законам с помощью электростатических кулоновских сил.
               Электрические силы, связывая разноименные заряды в плазме, обеспечивают ее квазинейтральность, т. е. приблизительное равенство концентраций электронов и ионов. Всякое разделение зарядов, обусловленное смещением группы электронов относительно ионов, должно приводить к возникновению электрических полей, стремящихся скомпенсировать созданное возмущение. Поля растут с увеличением концентрации частиц и в случае плотной плазмы могут достигнуть очень больших значений. Для того чтобы оценить напряженность полей, возникающих при нарушении нейтральности плазмы, предположим, что в некотором объеме произошло полное разделение зарядов и внутри этого объема остались заряды только одного знака. Приведем пример. Пусть полностью ионизованная плазма получена из водорода, находившегося первоначально при нормальной температуре и давлении в 1 мм рт. ст. В каждом кубическом сантиметре такой плазмы будет примерно по 7\*1011 ионов и электронов. В этом случае E ~ 1010 в/см. Поэтому, если резкое нарушение квазинейтральности происходит в объеме с диаметром порядка 1 мм, то электрические поля превзойдут 109 в/см и в пределах этого объема возникнет разность потенциалов порядка 108 в. Ясно, что подобное разделение зарядов совершенно нереально. Даже в гораздо более разреженной плазме резкое нарушение квазинейтральности в объемах указанной величины будет немедленно ликвидироваться возникающими электрическими полями. Поле будет выталкивать из объема, где произошла декомпенсация зарядов, частицы одного знака и втягивать в эту область частицы противоположного знака. Однако, если выделить в плазме достаточно малый объем, то в нем квазинейтральность может и не сохраняться вследствие того, что поле, созданное избытком частиц одного знака, окажется слишком слабым для того, чтобы существенно повлиять на движение частиц.

Задачи

1. Найти эффективную длину свободного пробега электронов вдоль однородного электрического поля с напряженностью 25 кВ/см, необходимую для ионизации молекул азота. Потенциал ионизации молекул азота равен 15,8 В.

2. Определить кинетическую энергию электрона при свободном пробеге расстояния 10 мкм в электрическом поле напряженностью 20 кВ/см. Заряд электрона *е* = 1,6.10-19 Кл

3. Найти величину коэффициента ударной ионизации для азота при давлении 3.105 Па и напряженности электрического поля 30 кВ/см.  = м-1

4. Определить минимальные длины волн электромагнитного излучения, необходимые для ионизации и возбуждения молекул азота. Потенциалы ионизации и возбуждения при этом соответственно равны *U*и = 15,8 В, *U*в = 6,1 В. Постоянная Планка *k* = 6,626.10-34 Дж.с; скорость света *с* = 3.108 м/с; заряд электрона *е* = 1,6.10-19 Кл.