

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

§ 12.1. Электропроводность газов

1. Газы в отличие от металлов и электролитов состоят из электрически нейтральных атомов и молекул и не содержат свободных зарядов (электронов и ионов), способных придать в упорядоченное движение под действием электрического поля. Следовательно, при нормальных условиях газы являются изоляторами. Это подтверждается опытами с заряженными изолированными проводниками в сухом воздухе: их заряд практически не изменяется в течение длительного времени. Газ становится проводником, если часть его молекул ионизируется, т.е. они расщепляются на электроны и положительные ионы. В газе могут возникать и отрицательные ионы вследствие соединения с его нейтральными молекулами части освобожденных электронов.

Атомы и молекулы газа представляют собой устойчивые системы заряженных частиц. Поэтому для ионизации атома (или молекулы) необходимо совершить работу против сил взаимодействия между вырываемым электроном и остальными частицами атома (или молекулы). Эта работа называется **работой ионизации** A_i . Величина работы ионизации зависит от химической природы газа и энергетического состояния вырываемого электрона в атоме или молекуле. Наиболее слабо связаны с ядром внешние (валентные) электроны атома, поэтому для удаления из атома валентного электрона нужно затратить меньшую работу, чем для вырывания любого другого электрона. После удаления из атома одного электрона возрастает прочность связи с ядром остальных электронов. Следовательно, для отщепления от однократно ионизированного атома еще одного электрона нужно совершить работу значительно большую, чем работа отрыва первого электрона. Так, например, работа ионизации атома азота (N) равна 14,5 эВ, его одновалентного иона (N^+) — 29,5 эВ, двухвалентного иона (N^{++}) — 47,4 эВ и т. д.

2. Работу ионизации можно характеризовать с помощью потенциала ионизации. **Потенциалом ионизации** φ_i называется та разность потенциалов, которую должен пройти электрон в ускоряющем электрическом поле для того, чтобы увеличение его энергии было равно работе ионизации. Из формулы (3.14) следует, что

$$\varphi_i = A_i/e.$$

Если A_i выражено в электронвольтах, а φ_i — в вольтах, то φ_i численно равно A_i . Значения потенциалов ионизации для некоторых атомов и молекул приведены в табл. 12.1.

3. Ионизация газа может происходить под влиянием различных внешних воздействий: сильного нагрева газа, рентгеновских лучей, α -, β - и γ -лучей, возникающих при радиоактивном распаде, космических лучей, бомбардировки молекул газа быстро движущимися элек-

Таблица 12.1

Атомы	H	He	O	N	Ne	Cl	Na	Hg	K	Ar
φ_1 , В	13,5	24,5	13,6	14,5	21,5	13,0	5,12	10,4	4,32	15,7
Молекулы	H ₂	O ₂	H ₂ O	N ₂	NO ₂	Cl ₂	CO ₂	CO	HCl	NO
φ_1 , В	15,8	12,5	13,0	15,8	11,0	13,0	14,4	14,1	13,8	9,5

тронами или ионами. Количественной характеристикой процесса ионизации служит **интенсивность ионизации**, измеряемая числом пар противоположных по знаку заряженных частиц, возникающих в единице объема газа за единицу времени.

Так как в обычных условиях газ всегда подвергается действию космических лучей и радиоактивных излучений, то необходимо уточнить высказанное выше утверждение об отсутствии в газах свободных зарядов. Строго говоря, **проводимость газа** никогда не равна нулю: в нем всегда имеются свободные заряды, если только не приняты специальные меры для защиты газа от воздействия всех внешних ионизаторов. Однако интенсивность ионизации под влиянием космических лучей и распада рассеянных в земной коре радиоактивных элементов очень мала. Поэтому проводимость газов в естественных условиях, хотя и не равна нулю, но очень близка к нему. В дальнейшем будет показано, что присутствие в газах даже малого количества свободных электронов и ионов играет существенную роль в возникновении заметной проводимости газов в достаточно сильных электрических полях.

4. Рассмотрим подробнее процесс ионизации газа под действием движущихся электронов или ионов, получивший название **ударной ионизации**. Кинетическая энергия заряженной частицы (электрона или иона), прошедшей в ускоряющем электрическом поле разность потенциалов $\Delta\varphi$, $W_k = q\Delta\varphi$, где q — заряд частицы. В дальнейшем будем считать, что все ионы одновалентны, т.е. $q = e$ и

$$W_k = e\Delta\varphi. \quad (12.1)$$

Если масса частицы m , то ее скорость v равна¹

$$v = \sqrt{2W_k/m} = \sqrt{2e\Delta\varphi/m}. \quad (12.2)$$

Для простоты рассмотрим одноатомный газ. При столкновении частицы с нейтральным атомом газа она передает ему часть своей энергии. Если кинетическая энергия частицы сравнительно мала, то, как показывают опыты, ее соударение с атомом носит характер упругого

¹ Предполагается, что скорость v во много раз меньше скорости света c и поэтому масса m не зависит от v (см. т. I, § 2.3).

удара. Энергия, сообщаемая при этом атому, недостаточна для его ионизации. Поэтому бомбардировка атомов газа частицами, обладающими малой энергией, вызывает лишь нагревание газа.

Совершенно иначе происходят соударения с атомами газа частиц, кинетическая энергия которых достаточно велика. В этом случае, как показывают опыты, соударения становятся неупругими и вызывают возбуждение атомов газа, т.е. перевод атома с нормального энергетического уровня на более высокий, или даже ионизацию атомов. Оценим минимальное значение кинетической энергии, которой должна обладать частица для того, чтобы вызвать ударную ионизацию газа. Скорость теплового движения молекул во много раз меньше скорости ионизирующей частицы. Поэтому можно считать, что до удара атом неподвижен. Из закона сохранения импульса при неупругом ударе (см. т. I, § 2.5) имеем

$$mv = (m + M)u, \quad (12.3)$$

где M — масса атома, u — скорость частицы и атома после удара. При этом приближенно считаем, что скорость электрона, выбитого из атома, тоже равна u . Начальная кинетическая энергия частицы расходуется при ударе на работу ионизации A_i и сообщение частице и атому кинетической энергии, соответствующей их скорости u после удара:

$$\frac{mv^2}{2} = A_i + \frac{(m + M)u^2}{2}.$$

Заменив скорость u ее выражением из (12.3), получим

$$\frac{mv^2}{2} = A_i \frac{m + M}{M} = A_i \left(1 + \frac{m}{M}\right). \quad (12.4)$$

Таким образом, минимальная кинетическая энергия, которой должна обладать частица для осуществления ударной ионизации атома газа, не может быть меньше работы ионизации A_i и будет тем ближе к A_i , чем меньше масса частицы по сравнению с массой атома. Для электрона эта энергия меньше, чем для любого иона. Из формулы (12.2) видно, что в одном и том же ускоряющем электрическом поле электрон и одновалентный ион приобретают одинаковую кинетическую энергию. Поэтому для осуществления ударной ионизации ионы должны пройти в ускоряющем электрическом поле большую разность потенциалов, чем электроны. Работа, необходимая для возбуждения атома, меньше работы ионизации. Следовательно, неупругие соударения частиц с атомами газа возможны и при энергии частиц, меньшей той, которая соответствует формуле (12.4).

Процесс соударения электронов или ионов с молекулами, состоящими из двух и большего числа атомов, качественно подобен рассмотренному нами процессу их соударения с молекулами одноатомных газов. Однако в этом случае следует учитывать, что возбуждение двухатомной и более сложной молекулы может состоять в увеличении не только энергии ее электронов, но и энергии колебаний ядер атомов и энергии вращательного движения молекулы.

5. Одновременно с ионизацией газа в его объеме происходит рекомбинация ионов в нейтральные частицы. Рассмотрим опыт, иллюстрирующий процесс рекомбинации (рис. 12.1). В стеклянный цилиндр *A*, расширяющийся внизу, впаяны электроды *B*, *C* и *D*, соединенные с одинаковыми электроскопами. Электроскопы заряжаются так, чтобы листочки их разошлись на одинаковые углы (рис. 12.1, *a*).

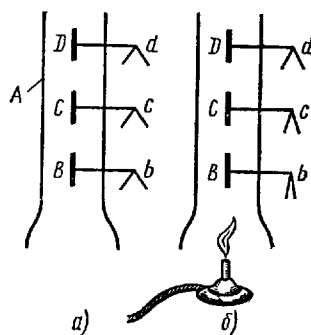


Рис. 12.1

Затем под цилиндр подводится горелка, пламя которой ионизирует воздух. Струя горячего ионизированного воздуха поднимается вверх. Листочки электроскопа *b* спадают, так как он теряет свой заряд (рис. 12.1, *b*); листочки электроскопа *c* показывают лишь небольшое уменьшение заряда, а отклонение листочков электроскопа *d* вообще не изменяется.

Из этого опыта следует, что в течение времени, необходимого для достижения ионами электродов *C* и *D*, происходит постепенное их воссоединение в нейтральные частицы и струя газа, поднимаясь в цилиндре *A*, постепенно теряет свою электропроводность.

§ 12.2. Несамостоятельный газовый разряд

1. Процесс прохождения электрического тока через газ называется **газовым разрядом**. Если электропроводность газа создается внешними ионизаторами, то электрический ток, возникающий в нем, называется **несамостоятельным газовым разрядом**. С прекращением действия внешних ионизаторов несамостоятельный разряд прекращается. Несамостоятельный газовый разряд не сопровождается свечением газа.

2. Для исследования зависимости силы тока I при несамостоятельном газовом разряде от напряжения U между электродами воспользуемся установкой, схема которой изображена на рис. 12.2. Напряжение,

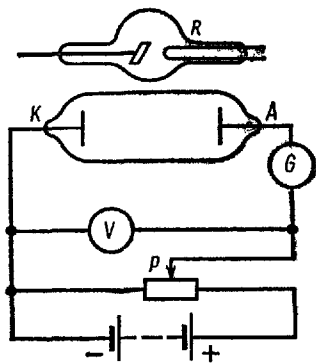


Рис. 12.2

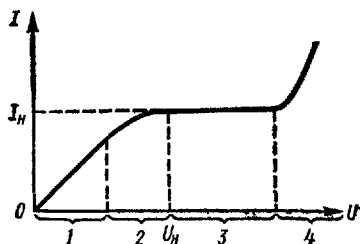


Рис. 12.3