

## ГЛАВА VIII

### ТОК В ГАЗАХ

#### § 44. Ионизация и электропроводность газов

Исторически исследование электрического тока в газах и в вакууме оказалось для развития физики чрезвычайно важным, и вместе с тем оно обогатило технику исключительно ценными применениями. Догадка об атомном строении электричества, возникшая на основе фарадеевых законов электролиза, выросла в уверенность именно благодаря исследованиям электрических явлений в газах. А когда атомное строение электричества было доказано на опыте, то началось быстрое развитие электронной физики.

Подобно току в электролитах, электрический ток в газах обусловлен перемещением ионов в направлении поля. Однако в газах наряду с ионами большую роль в явлениях электрического тока играют также свободные электроны. Глубокое отличие тока в газах от тока в электролитах состоит в том, что *ток в газах, вообще говоря, не сопровождается электролизом*. Это означает, что при ионизации газов не происходит распада молекул на обычные химические ионы. В отличие от растворов ионизация газов не связана непременно с электролитической диссоциацией молекул. Ионизация здесь имеет совершенно иной характер. Опыт показывает, что даже такие газы, как гелий, неон, аргон, молекулы которых состоят всего из одного атома, могут быть ионизированы и в ионизированном состоянии они приобретают электропроводность.

Ионизация газа состоит в *отщеплении электрона от нейтральной молекулы и в присоединении некоторой части свободных электронов к нейтральным молекулам и атомам*. Молекула, от которой оторван один из периферических электронов, становится положительным ионом. В некоторых газах, например в кислороде и сернистом ангидриде, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с нею, превращая ее в электроотрицательный ион. Про такие газы говорят, что молекулы их обладают определенным «средством к электрону». Это означает, что присоединение, «прилипание», электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке электронной оболочки молекулы, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии

нейтральной молекулы на некоторую величину, которую и называют *энергией сродства к электрону*.

Установлено, что при определенных условиях образуются отрицательно заряженные газовые ионы:  $\text{H}^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{J}^-$  и др. Однако число образующихся отрицательных ионов обычно невелико. В инертных газах—в аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне — и в азоте отрицательные ионы не возникают. При разряде в газах значительно большую роль играют положительные газовые ионы. Так, в воздухе образуются положительные ионы  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{NO}^{+1}$ ).

Чтобы отщипить электрон от нейтральной молекулы или атома и превратить их, таким образом, в положительный ион, необходимо затратить определенную энергию, которую называют *энергией ионизации*. Обе величины — энергию ионизации и энергию сродства к электрону — принято измерять той разностью потенциалов  $U$ , проходя которую в электрическом поле электрон приобретает указанную энергию:

$$eU_{\text{ион}} = \mathcal{E}_{\text{ион}}, \quad eU_{\text{срод}} = \mathcal{E}_{\text{срод}}.$$

Эти потенциалы называют *потенциалом ионизации* и *потенциалом сродства к электрону*. Потенциал ионизации обычно составляет несколько вольт. Положительным сродством к электрону обладают немногие вещества.

Значения этих величин для некоторых веществ указаны в приводимых здесь двух таблицах.

Потенциалы ионизации

	$U_{\text{ион}}$ в вольтах		$U_{\text{ион}}$ в вольтах
$\text{H} \rightarrow \text{H}^+$	13,5	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+$	5,1
$\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2^+$	15,4	$\text{K} \rightarrow \text{K}^+$	4,3
$\text{O} \rightarrow \text{O}^+$	13,5	$\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}^+$	10,4
$\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+$	12,5	$\text{CO} \rightarrow \text{CO}^+$	14,1
$\text{N} \rightarrow \text{N}^+$	14,5	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2^+$	14,4
$\text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+$	15,8	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+$	13,2
$\text{He} \rightarrow \text{He}^+$	24,5	$\text{NO} \rightarrow \text{NO}^+$	9,5
$\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}^+$	21,5	$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_3^+$	11,1

1) Считается, что отрицательные ионы воздуха (при концентрации их порядка десятков тысяч в  $1 \text{ см}^3$ ) оказывают благоприятное физиологическое воздействие на здоровье человека. В связи с этим промышленность выпускает специальные комнатные *аэроионизаторы*, в которых производится разряд с отрицательно заряженного острия или используются радиоактивные вещества, излучающие электроны.

Напомним (стр. 38), что работу, производимую зарядом 1 электрона при прохождении разности потенциалов в 1 в, часто принимают в качестве единицы энергии.

Потенциалы сродства к электрону

	$U_{\text{срод}}$ в вольтах		$U_{\text{срод}}$ в вольтах
H $\rightarrow$ H <sup>-</sup>	0,76	J $\rightarrow$ J <sup>-</sup>	3,30
O $\rightarrow$ O <sup>-</sup>	3,80	S $\rightarrow$ S <sup>-</sup>	2,06
F $\rightarrow$ F <sup>-</sup>	4,03	C $\rightarrow$ C <sup>-</sup>	1,37
Cl $\rightarrow$ Cl <sup>-</sup>	3,74	Hg $\rightarrow$ Hg <sup>-</sup>	1,79

Очевидно, что числовые значения ионизационных потенциалов и потенциалов сродства к электрону, приведенные в помещенных выше таблицах, можно рассматривать также как величины энергии ионизации и энергии сродства к электрону, выраженные в электрон-вольтах.

Ионизация газа вызывается разнообразными явлениями, при которых молекулам газа доставляется энергия, необходимая для отщепления электронов. Лучшие ионизаторы газа — рентгеновы лучи и радиоактивные вещества. Интенсивная ионизация газа происходит при «бомбардировке» молекул газа весьма быстро движущимися частицами — корпускулярными лучами. Ионизацию газа вызывают также ультрафиолетовые лучи, некоторые химические реакции и интенсивное нагревание.

Ионизация, вызываемая соударением молекул в их тепловом движении, — термоионизация — становится заметной только при весьма высоких температурах — для нормального давления при температурах порядка 10 000°. Например, как показывают вычисления, водород и азот термически ионизированы на 50% при температурах соответственно 16 000 и 17 000° (в случае давления в одну атмосферу). Та же степень ионизации в 50% достигается у паров железа, меди и серебра при температуре 10 500—11 000° (также в случае давления в одну атмосферу).

Пламя (в связи с химическими процессами в нем) даже при невысокой температуре вызывает существенную ионизацию газа. Это легко обнаружить, внося пламя горелки, или свечи, или даже просто тлеющую лучину в воздушное пространство между обкладками заряженного конденсатора (рис. 152). Проводящая цепь, для которой зазор в конденсаторе являлся местом разрыва, при приближении пламени оказывается замкнутой, и гальванометр, включенный в цепь последовательно с аккумуляторной батареей, показывает наличие тока проводимости.

Посредством аналогичного опыта легко обнаруживается ионизация газа, вызываемая при нормальной температуре и нормальном давлении рентгеновыми лучами, радиоактивным излучением или ультрафиолетовыми лучами. При этом пучок лучей, выделенных посредством диафрагмы, направляют в газовый зазор между обкладками конденсатора, заряженного от высоковольтной батареи, или вообще в газовый зазор между электродами (рис. 153).

Конечно, было бы совершенно неправильно представлять себе ионизацию под действием хотя бы самых сильных ионизаторов в виде

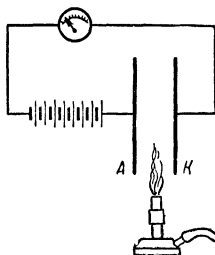


Рис. 152. Опыт, показывающий ионизирующее действие пламени.

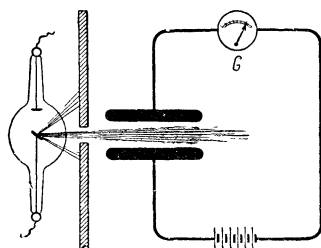


Рис. 153. Опыт, показывающий ионизирующее действие рентгеновых лучей.

бурного процесса, охватывающего сразу все молекулы газа. Процесс отщепления электронов охватывает далеко не все молекулы, а только немногие из них. Сильнейший ионизатор — соль радия, взятая в количестве 1 миллиграмма, в 1 сек. может вызвать в ближайших слоях воздуха на каждые 100 миллионов молекул образование только одного иона.

Следует также иметь в виду, что при ионизации газов, так же как и при электролитической диссоциации растворов, параллельно с процессом ионизации безостановочно протекает процесс *молизации* — воссоединения (*рекомбинации*) ионов и электронов в нейтральные молекулы.

Если удалить ионизатор, то процесс рекомбинации ионов немедленно, в течение долей секунды, уничтожит почти все свободные ионы. Поэтому при нормальных условиях газ проводит электричество только под действием ионизатора и быстро теряет электропроводность, если ионизатор устранен.

При прохождении электрического тока через газ на электродах наблюдаются совершенно иные явления, чем при токе в электролитах. Благодаря малой вязкости газов *подвижность газовых ионов в тысячи раз больше подвижности ионов в электролитах*. Подвижность ионов у большинства двухатомных газов равна  $1 - 2 \frac{\text{см}}{\text{в.сек}}$ . Поэтому при большой напряженности электрического поля в разрядном промежутке газовые ионы приобретают весьма большую скорость

движения. Ударяясь с этой большой скоростью о поверхность электрода, они *выбивают из металла электроны*. Электроны, выбитые из анода, тут же снова улавливаются анодом, тогда как электроны, выбитые из катода, отбрасываются полем катода в глубину разрядного промежутка и увеличивают здесь электропроводность газа. Таким образом, поверхность катода, бомбардируемого положительными ионами газа, становится источником ионизации газа.

Подвижность свободных электронов в газе во много раз больше, чем подвижность газовых ионов. Поэтому электроны под действием поля приобретают особенно большую скорость движения. Ударяясь о встречные молекулы, эти *разогнанные полем электроны ионизируют молекулы газа*.

Пробегаая разность потенциалов в  $U$  вольт, электрон приобретает энергию, равную  $1,6 \cdot 10^{-12} \cdot U$  эргов.

Если электрон проходит разность потенциалов  $U$  без соударения с атомами, то его кинетическая энергия будет равна работе электрических сил, следовательно,

$$\frac{mv^2}{2} = U \text{ эв.}$$

Из этого соотношения, зная массу электрона  $m$  и напряжение  $U$ , пробегаемое электроном (без потери энергии на соударения), легко вычислить приобретаемую электроном скорость:

$$v = \sqrt{\frac{2U}{m}}. \quad (1)$$

Так как электрон в 1840 раз легче атома водорода, то, следовательно,

$$m = \frac{1}{1840 \cdot N_{Ar}} \text{ г.}$$

Учитывая, что  $1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-12}$  эргов, находим:

$$v = \sqrt{2 \cdot 1840 \cdot 6,06 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} U} \text{ см/сек,}$$

или окончательно:

$$v \approx 600 \sqrt{U} \text{ км/сек.}$$

Подставляя в эту формулу величины ионизационных потенциалов, приведенные в помещенной выше таблице, мы видим, что электрон ионизирует газовые молекулы, когда скорость его движения достигает примерно  $2000 \text{ км/сек}$ , т. е. в тысячу раз превышает скорость артиллерийского снаряда дальнобойного орудия.

Приведенная ниже таблица, рассчитанная по формуле (1), показывает, какие огромные скорости приобретает электрон, пробежав (без потери энергии на соударения) сравнительно небольшие разности потенциалов  $U$ .

Разность потенциалов $U$ в вольтах	1	25	100	1000	10 000	63 000
Скорость электрона $v$ в км/сек .	600	3000	6000	19 000	60 000	150 000
Скорость электрона $v$ в долях скорости света . . . . .	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$

Для весьма больших разностей потенциалов, когда скорость электронов становится близкой к скорости света, в приведенный нами расчет должна быть введена поправка на зависимость массы электрона от скорости (§ 77). Если ввести эту поправку, то обнаруживается, что ни при какой разности потенциалов скорость электрона не может стать равной скорости света.

Казалось бы, что, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, также должны вызывать ионизацию газа. Но в действительности *при относительно небольших энергиях* порядка десятков электрон-вольт (и даже при энергиях в сотни и тысячи электрон-вольт) *соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа*. Это существенное различие бомбардировки частиц газа электронами и положительными ионами (при указанных энергиях) объясняется совокупностью ряда причин и в особенности тем, что отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если представлять себе дело так, что положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударения с периферическим электроном нейтральной частицы, то в этом случае условия для отщепления электрона становятся особенно неблагоприятными: в связи с большим различием масс энергия, отдаваемая электрону при упругом ударе, мала. Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц; такие соударения являются, собственно, элементарным актом химической реакции.

Положение в корне меняется при очень *больших энергиях* бомбардирующих частиц (порядка миллионов электрон-вольт, т.е. энергий, характерных для явлений радиоактивности). В этом случае ионы оказываются более эффективными ионизаторами газа, чем электроны.

Однако и в явлениях разряда положительные ионы высвобождают электроны, но не из частиц газа, а *из металла*; бомбардируя поверхность катода, они, как уже упоминалось, вырывают из катода электроны.

Существует еще один важный вид ионизации газа. Когда электрон или ион, разогнанный действием электрического поля, сталкивается с молекулой, он, не ионизируя ее, может привести ее в «возбужденное состояние» — вызвать некоторое изменение в движении электронов, связанных с молекулой, вибрацию атомных ядер и вообще «поднять молекулу на более высокий энергетический уровень». В следующий момент эта «возбужденная» молекула отдает свою избыточную энергию в форме излучения — испускает фотон. Фотон поглощается какой-либо другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Такая внутренняя *фотонная ионизация* газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особо быстрому развитию в разрядном промежутке каналов повышенной электропроводности газа.

### § 45. Типы и механизм разряда в газах

Если через какой-либо газ пропускать ток, постепенно меняя вольтаж, то легко заметить, что первоначально при повышении вольтаж то увеличивается, но потом, достигнув предельной величины, приобретает постоянное значение (*ток насыщения*) (рис. 154).

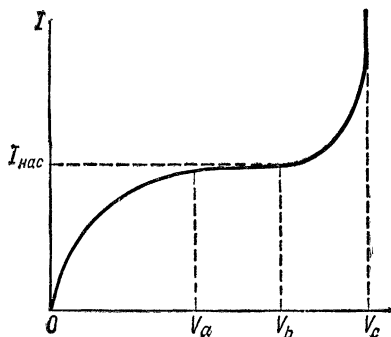


Рис. 154. Зависимость тока в газах от разности потенциалов. В пределах от  $V_a$  до  $V_b$  наблюдается ток насыщения, при  $V_c$  наступает пробой.

Если степень ионизации газа велика, а вольтаж незначителен, то *величина тока будет возрастать* приблизительно пропорционально скорости передвижения свободных ионов к электродам, т.е. пропорционально *произведению подвижности ионов на напряженность поля*. В этом случае удельная электропроводность газа определяется формулой (5), выведенной в § 39. Величина тока пропорциональна числу ионов, достигающих электродов за 1 сек.

При повышении вольтаж в связи с ростом скорости движения ионов число ионов, достигающих электродов за 1 сек., а стало быть, и величина тока возрастают. Но это возрастание может продолжаться только до тех пор, пока число новообразующихся ионов восполняет их убыль. Очевидно, что когда число ионов, достигающих электродов за 1 сек., делается равным числу ионов, образующихся за то же время в газоразрядном промежутке, то дальнейшее возрастание тока окажется невозможным и новое повышение вольтаж уже не изменит этого «тока насыщения». Понятно также, что ток насыщения будет тем больше, чем сильнее ионизирован газ действием ионизатора.