

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В ГАЗАХ

\* \*

## § 109. Ионизация и рекомбинация

1. Газы в нормальном состоянии, в том числе и пары металлов, состоят из *электрически нейтральных* атомов и молекул и по этой причине не проводят электричества. Проводниками электричества могут быть только *ионизованные* газы. Помимо нейтральных молекул и атомов в них содержатся электроны, положительные и отрицательные ионы. Ионы в газах могут возникать под действием высоких температур, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, лучей радиоактивных элементов, космических лучей, в результате столкновений атомов газа с электронами и другими быстрыми элементарными и атомными частицами и т. д. Во всех этих случаях происходит вырывание из электронной оболочки атома или молекулы одного или нескольких электронов. Этот процесс называется *ионизацией*. Он приводит к освобождению электронов и образованию положительных ионов. Освободившиеся электроны могут присоединяться к нейтральным молекулам и атомам, превращая их в отрицательные ионы. Ионы и свободные электроны делают газ проводником электричества. Впрочем, и в нормальных условиях газы, например воздух, обладают электрической проводимостью, хотя и весьма ничтожной. Эта проводимость вызвана излучением радиоактивных веществ, имеющих на поверхности Земли, а также космическими лучами, приходящими на Землю из мирового пространства. Электрическая проводимость воздуха была обнаружена еще Кулоном (1785). Наблюдая потери электричества с изолированных проводников, он пришел к заключению, что часть электричества теряется не через изоляторы, а прямо в воздух. Это заключение с особой убедительностью было подтверждено Бойсом (1889). Подвесив золотые листочки электроскопов к двум цилиндрам из кварца, из которых один был коротким и толстым, а другой — длинным и тонким, он наблюдал, что в обоих случаях потеря электричества была одинакова. Это было бы не так, если бы электричество уходило с листочков только через кварцевые цилиндры. Систематическое изучение электрических токов и разрядов в газах было начато лишь в конце 19 века. Была установлена природа газовых разрядов в различных условиях. Однако, ввиду сложно-

сти этих явлений, точной количественной теории их не существует до настоящего времени.

Ионизация газа, возникающая в результате вырывания электронов из молекул и атомов самого газа, называется *объемной ионизацией*, так как источники ионов здесь распределены в объеме, занимаемом газом. Помимо объемной ионизации существует *поверхностная ионизация*. При такой ионизации ионы или электроны поступают в газ со стенок сосуда, в котором он заключен, или с поверхности тел, вносимых в газ. Например, источниками электронов могут служить раскаленные тела (*термоэлектронная эмиссия*)

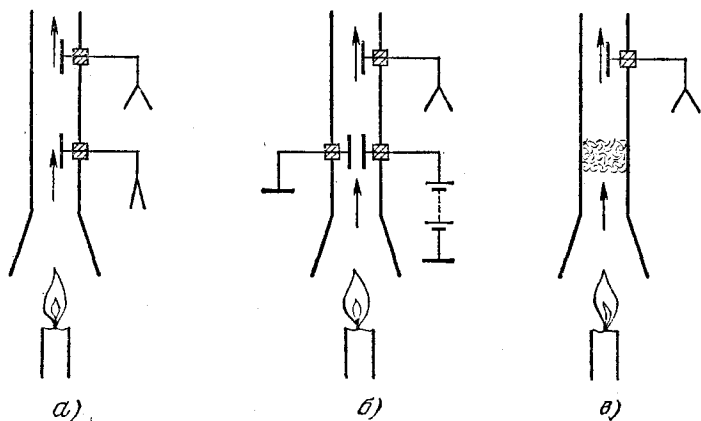


Рис. 270.

или поверхности металлов, освещаемые ультрафиолетовыми и прочими коротковолновыми электромагнитными излучениями (*фотоэлектрический эффект*).

2. После прекращения действия ионизатора положительные и отрицательные ионы газа соединяются между собой с образованием нейтральных молекул и атомов. Этот процесс называется *рекомбинацией*. В результате рекомбинации проводимость газа пропадает или, во всяком случае, возвращается к своему исходному значению. Проводимость спадает не сразу, а постепенно, так как для полной рекомбинации ионов газа требуется конечное время.

Следующий опыт может служить демонстрацией этого явления, а также явления ионизации газа. Внутри вертикальной металлической трубы на различной высоте укреплены металлические электроды, соединенные с наружными электроскопами проводами, изолированными от стенок трубы (рис. 270, а). Под нижнее отверстие трубы подносят зажженную свечу. В пламени последней образуются положительные и отрицательные ионы, уносимые вверх

горячими газами. Воздух в трубе начинает проводить электричество, и листочки электроскопов спадают. Опыт показывает, что чем выше расположен электрод, тем медленнее спадают листочки соединенного с ним электроскопа. Дело в том, что за время поднятия вверх заметная доля ионов рекомбинирует и проводимость поднявшегося воздуха уменьшается. Поэтому скорость спада листочков электроскопа сверху должна быть меньше, чем снизу.

Процесс спадания проводимости газа после прекращения действия ионизатора можно ускорить путем создания в газе электрического поля. Электрическое поле может практически мгновенно уничтожить повышенную проводимость газа. Изменим постановку предыдущего опыта, поместив в трубе пластины плоского воздушного конденсатора, как указано на рис. 270, б. Если повторить опыт с незаряженным конденсатором, то после зажжения свечи листочки электроскопа спадают, как и раньше. Если же предварительно зарядить конденсатор, то после зажжения свечи спадания листочков не наблюдается. Ионы, поднимающиеся вверх вместе с потоком нагретого воздуха, увлекаются электрическим полем к пластинам конденсатора и выбывают из потока. Поэтому воздух после прохождения между пластинами конденсатора перестает проводить электричество, чем и объясняется результат опыта.

Проводимость ионизованного воздуха в предыдущих опытах можно также уничтожить, пропустив струю восходящего воздуха через слой ваты, как указано на рис. 270, в. При прохождении через вату происходит нейтрализация ионов.

3. Допустим, что источник создает в единицу времени в единице объема газа  $q$  пар ионов разных знаков. Допустим, далее, что в газе нет электрического тока и можно пренебречь уходом ионов из-за диффузии. Тогда единственным процессом потери ионов в газе останется рекомбинация. Обозначим через  $n$  число пар ионов разных знаков в единице объема газа. Рекомбинация происходит при встрече положительного иона с отрицательным. Число таких встреч пропорционально как числу положительных, так и числу отрицательных ионов, т. е.  $n^2$ . Поэтому убыль числа пар ионов в единицу времени в единице объема газа пропорциональна  $n^2$  и может быть записана в виде  $\alpha n^2$ , где  $\alpha$  — постоянная, называемая *коэффициентом рекомбинации* ионов разных знаков. При справедливости введенных допущений уравнение баланса ионов в газе запишется в виде

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2. \quad (109.1)$$

В стационарном состоянии  $dn/dt = 0$ ,

$$n = \sqrt{q/\alpha}. \quad (109.2)$$

После выключения ионизатора

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2,$$

откуда

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \alpha t, \quad (109.3)$$

где  $n_0$  — концентрация пар положительных и отрицательных ионов при  $t = 0$ , т. е. в момент выключения ионизатора. Спустя время

$$\tau = \frac{1}{n_0 \alpha} \quad (109.4)$$

концентрация  $n$  убывает в 2 раза. Таким образом, убыль концентрации происходит не в геометрической прогрессии, а более медленно, так как время, в течение которого концентрация уменьшается вдвое, по мере уменьшения последней становится все больше и больше и в пределе при  $n \rightarrow 0$  обращается в бесконечность.

Если включен ионизатор, то надо интегрировать уравнение (109.1). Допустим, что в момент включения ионизатора  $n = 0$ . Отсчитывая время  $t$  от этого момента и учитывая, что  $q - \alpha n^2 > 0$ , получим в результате интегрирования

$$n = \sqrt{q/\alpha} \operatorname{th}(t/\tau), \quad (109.5)$$

где время  $\tau$  получится из (109.4), если подставить  $n_0 = \sqrt{q/\alpha}$ , т. е.  $\tau = \sqrt{1/(q\alpha)}$ .

### ЗАДАЧА

В момент времени  $t = 0$  начинает действовать ионизатор, создающий в единице объема газа  $q$  пар положительных и отрицательных ионов в единицу времени. Предполагая, что  $q = \text{const}$ , найти выражение для концентрации пар ионов во все последующие моменты времени.

О т в е т.

$$n = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \frac{(V\sqrt{q} + n_0\sqrt{\alpha}) - (V\sqrt{q} - n_0\sqrt{\alpha}) e^{-2t/\tau}}{(V\sqrt{q} + n_0\sqrt{\alpha}) + (V\sqrt{q} - n_0\sqrt{\alpha}) e^{-2t/\tau}},$$

где  $\tau = 1/\sqrt{q\alpha}$ . Заметим, что формула верна как при  $n_0 < \sqrt{q/\alpha}$ , так и при  $n_0 > \sqrt{q/\alpha}$ . В последнем случае концентрация убывает, несмотря на то что ионизатор непрерывно поставляет новые ионы.

## § 110. Измерение потенциала ионизации методом электронного удара

1. Чтобы из нейтрального атома или молекулы удалить электрон, требуется затрата энергии. Минимальное значение такой энергии называется *энергией ионизации* атома или молекулы. Энергию ионизации принято выражать в электронвольтах. Разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести энер-