

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 τ 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.

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

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-

гию, равную энергии ионизации, называется *потенциалом ионизации* или *ионизационным потенциалом* атома или молекулы. Очевидно, ионизационный потенциал равен энергии ионизации, деленной на абсолютное значение заряда электрона. Можно говорить об энергии и потенциалах ионизации не только нейтральных атомов и молекул, но и ионов, у которых удаляется еще один электрон.

2. Джеймс Франк (1882—1964) и Густав Герц (р. 1887) в ряде классических работ, начатых в 1913 г., определяли ионизационные потенциалы атомов *методом электронного удара*. Схема их опыта с некоторыми изменениями изображена на рис. 271, а. Исследуемый

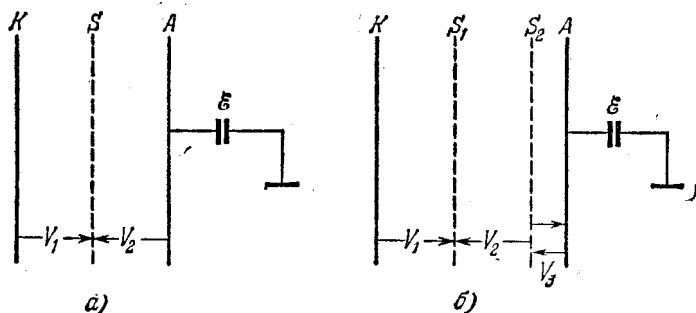


Рис. 271.

газ при давлении 0,01—1 мм рт. ст. вводится в цилиндрический стеклянный сосуд, предварительно откачанный до высокого вакуума (для удаления посторонних газов). Источником электронов служит цилиндрический платиновый катод K , нагреваемый излучением помещенной внутри него вспомогательной спирали. При таком способе нагревания вся поверхность катода находится при одном и том же потенциале. Это было бы не так и вдоль катода возникло бы падение потенциала, если бы нагревание осуществлялось непосредственно пропусканием через катод электрического тока (как было в первоначальных опытах Франка и Герца, в которых источником электронов служила платиновая проволока, нагреваемая электрическим током). Катод окружен цилиндрическими сеткой S и коллектором A , изготовленными также из платины во избежание возникновения контактной разности потенциалов. Коллектор A соединен с чувствительным электрометром \mathcal{E} . Между катодом K и сеткой S прикладывается разность потенциалов V_1 , ускоряющая электроны, а между S и коллектором A — несколько бóльшая (на полвольта или вольт) разность потенциалов V_2 , замедляющая их. Таким образом, потенциал коллектора A оказывается ниже потен-

циала катода K на величину ΔV порядка 0,5 — 1 В. Допустим, что ускоряющая разность потенциалов V_1 меньше потенциала ионизации V_i . Тогда, помимо электронов, в газе не будет никаких заряженных частиц. Но кинетической энергии электронов, ускоренных разностью потенциалов V_1 , недостаточно, чтобы преодолеть задерживающий потенциал V_2 . Коллектор A заряжаться не будет, и электрометр \mathcal{E} не даст отклонения. Повысим разность потенциалов V_1 , чтобы она стала равной потенциалу ионизации. Тогда в газе начнутся такие столкновения электронов с атомами, в результате которых образуются положительные и отрицательные ионы. Отрицательные ионы на коллектор A не попадут, так как этому препятствует задерживающий потенциал V_2 . Для положительных ионов тот же потенциал способствует их попаданию на коллектор. В результате коллектор A начнет заряжаться положительно, что и укажет соединенный с ним электрометр \mathcal{E} . Франк и Герц думали, что разность потенциалов V_1 между сеткой S и катодом K в этот момент и будет равна ионизационному потенциалу V_i . На самом деле это не так. Франк и Герц начали свои опыты в то время, когда Бор разрабатывал свою теорию атома. Однако в то время эта теория Франком и Герцем не была принята во внимание.

Бор указал на возможность другого механизма попадания ионов на коллектор A . Атом может находиться в определенных стационарных состояниях, характеризующихся уровнями энергии $\mathcal{E}_0, \mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots$. Если разность потенциалов V_1 достаточна для возбуждения атома, хотя и меньше потенциала ионизации V_i , то в атомах начнутся квантовые переходы с нормального уровня \mathcal{E}_0 на вышележащие уровни $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots$. При обратных переходах на нормальный уровень атомы излучают свет, частота которого ν определяется соотношением $h\nu = \Delta\mathcal{E}$, где h — постоянная Планка. Если эта частота лежит в ультрафиолетовой области спектра, то может оказаться, что свет начнет вырывать электроны с поверхности коллектора A и сетки S (фотоэффект). Эти электроны под действием задерживающей разности потенциалов V_2 будут отбрасываться от коллектора A , и последний станет заряжаться положительно еще до того, как начнется ионизация газа.

3. Чтобы отделить эффект, вызванный ионизацией атомов, от эффекта их возбуждения, Дэвис и Гухер изменили первоначальную схему опытов Франка и Герца. Между катодом K и коллектором A они поместили две сетки S_1 и S_2 (рис. 271, б). Ускоряющее напряжение V_1 по-прежнему включалось между катодом K и сеткой S_1 , а замедляющее напряжение V_2 — между сетками S_1 и S_2 . (На рис. 271, б стрелки указывают направления, в которых электроны ускоряются.) Между сеткой S_2 и коллектором A создается разность потенциалов V_3 , малая по сравнению с V_2 . Знак этой разности потенциалов можно менять во время опыта. Два возможных направления поля V_3 указаны на рис. 271, б противоположно на-

правленными стрелками. Допустим сначала, что энергия электрона, ускоренного разностью потенциалов V_1 , недостаточна, чтобы ионизовать газ, но достаточна, чтобы вызвать возбуждение атомов и связанное с ним испускание ультрафиолетовых лучей. Последние, падая на сетку S_2 и коллектор A , вырывают с поверхности этих тел медленные электроны. Если электрическое поле между A и S_2 направлено вправо, то эти электроны будут отброшены коллектором A , и на нем останутся положительные заряды. Если же электрическое поле направлено влево, то электроны, вырванные из A , возвратятся обратно, а вырванные из S_2 направятся к A , так что на A образуется отрицательный заряд. Таким образом, при изменении знака разности потенциалов V_3 будет меняться знак заряда электрометра \mathcal{E} . Допустим теперь, что между сетками S_1 и S_2 происходит ионизация частиц газа. Тогда появятся отрицательные и положительные ионы. Отрицательные ионы будут увлекаться электрическим полем V_2 влево, а положительные ионы — вправо.

Пройдя через сетку S_2 , положительные ионы попадут на коллектор A , каков бы ни был знак разности потенциалов V_3 . Действительно, так как разность потенциалов V_3 мала по сравнению с V_2 , она не сможет задержать положительные ионы, когда электрическое поле направлено влево. Когда же электрическое поле направлено вправо, то оно еще больше ускорит положительные ионы и тем самым облегчит попадание их на коллектор. Таким образом, возможно отличить возбуждение частиц газа от их ионизации. Если между первым возбуждением (переходом на первый возбужденный уровень) и ионизацией замечаются еще резкие возрастания электризации, то это указывает на дальнейшие возбуждения, т. е. переходы атома на более высокие энергетические уровни.

4. Существуют и другие способы определения ионизационных потенциалов, например спектроскопический. Об этом последнем способе будет сказано в т. V. В пределах отдельных периодов естественной системы элементов Менделеева наибольшими потенциалами ионизации обладают атомы инертных газов, наименьшими — атомы щелочных металлов. Так, ионизационный потенциал атома гелия равен 24,58 В, неона 21,56 В, лития 5,390 В, натрия 5,138 В. Вот почему пламя особенно эффективно ионизует воздух, когда в него введено небольшое количество поваренной соли. Внутри групп естественной системы Менделеева ионизационный потенциал, как правило, уменьшается с увеличением атомного номера элемента.

При рекомбинации положительного и отрицательного ионов потенциальная энергия уменьшается. Частично она идет на излучение электромагнитных волн. Последнее называется *рекомбинационным излучением*. Рекомбинационное излучение проявляется, например, в виде свечения газа в рекламных трубках.