

4. Через какое время τ после выключения ионизатора число ионов в камере, наполненной воздухом, уменьшается 1) в 2 раза, 2) в 4 раза? Начальная концентрация пар ионов $n_0 = 10^7 \text{ см}^{-3}$.

О т в е т. 1) $\tau = 1/(n_0\alpha) = 0,06 \text{ с}$; 2) $\tau = 3/(n_0\alpha) = 0,18 \text{ с}$.

5. Определить эффективное сечение σ рекомбинации положительного молекулярного иона воздуха с отрицательным при комнатных температурах.

Р е ш е н и е. Массы положительных и отрицательных ионов и их концентрации одинаковы. Поэтому из формулы (86.15) второго тома находим $v = \sqrt{2} n^2 \sigma \bar{v}$, где v — среднее число столкновений положительных ионов с отрицательными в единице объема в единицу времени, сопровождающихся рекомбинацией. В стационарном состоянии это число должно равняться числу вновь образующихся пар ионов в том же объеме за то же время, т. е. $\sqrt{2} n^2 \sigma \bar{v} = q$. Так как $q = \alpha n^2$, то $\sqrt{2} \sigma \bar{v} = \alpha$.

Подставляя сюда $\bar{v} = \sqrt{\frac{8 kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8 RT}{\pi M}}$, где R — универсальная газовая постоянная, M — молекулярный вес воздуха ($M \approx 28,8$), получим

$$\sigma = \frac{\alpha}{4} \sqrt{\frac{\pi M}{RT}} \approx 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2.$$

Соответствующий эффективный диаметр d иона определяется по формуле $\sigma = \pi d^2$ и равен $d \approx 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, т. е. примерно в сто раз больше газокинетических диаметров нейтральных молекул. Это объясняется электростатическим притяжением противоположно заряженных ионов, что ведет к увеличению числа столкновений между ними, а следовательно, и к возрастанию их эффективных диаметров.

6. Решить ту же задачу для рекомбинации положительного иона с электроном.

Р е ш е н и е. Если пренебречь массой электрона по сравнению с массой иона, то из формулы (86.15) второго тома получим $v_{ei} = n^2 \sigma_{ei} \bar{v}_e$, где \bar{v}_e — средняя тепловая скорость электрона. Рассуждая, как в предыдущей задаче, получим

$$\sigma_{ei} = \frac{\alpha_{ei}}{\bar{v}_e} = \frac{\alpha_{ei}}{4} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT}},$$

где α_{ei} — коэффициент рекомбинации электрона с положительным ионом. Величины v_{ei} и σ_{ei} мы также снабдили двумя индексами, чтобы явно отметить, что речь идет о столкновениях электронов с ионами. Так как радиус электрона можно считать бесконечно малым, то $\sigma = \pi r^2$, где r — радиус иона (см. т. II, § 86).

§ 114. Измерение подвижностей ионов

Из разнообразных методов измерения подвижностей газовых ионов опишем два простейших.

1. Метод переменного поля. Этот метод был предложен Резерфордом. В стеклянном сосуде S , наполненном исследуемым газом, имеются два плоских электрода: сплошной B и сетка A (рис. 278). Платиновая проволока C , нагреваемая электрическим током до высокой температуры, создает ионы в пространстве между C и A . Ионы определенного знака увлекаются к сетке A электрическим полем, создаваемым батареей B_2 . Между электродами A и B с помощью трансформатора T создается переменная разность потенциалов $V = V_0 \sin \omega t$ и соответствующее ей электрическое поле $E = \frac{V_0}{l} \sin \omega t$, где l — расстояние между электродами A и B , а ω — круговая частота, с которой изменяется переменное напряжение V . Допустим, что ион, скажем положительный, проходит через сетку A в момент времени $t = 0$, когда электрическое поле E равно нулю. Далее он движется по направлению к электроду B со скоростью $v = bE = \frac{V_0 b}{l} \sin \omega t$, проходя за время t путь $x = \int v dt = \frac{V_0 b}{l \omega} (1 - \cos \omega t)$. Наиболь-

шее расстояние, на которое ион может удалиться от A , будет $x_{\text{макс}} = 2V_0 b' / (e\omega)$. Если это расстояние меньше l , то заряд на электрод B и соединенный с ним электрометр \mathcal{E} не попадет. Повышая амплитуду напряжения V_0 , можно добиться того, чтобы $x_{\text{макс}} = l$. Тогда электрометр начнет давать показания, и подвижность иона b можно вычислить по формуле

$$b = \frac{l^2 \omega}{2V_0} = \frac{\pi l^2}{V_0 T}, \quad (114.1)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ — период колебаний переменного напряжения.

2. Метод Зелени. Внутренний цилиндр цилиндрического конденсатора был разрезан на две части BB' и CC' , изолированные друг от друга (рис. 279). Во внешнем цилиндре AA' имела узкая щель mn , через которую перпендикулярно к оси прибора можно было впускать пучок рентгеновских лучей, ионизовавший газ в области mn , ограниченной на рис. 279 двумя вертикальными пунктирными плоскостями. Внутренний цилиндр CC' был соединен с электрометром, а наружный цилиндр AA' — с одним из полюсов батареи. Другой полюс батареи, электрометр и цилиндр BB' были заземлены. В конденсаторе создавалось радиальное электрическое поле

$$E = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)},$$

где V — напряжение между обкладками конденсатора, r — расстояние от оси прибора, r_1 и r_2 — радиусы внутреннего и наружного цилиндров. Это электрическое поле собирает на цилиндрах BB' и AA' ионы, образованные рентгеновскими лучами. Если цилиндр BB' заряжен отрицательно, то к нему устремятся положительные ионы. Если же цилиндр BB' заряжен положительно, то он соберет отрицательные ионы. Существенно, что ни один ион не попадет на внутренний цилиндр CC' , а следовательно, и на электрометр. Не то будет, если газ между цилиндрами продувается с определенной постоянной скоростью v . В этом случае ионы будут двигаться не только радиально к оси конденсатора, но и параллельно ей. Время, потребное иону для прохождения расстояния от наружного цилиндра до внутреннего, определяется выражением

$$t_1 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{bE} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{Vb} \int_{r_1}^{r_2} r dr = \frac{(r_2^2 - r_1^2) \ln(r_2/r_1)}{2Vb}.$$

Время же, которое требуется иону, чтобы от области ионизации mn дойти до цилиндра CC' , равно $t_2 = l/v$, где l — расстояние от mn до цилиндра CC' . Если уменьшить напряжение V , то в некоторый момент ионы начнут попадать на цилиндр

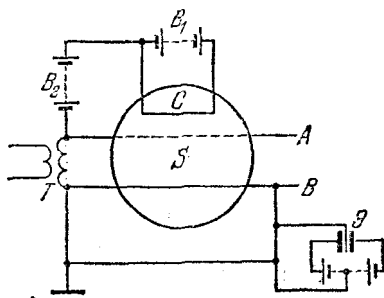


Рис. 278.

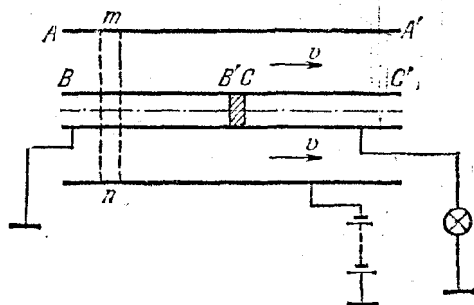


Рис. 279.

CC' и на электрометр. Это произойдет, когда $t_1 = t_2$, т. е. когда

$$b = \frac{v(r_2^2 - r_1^2) \ln(r_2/r_1)}{2Vl}. \quad (114.2)$$

По этой формуле и может быть вычислена подвижность b .

3. В табл. 9 приведены результаты измерений подвижностей различных ионов при давлении 1 атм и температуре 18 °С.

Таблица 9

Значения подвижностей ионов газов

Газ	Подвижность, см ² /(с·В)		$\frac{b^-}{b^+}$
	положительных ионов b^+	отрицательных ионов b^-	
Водород	5,91	8,26	1,4
Кислород	1,29	1,79	1,4
Азот	1,27	1,84	1,4
Аргон	1,37	1,70	1,24
Окись углерода	1,10	1,14	1,04
Хлор	0,65	0,51	0,8
Водяной пар (100 °С)	0,62	0,51	0,78

Как показывает опыт, подвижность ионов в широких пределах обратно пропорциональна давлению \mathcal{P} . Это понятно, так как подвижность пропорциональна длине свободного пробега иона (см. § 42), а последняя в свою очередь обратно пропорциональна давлению \mathcal{P} .

Подвижность положительных ионов не зависит заметно от напряженности поля E . При не слишком больших E подвижность отрицательных ионов также не зависит от E , но при больших E она начинает возрастать с увеличением E . При дальнейшем увеличении E возрастание подвижности замедляется, и, наконец, в еще более сильных полях подвижность снова делается постоянной. Подвижность ионов, в особенности отрицательных, очень сильно зависит от ничтожного количества некоторых примесей. Так, для гелия при давлении 1 атм, содержащего следы кислорода, $b^+ = 5,09$ см²/(с·В), $b^- = 6,31$ см²/(с·В). В совершенно чистом гелии подвижность положительных ионов b^+ остается почти той же, тогда как b^- достигает огромной величины 500 см²/(с·В). Эти факты объясняются тем, что при ионизации газа происходит *вырывание* из атома или молекулы электрона, который вначале и является отрицательным ионом. Остаток же атома или молекулы становится положительным ионом. Поскольку масса электрона очень мала по сравнению с массой атома или молекулы, следовало бы ожидать, что его подвижность должна во много раз превосходить подвижность положительного иона. Однако, как показывает табл. 9, различие между b^- и b^+ не так уж велико. Это объясняется тем, что электрон

очень скоро, столкнувшись с нейтральной частицей, «прилипает» к ней, образуя отрицательный ион, подвижность которого почти равна подвижности положительного иона. В особенности быстро процесс «прилипания» электронов должен происходить в газах, атомы которых обладают большим сродством к электрону. Таковым является, например, кислород, от ничтожных примесей которого вообще трудно избавиться. При рассмотрении влияния всех этих процессов на подвижность ионов необходимо иметь в виду, что измерение дает некоторую среднюю подвижность, которая, конечно, зависит от соотношения между числом быстрых и медленных ионов. Так же объясняется и влияние напряженности поля E на величину подвижности отрицательных ионов. Дело в том, что с увеличением напряженности электрического поля возрастает скорость электрона, вследствие чего уменьшается вероятность прилипания его к нейтральным частицам. Благодаря этому средняя подвижность отрицательного иона возрастает. Для положительного иона это произойти не может, так как он образуется уже в первый момент ионизации и в дальнейшем не меняет свою массу. В этом случае подвижность не должна зависеть от напряженности поля.

§ 115. Теория Таунсенда

1. До сих пор принималась во внимание только ионизация газа внешним ионизатором, но не учитывалась возможность ионизации при столкновениях ионов и электронов с нейтральными атомами и молекулами. Так можно поступать только в случае сравнительно слабых электрических полей, когда кинетическая энергия eEl , накопленная электроном (или ионом) на длине свободного пробега l , меньше энергии ионизации \mathcal{E}_i и, следовательно, при столкновениях с нейтральными частицами электроны лишь изменяют *направление движения* (*упругое рассеяние*). Не так будет в сильных полях, когда $eEl > \mathcal{E}_i$. Тогда столкновения электронов с нейтральными частицами могут сопровождаться ионизацией последних. Ионизация может происходить и тогда, когда $eEl < \mathcal{E}_i$, где \bar{l} — средняя длина свободного пробега электрона. Действительно, среди электронов найдутся и такие, у которых $l > \bar{l}$, так что для них условие $eEl > \mathcal{E}_i$ будет выполняться.

Допустим теперь, что под влиянием внешнего ионизатора или вследствие какой-либо другой причины у катода возник свободный электрон. Ускоренный электрическим полем, электрон ионизует атом при столкновении с ним. Вместо одного электрона становится два. После ускорения в электрическом поле они ионизуют два атома, а число электронов увеличивается до четырех и т. д. В результате по мере продвижения к аноду число электронов будет лавинообразно нарастать. Этот процесс называется *электронной*