

так как отрицательные заряды, появляющиеся у анода, понижают потенциал вблизи этого электрода, а положительные заряды, накапливающиеся у другого электрода, повышают потенциал в окрестности катода. Мы видим, что прохождение тока через ионизованный газ делает падение потенциала вблизи электродов более крутым, а в середине между ними — более пологим. Это означает, что электрическое поле E перестает быть однородным. Оно максимально вблизи электродов и минимально между ними.

Заметим в заключение, что требуется совсем ничтожное нарушение электрической нейтральности газа, чтобы вызвать в нем сильное электрическое поле. Поэтому даже при прохождении электрического тока в газе с высокой степенью точности выполняется равенство концентраций положительных и отрицательных ионов: $n^+ = n^-$. Если это имеет место, то говорят о *квазинейтральности* газа. Квазинейтральный — это такой идеализированный газ, в котором выполнено условие $n^+ = n^-$, хотя и могут существовать какие угодно неоднородные электрические поля. В расчетах пользуются такой идеализацией, несмотря на то что само наличие неоднородности электрического поля невозможно без нарушения равенства $n^+ = n^-$. Положение здесь аналогично тому, что имеет место при рассмотрении упругих деформаций тел. В достаточно твердых телах требуются ничтожные изменения плотности, чтобы возникли большие упругие напряжения. В теории упругости вводят представление об идеально недеформируемых упругих телах, в которых могут возникать сколь угодно большие напряжения, хотя реальной причиной возникновения последних и являются деформации.

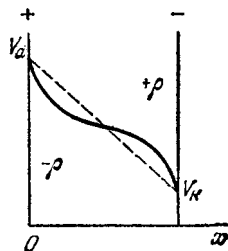


Рис. 276.

§ 113. Измерение коэффициентов рекомбинации

Существует много методов измерения коэффициентов рекомбинации. Опишем три наиболее простых из них.

1. Метод Резерфорда (1897). Этот метод позднее (1900) был усовершенствован Таунсендом. Поток исследуемого газа продувается с постоянной скоростью v через латунную трубу, предварительно пройдя через слой ваты, которой закрыт один из концов трубы (рис. 277). В начальном участке трубы имеется алюминиевое окошко AB , через которое могут проходить рентгеновские лучи. Газ ионизируется рентгеновскими лучами способом, или каким-либо другим. Образующиеся ионы увлекаются струей газа и по пути частично рекомбинируют. На некоторых расстояниях d_1, d_2, d_3, \dots от места ионизации вдоль трубы располагаются тождественные электроды $1, 2, 3, \dots$ Каждый из них поочередно может соединяться с электрометром. При этом все остальные электроды соединяются с трубой, которая в свою очередь соединяется с одним из полюсов батареи, другой полюс которой заземлен. Сначала с электрометром соединяется электрод 1 . Тогда между этим электродом и стенками трубы возникает сильное электрическое поле, увлекающее на электрод 1 все проходящие мимо него ионы одного знака. Если n_1 — концентрация пар

ионов у электрода 1, то на него за время t попадет $n_1 v S t$ ионов, которые передадут ему заряд $Q_1 = n_1 v S e t$, где S — площадь электрода, а e — заряд одного иона. После этого такие же измерения повторяют, соединив с электрометром электрод 2. Пусть в этом случае электрометр измерит заряд $Q_2 = n_2 v S e t$. Тогда на основании формулы (109.3)

$$\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} = \alpha t,$$

где t — время, затрачиваемое потоком газа на прохождение расстояния $d_2 - d_1$. Выражая его через скорость v по формуле $t = (d_2 - d_1)/v$, получим

$$\alpha = \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right) \frac{S v^2 e t}{d_2 - d_1}. \quad (113.1)$$

Скорость v можно определить по расходу газа за определенный промежуток времени. Измерения можно повторить, соединив поочередно с электрометром электроды 2, 3, ... Резерфорд и его сотрудники убедились, что такие независимые измерения приводят к совпадающим результатам. Это может служить доказательством правильности исходных положений, лежащих в основе метода.

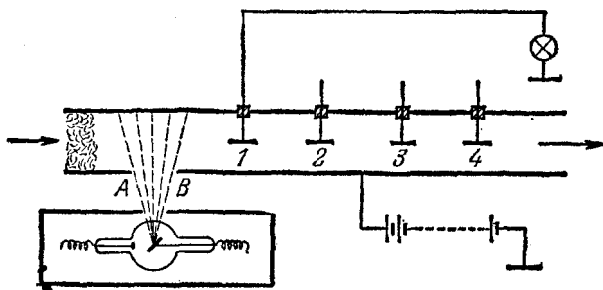


Рис. 277.

2. Метод переключения. Этот метод также был предложен Резерфордом (1897) и позднее усовершенствован Мак-Клюнгом (1902). Исследуемый газ, находящийся между двумя электродами ионизационной камеры, ионизируется рентгеновскими лучами. В определенный момент времени с помощью маятника выключается ток, питающий рентгеновскую трубку, а через некоторое время t после этого тот же маятник замыкает цепь батареи, присоединенной к электродам камеры. В результате между электродами камеры создается сильное электрическое поле, увлекающее на один из электродов ионы определенного знака. Поле выбирается сильным, чтобы при этом ионы в ионизационной камере не успели прорекомбинировать. Пусть Q — заряд, переходящий при этом на электрод камеры, соединенной с электрометром, с помощью которого он может быть измерен. Очевидно, $Q = V n e$, где V — объем камеры. Заряд Q измеряется для двух значений времени t . Обозначим через Q_1 и Q_2 его значения для времени t , равного соответственно τ_1 и τ_2 . Тогда

$$\left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right) V e = \alpha (\tau_2 - \tau_1), \quad (113.2)$$

откуда и можно определить коэффициент рекомбинации α .

3. Метод Мак-Клюнга. Исследуемый газ, помещаемый между пластинами плоского конденсатора, ионизируется рентгеновскими лучами. Пусть q — число пар ионов, создаваемых ионизатором в единице объема камеры в одну

секунду. Для измерения q между обкладками конденсатора накладывается сильное электрическое поле, чтобы возник ток насыщения $\mathcal{I}_s = Vqe$, где V — объем конденсатора. Из этого соотношения и можно найти q . Выключим электрическое поле. Тогда в установившемся состоянии, как следует из формулы (109.1), концентрация пар ионов n будет связана с q соотношением $\alpha n^2 = q$. Полный заряд ионов определенного знака в конденсаторе будет $Q = Vne = Ve\sqrt{q/\alpha}$. Его можно измерить, если в некоторый момент времени выключить ионизатор и тотчас же наложить на конденсатор сильное электрическое поле. Тогда заряд Q соберется на одной из пластин конденсатора и его можно измерить электрометром. После этого коэффициент рекомбинации найдется по формуле

$$\alpha = \frac{V^2 e^2 q}{Q^2} = \frac{Ve}{Q^2} \mathcal{I}_s. \quad (113.3)$$

Значения коэффициента рекомбинации некоторых газов при давлении 1 атм и температуре 18°C приведены в табл. 8.

Таблица 8

Значения коэффициента рекомбинации газов

Газ	$\alpha, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$	Газ	$\alpha, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$
Воздух	1,67	Углекислота	1,67
Кислород	1,61	Окись углерода	0,86
Водород	1,44	Водяные пары (100°C)	0,86

От давления газа коэффициент α зависит слабо, немного уменьшаясь лишь при низких давлениях. С повышением температуры газа величина α уменьшается.

ЗАДАЧИ

1. Между плоскими электродами площадью $S = 100 \text{ см}^2$ каждый, находящимися на расстоянии $l = 5 \text{ см}$ друг от друга, создана ионизация воздуха рентгеновскими лучами и наблюдается ток насыщения $\mathcal{I}_s = 10^{-7} \text{ А}$. Определить число пар ионов q , создаваемых ионизатором в 1 см^3 в течение одной секунды, а также концентрацию этих пар n в установившемся состоянии. Ионы считать однозарядными.

Отв. $q = \frac{\mathcal{I}_s}{Sle} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}; \quad n = \sqrt{q/\alpha} = 2,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}.$

2. В атмосферном воздухе у поверхности Земли из-за радиоактивности почвы и ионизации космическими лучами в среднем образуется $q = 5$ ионов в 1 см^3 в одну секунду. Определить ток насыщения, текущий благодаря этой естественной ионизации в плоском воздушном конденсаторе с площадью каждой обкладки $S = 100 \text{ см}^2$ и расстоянием между обкладками $l = 5 \text{ см}$.

Отв. $\mathcal{I}_s = qSle = 4 \cdot 10^{-16} \text{ А}$.

3. Оценить время разрядки конденсатора в условиях предыдущей задачи, если первоначально он был заряжен до разности потенциалов $V = 300 \text{ В}$. Как будет меняться время разрядки с уменьшением давления воздуха в объеме конденсатора?

Отв. $t \approx \frac{SV}{4\pi l \mathcal{I}_s} \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 15 \text{ сут}$. С уменьшением давления воздуха время разрядки будет увеличиваться. Круксу (1879) удалось сохранить в вакууме заряженный электроскоп в течение нескольких месяцев.

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-