

скорость носителей заряда разных знаков различна, что, как правило, имеет место.

Подсчитаем величину холловской разности потенциалов  $\Delta\phi$  между верхним и нижним срезами проводника для простейшего случая носителей тока одного знака заряда. Обозначим через  $E_x$  электрическое поле, обусловленное холловской разностью потенциалов  $\Delta\phi$ . Обозначая через  $h$  ширину ленты — проводника, имеем

$$\Delta\phi = E_x h. \quad (36.23)$$

Перераспределение зарядов прекратится (а следовательно, установится значение  $\Delta\phi$ ), когда электрическая сила, обусловленная полем  $E_x$ , т. е.  $eE_x$ , будет равна по величине и противоположна по направлению лоренцовой силе  $f_d$ . Имеем, следовательно,

$$eE_x = f_d = keBv$$

или

$$E_x = kBv. \quad (36.24)$$

Вспомним теперь, что плотность тока  $j$  равна

$$j = \frac{I}{S} = nve,$$

где  $S$  — поперечное сечение проводника,  $n$  — плотность носителей тока,  $v$  — дрейфовая скорость. Определяя отсюда  $v$  и подставляя найденное значение в (36.24), получаем

$$E_x = \frac{kIB}{neS} = \frac{k}{ne} jB. \quad (36.25)$$

Это дает в соответствии с (36.23)

$$\Delta\phi = \frac{k}{ne} \frac{I}{S} hB = \frac{k}{ne} jhB. \quad (36.26)$$

Таким образом, холловская э.д.с. пропорциональна плотности тока, ширине проводника и индукции магнитного поля.

Исследования проводимости металлов с помощью эффекта Холла привели к удивительным выводам: металлы, как и полупроводники, могут обладать проводимостью *p*-типа! Это относится к металлам с перекрывающимися зонами (см. § 28), у которых дырочная проводимость может превалировать над электронной. В таких металлах, как цинк и кадмий, дырки в среднем более подвижны, чем электроны.

### § 37. Удельный заряд и масса электрона. Масс-спектроскопия

На заряд  $e$ , помещенный в электрическое поле напряженностью  $E$ , действует сила

$$f_{ed} = eE. \quad (37.1)$$

На тот же заряд, движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле  $H$  (в вакууме) согласно (36.7), действует сила

$$\mathbf{f}_{\text{магн}} = e \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{H} \right]. \quad (37.2)$$

Полная лоренцева сила, действующая на движущийся заряд при одновременном наличии электрического и магнитного полей, равна

$$\mathbf{f} = e \left\{ \mathbf{E} + \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{H} \right] \right\}. \quad (37.3)$$

Под действием этой силы частица с массой  $m$  получает ускорение

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{f}}{m} = \frac{e}{m} \left\{ \mathbf{E} + \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{H} \right] \right\}. \quad (37.4)$$

Уже один вид этого наиболее общего уравнения движения заряженной частицы в полях позволяет сделать очень важный вывод: характер движения и траектория заряженной частицы (при одинаковой начальной скорости  $v_0$ ) зависит не от ее заряда или массы в отдельности, а лишь от отношения  $e/m$ . Величина  $e/m$  носит название **удельного заряда** данной частицы. Чем меньше  $e/m$  (т. е. чем меньше заряд и больше масса частицы), тем меньше ускорение  $w$  и тем меньше изменяется и по величине и по направлению скорость  $v$  частицы в данном поле.

Измеряя скорости и траектории частиц, движущихся в электрических и магнитных полях, можно определить величину и знак их удельного заряда. Таким образом был впервые определен удельный заряд электрона. Если одна из этих величин известна, то по найденному отношению  $e/m$  можно определить и вторую. Приведем одну из схем экспериментального определения  $e/m$ .

На рис. 3.44 изображена схема электронно-лучевой трубы, применяемой в этом опыте. Катод  $K$  накаливается током от специальной батареи до температуры  $T = 1500 - 2000^\circ\text{C}$  и испускает электроны со средней кинетической энергией  $mv_0^2/2$  порядка  $\frac{1}{2}kT$ . Между катодом и анодом прикладывается разность потенциалов  $U$  вольт, ускоряющая электроны. По закону сохранения энергии

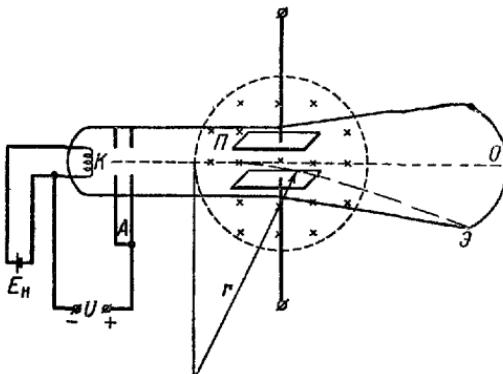


Рис. 3.44

скорость  $v$  электронов, достигающих анода, определяется из соотношения

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = eU \quad (37.5)$$

Множитель 300 в знаменателе правой части этого равенства связан с тем, что  $1 \text{ в} = \frac{1}{300} \text{ СГС ед. напряжения}$ . При  $U \sim 10^3 \div 10^4 \text{ в}$

$\frac{mv_0^2}{2} \ll \frac{eU}{300}$  и с достаточной степенью точности

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{eU}{300}, \quad (37.6)$$

или

$$v = \sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{\frac{U}{150}}. \quad (37.7)$$

Анод  $A$  представляет собой металлический цилиндр с двумя узкими отверстиями на противоположных торцах. Эти отверстия выделяют тонкий пучок «монохроматических», т. е. обладающих практически одинаковыми по величине и направлению скоростями, электронов. Описанная часть прибора носит название электронной пушки или электронного прожектора.

Стеклянная колба электронно-лучевой трубы откачана до высокого вакуума, так что электроны, прошедшие через отверстия в аноде, летят далее равномерно и прямолинейно, почти не испытывая соударений с молекулами воздуха. Дно колбы покрыто изнутри специальным составом, свечящимся при бомбардировке электронами. Электронный луч, падающий на этот экран  $\mathcal{E}$ , создает на нем маленькое светящееся пятнышко.

Поместим электронно-лучевую трубку в магнитное поле  $H$ , созданное соленоидом, перпендикулярным к чертежу. На рис. 3.44 сечение этого соленоида показано пунктиром, а направление линий магнитного поля, идущих за плоскость чертежа, отмечено крестиками. Измеряя ток  $I$  в соленоиде и зная число витков его  $w$ , можно по формуле (33.18) определить величину  $H$ . Электроны ( $e < 0$ ) движутся в плоскости чертежа, т. е.  $v \perp H$ . Действующая на них сила согласно (37.2) равна

$$f_{\text{магн}} = e \frac{v}{\sigma} H \quad (37.8)$$

и отклоняет электронный пучок вниз, как это показано на чертеже пунктиром. Как было показано в примере 1 предыдущего параграфа, величина скорости электрона  $v$  в магнитном поле не меняется, и в случае однородного поля  $H = \text{const}$  электрон будет двигаться

по окружности постоянного радиуса  $r$ , так что согласно (36.14)

$$\frac{v^2}{r} = \frac{e}{m} \frac{vH}{c}. \quad (37.9)$$

Измеряя радиус этой окружности и зная скорость электронов, можно тогда из (37.9) определить величину  $e/m$ . Поскольку из (37.7) величина  $v$  определяется в свою очередь лишь через  $e/m$ , то, комбинируя (37.7) и (37.9), получим

$$\sqrt{\frac{e}{m} \frac{U}{150}} = \frac{e}{m} \frac{rH}{c},$$

откуда окончательно

$$\frac{e}{m} = \frac{U}{150 r^2 H^2}. \quad (37.10)$$

Вместо изменения  $U$  можно к пластинам  $P$  конденсатора, расположенным на взаимном расстоянии  $\delta$  внутри трубы, приложить дополнительную разность потенциалов  $U'$  и создать между ними электрическое поле  $E = \frac{U'}{300\delta}$ , перпендикулярное к линиям магнитного поля и направлению электронного луча. Изменяя  $U'$ , можно добиться того, чтобы сила  $f_{\text{вл}}$ , действующая на электрон, пролетающий в электрическом поле  $E$  между пластинами  $P$ , уравновесила силу действия магнитного поля. Тогда траектория электронов снова станет прямолинейной, о чем можно судить по возвращению электронного луча обратно в точку  $O$  экрана. В этом случае

$$eE = e \frac{v}{c} H. \quad (37.11)$$

Сокращая  $e$  и комбинируя (37.9) с (37.11), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{c^2 E}{r H^2}, \quad (37.12)$$

где  $r$  — радиус траектории электрона в отсутствие дополнительного электрического поля.

В последнем случае можно не измерять  $r$ , а определять точно ускоряющую разность потенциалов  $U$  в электронной пушке. Тогда, комбинируя (37.7) с (37.11), получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{150 c^2 E^2}{U H^2}. \quad (37.13)$$

Тщательные измерения дали для электронов значение

$$\left(\frac{e}{m}\right)_e = -5,28 \cdot 10^{17} \frac{\text{СГС ед. заряда}}{\text{с}}. \quad (37.14)$$

Величина заряда электрона известна из опытов Милликена (см. § 3) и подобных ему и равна  $e_e = -4,803 \cdot 10^{-10}$  СГС ед. заряда.

Следовательно, масса электрона равна

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ г} = \frac{1}{1837} \text{ массы атома водорода.} \quad (37.15)$$

Тщательные измерения  $e/m$  для электронов и ионов позволили открыть много новых свойств микроскопических частиц. Было обнаружено уменьшение  $e/m$ , вызванное возрастанием массы электрона со скоростью, и установлена зависимость массы от скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (37.16)$$

Здесь  $m_0$  — масса покоящегося электрона (при  $v=0$ ), а  $m$  — его масса при движении со скоростью  $v$ . Объяснение зависимости  $m$  от  $v$  было дано Эйнштейном в 1905 г.

В принципе теми же методами определяются массы атомов и молекул. Соответствующие приборы для определения масс атомов и молекул (точнее, их ионов) носят название масс-спектрографов. Необходимые ионы получаются с помощью газового разряда. Далее они ускоряются, и из пучка их с помощью электромагнитного «монохроматора» выделяются ионы одной скорости. Затем ионы отклоняются электрическими и магнитными полями. По величине отклонения определяется удельный заряд  $e/M$ , а отсюда и масса ионов  $M$ .

Первые же измерения масс атомов обнаружили существование изотопов. Пучок ионов одного химического элемента в масс-спектрографе после отклонения в магнитном поле расщепился и дал на фотопластинке несколько линий, соответствующих массам различных изотопов данного элемента, — своеобразный спектр масс. В наши дни точность определения масс атомов с помощью масс-спектрографов (правда, не в граммах, а по отношению к массе эталонного атома) достигает 6—8 значащих цифр.

Масс-спектроскопические методы позволяют проводить количественный анализ нефти, состоящей из молекул различных углеводородов, трудно различимых обычными химическими способами. При большой мощности ионного пучка этот метод позволил разделять изотопы в заметных количествах.

### § 38. Электронно-лучевые приборы. Электронный микроскоп

В настоящее время электронные приборы получили широкое распространение. Это вызвано несколькими причинами — легкостью управления электронным пучком («лучом»), практической безынерционностью пучка (заметим, что согласно (37.7) и (37.14) электрон,