

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНТАКТАХ

* * *

§ 104. Контактная разность потенциалов

1. При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов, называемая *контактной разностью потенциалов*. Это явление было открыто Вольтой в 1797 г. Исследуя различные металлы, Вольта расположил их в следующий ряд: Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd. Он нашел, что если металлы в указанной последовательности привести в контакт друг с другом, то при этом каждый предыдущий металл



Рис. 253.

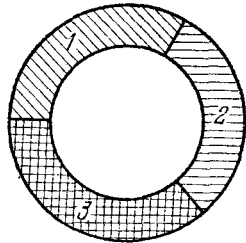


Рис. 254.

получит более высокий потенциал, чем последующий. Далее, Вольта установил, что если несколько металлов 1, 2, ..., n привести в контакт друг с другом (рис. 253), то разность потенциалов $\phi_n - \phi_1$ между крайними металлами не будет зависеть от того, какими промежуточными металлами они разделены. Это положение называется *законом последовательных контактов Вольты*. Для справедливости его необходимо, чтобы все контактирующие металлы находились *при одной и той же температуре*. Если крайние металлы ряда привести в контакт между собой таким образом, чтобы образовалось замкнутое кольцо (рис. 254), то из закона последовательных контактов Вольты следует, что электродвижущая сила в кольце будет равна нулю, и следовательно, никакой электрический ток через цепь не пойдет, если только все металлы имеют одну и ту же температуру. В противном случае мы имели бы дело с нарушением закона сохранения энергии. Таким образом, закон последовательных контактов Вольты может рассматриваться как *следствие закона сохранения энергии*. Это рассуждение неприменимо в тех случаях, когда в цепи есть электролиты и, следовательно, могут происходить

химические реакции, за счет энергии которых и возбуждается электрический ток. Закон последовательных контактов в таких случаях не имеет места. Контактная разность потенциалов в вольтах колеблется для различных пар металлов от нескольких десятых до нескольких единиц. Как и работа выхода электронов, она сильно изменяется даже при ничтожных загрязнениях поверхностей соприкасающихся металлов, их окислении и т. п. Поэтому для получения верных значений контактных разностей потенциалов исследуемые вещества и их поверхности необходимо тщательно очищать, а измерения вести в вакууме.

2. Для объяснения возникновения контактной разности потенциалов будем пользоваться *моделью свободных электронов*. Допустим, что температура металла равна абсолютному нулю. Тогда все уровни энергии вплоть до границы Ферми μ будут заполнены электронами. Величина μ связана с концентрацией электронов проводимости n соотношением (99.6). Приведем два металла 1 и 2 в непосредственный контакт друг с другом (рис. 255). Так как энергии Ферми μ_1 и μ_2 у разных металлов разные, то будут разными и концентрации электронов проводимости n_1 и n_2 . Пусть для определенности $\mu_2 > \mu_1$ и, следовательно, $n_2 > n_1$. В этом случае начнется диффузия электронов,

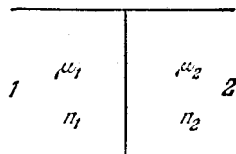


Рис. 255.

в процессе которой электроны будут переходить от металла 2 к металлу 1. Действительно, во втором металле имеются заполненные уровни, расположенные выше уровня Ферми μ_1 первого металла. Электроны с этих уровней могут переходить на соответствующие свободные уровни металла 1, лежащие выше того же уровня μ_1 . Обратный переход электронов из металла 1 в металл 2 невозможен, так как во втором металле все уровни с энергией μ_1 и ниже заполнены электронами. В результате диффузии металл 2 будет заряжаться положительно, а металл 1 — отрицательно. Потенциал металла 2 начнет повышаться, а металла 1 — понижаться. Уровень Ферми у первого металла поднимется, а у второго — опустится. Если потенциалы металлов обозначить через φ_{i1} и φ_{i2} , то энергии Ферми будут соответственно $\mu_1 + e\varphi_{i1}$ и $\mu_2 + e\varphi_{i2}$. На самой границе возникнет *скачок потенциала* или, что то же, электрическое поле, препятствующее процессу диффузии. Когда разность потенциалов $\varphi_{i2} - \varphi_{i1}$ достигнет определенной величины, диффузия прекратится. Это произойдет тогда, когда уровни Ферми обоих металлов сравняются, так как в этом случае в металле 1 уже не останется свободных уровней, на которые могли бы переходить электроны из металла 2, а в металле 2 еще не освободятся уровни, на которые могли бы переходить электроны из металла 1. Итак, в состоянии равновесия

$$\mu_1 + e\varphi_{i1} = \mu_2 + e\varphi_{i2}. \quad (104.1)$$

Отсюда

$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{e}. \quad (104.2)$$

Так как $e < 0$, то при $\mu_2 > \mu_1$ получится $\varphi_{i2} > \varphi_{i1}$, как и должно быть.

При выводе предполагалось, что металл находится при абсолютном нуле температуры. Однако результат (104.2) остается верным и при других температурах. В самом деле, μ , а при наличии электрического поля $\mu + e\varphi$, есть не что иное, как *химический потенциал* электронного газа, отнесенный к одному электрону, а в состоянии равновесия химические потенциалы электронных газов обоих металлов должны быть одинаковы (см. т. II, §§ 82, 83). Нужно лишь иметь в виду, что при $T \neq 0$ химический потенциал μ зависит не только от концентрации электронов, но и от температуры металла.

В формуле (104.2) предполагается, что точка 1 лежит внутри металла 1, а точка 2 — внутри металла 2, что и отмечено индексом i . Поэтому разность потенциалов $\varphi_{i2} - \varphi_{i1}$ называется *внутренней контактной разностью потенциалов*. Из формулы (104.2) непосредственно следует, что внутренняя контактная разность потенциалов удовлетворяет закону последовательных контактов Вольты. Для оценки этой разности выразим с помощью формулы (99.6) энергии Ферми μ_1 и μ_2 через концентрации электронов проводимости n_1 и n_2 . Тогда получим

$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = \frac{h^2}{8me} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} (n_1^{2/3} - n_2^{2/3}). \quad (104.3)$$

После подстановки численных значений получим

$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = -3,66 \cdot 10^{-15} (n_1^{2/3} - n_2^{2/3}) \quad (\text{в вольтах}).$$

Если принять, что на каждый атом металла приходится один электрон проводимости, то для меди, например, $\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = = 3,66 \cdot 10^{-15} n^{2/3} \sim 1$ В. Поэтому внутренняя контактная разность потенциалов, по нашей оценке будет порядка нескольких десятых или сотых долей вольта, а в некоторых случаях и порядка вольта. Понятно, что такая оценка не может считаться точной, поскольку в ее основе лежит модель свободных электронов.

3. Чтобы выйти из металла, электрон, как известно, должен совершить некоторую работу выхода A . Она совершается в тонком поверхностном слое, в котором на электрон действуют силы, стремящиеся втянуть его в металл. Толщина этого поверхностного слоя δ порядка нескольких атомных слоев. Заметив это, рассмотрим два металла, находящиеся в непосредственном контакте между собой вдоль поверхности AB (рис. 256). При наличии такого контакта разность потенциалов между внутренними точками обоих металлов

$\varphi_{i2} - \varphi_{i1}$ имеет вполне определенное значение. Пусть, далее, между теми же металлами имеется зазор CD макроскопической ширины. Возьмем внутри зазора две точки $1'$ и $2'$, находящиеся в непосредственной близости от границ металлов CC' и DD' . Слова «в непосредственной близости» надо понимать в том смысле, что расстояние точки от границы металла больше толщины поверхностного слоя δ , но одинакового с ней порядка. Потенциалы во внешних точках $1'$ и $2'$ обозначим соответственно через φ_{e1} и φ_{e2} . Их разность $\varphi_{e2} - \varphi_{e1}$ называется *внешней контактной разностью потенциалов* между металлами. Ее величину можно связать с работой выхода электрона из металла. Сделаем это в предположении, что металл находится при абсолютном нуле температуры. Тогда на границе CC' будем иметь

$$e\varphi_{e1} - (e\varphi_{i1} + \mu_1) = A_1,$$

а на границе DD'

$$e\varphi_{e2} - (e\varphi_{i2} + \mu_2) = A_2,$$

где A_1 и A_2 — работы выхода на этих границах. Вычитая почленно и воспользовавшись соотношением (104.1), получим

$$\varphi_{e2} - \varphi_{e1} = \frac{1}{e} (A_2 - A_1). \quad (104.4)$$

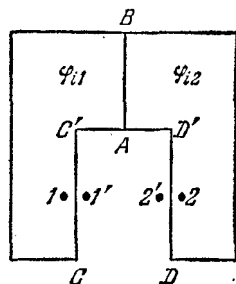


Рис. 256.

Наличие внешней контактной разности потенциалов означает, что в зазоре между CC' и DD' , а также во внешнем пространстве между поверхностями контактирующих металлов существует электрическое поле, а сами поверхности заряжены электричеством.

Внешняя контактная разность потенциалов также подчиняется закону последовательных контактов Вольты. Действительно, образуем замкнутое кольцо из нескольких металлов (см. рис. 254), чтобы между соседними металлами были небольшие зазоры. Электродвижущая сила в таком кольце равна нулю, как это следует из закона сохранения энергии. Но ее можно представить в виде $\sum \Delta\varphi_i + \sum \Delta\varphi_e$, где суммирование ведется по всем контактам. Поскольку выше было доказано, что $\sum \Delta\varphi_i = 0$, то отсюда следует, что и $\sum \Delta\varphi_e = 0$.

4. Вольта доказал существование контактной разности потенциалов с помощью следующего классического опыта. На стержень электроскопа (рис. 257, а) был навинчен медный диск M , покрытый сверху тонким изолирующим слоем шеллака. На него был положен второй такой же цинковый диск N , снабженный изолирующей ручкой A . Образовавшийся конденсатор обладал довольно большой емкостью, так как слой шеллака был чрезвычайно тонок. Диски на короткое время соединялись медной проволокой B . Тогда между

M и N возникала контактная разность потенциалов порядка одного вольта, причем цинк заряжался положительно, а медь — отрицательно. Такая разность потенциалов, однако, слишком мала, чтобы листочки электроскопа заметно разошлись. Для ее обнаружения

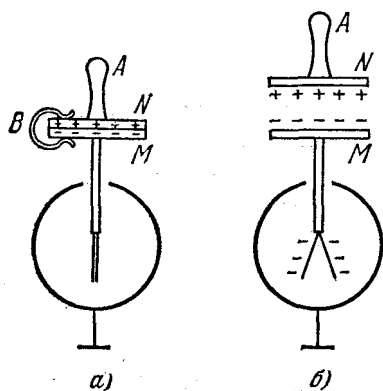


Рис. 257.

удаляют соединяющую проволоку B и за изолирующую ручку A поднимают верхний диск N . Так как при этом заряд конденсатора не изменяется, а емкость уменьшается во много раз, то разность потенциалов увеличивается во столько же раз, и листочки электроскопа заметно расходятся (рис. 257, б).

5. Для измерения внешней контактной разности потенциалов применяется *компенсационный метод*. Пластинки из исследуемых материалов M и N (рис. 258) располагают параллельно на небольшом расстоянии друг от друга. Одна из них закрепляется непод-

вижно, а другую при помощи соответствующего механического устройства заставляют колебаться с частотой в несколько десятков герц и амплитудой порядка долей миллиметра. Поскольку пластинки соединены между собой проводами измерительной схемы, устанавливаются контактная разность потенциалов φ и электрическое поле

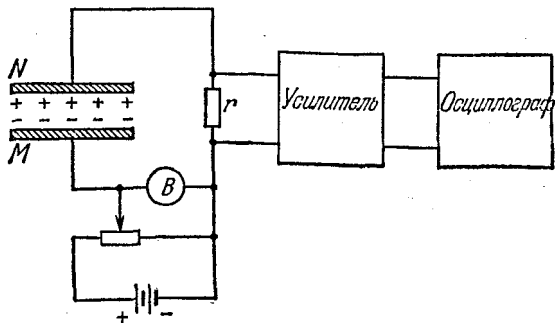


Рис. 258.

между ними. На внутренней поверхности каждой пластинки появляется электрический заряд $q = C\varphi$, где C — емкость между пластинками, в цепи — переменный электрический ток $\dot{q} = \varphi dC/dt$, а на нагрузочном сопротивлении r — переменное напряжение $r\dot{q} = r\varphi dC/dt$. Контактную разность потенциалов φ можно компенсировать напряжением противоположного знака от батареи.

Тогда ток через сопротивление r прекратится. Для констатации этого напряжение с нагрузочного сопротивления, усиленное усилителем, подают на осциллограф. Пока компенсации нет, осциллограф регистрирует колебания напряжения на нагрузочном сопротивлении. Меняя с помощью делителя напряжение от батареи, добиваются того, чтобы колебания прекратились. Тогда вольтметр укажет искомую контактную разность потенциалов.

§ 105. Термоэлектрический ток

1. Согласно закону последовательных контактов Вольты в замкнутой цепи, состоящей из нескольких (например, трех) металлов или полупроводников (см. рис. 254), не происходит возбуждения электрического тока, если все тела цепи находятся *при одной и той же температуре*. Если, однако, температуры в местах контактов разные, то в цепи появляется электрический ток. Этот ток называется *термоэлектрическим*. Само явление возбуждения термоэлектрического тока, а также тесно связанные с ним явления *Пельтье* и *Томсона*, о которых будет сказано ниже, получили собирательное название *термоэлектричества*. Явление термоэлектрического тока было открыто в 1821 г. немецким физиком Зеебеком (1770—1831), который его подробно исследовал, хотя и дал неправильное истолкование существа своего открытия. (Зеебек думал, что под влиянием разности температур в разнородных проводниках, соединенных между собой, происходит выделение свободного магнетизма.)

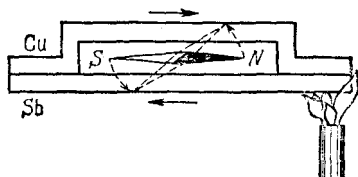


Рис. 259.

Возбуждение термоэлектрического тока можно наблюдать на следующем приборе (рис. 259). К пластинке из сурьмы (Sb) припаяна пластинка из меди (Cu). Между пластинками располагается магнитная стрелка NS . Если один из спаев нагревать, то появляется электрический ток, и магнитная стрелка отклоняется. По направлению отклонения можно судить о направлении электрического тока. Оказывается, что через нагретый спай ток идет от меди к сурьме. Если охладить тот же спай, то направление термоэлектрического тока меняется на противоположное.

Более эффектная демонстрация термоэлектрического тока осуществлена Полем. Толстая U-образная медная дуга перекрыта впаянным в нее в двух местах коротким мостиком 12 из константана (рис. 260, a). Место спая 1 подогревается пламенем газовой горелки через выступающий конец медной дуги. Для предотвращения нагревания спая 2 другой конец той же дуги загнут вниз и опущен в холодную воду. При разности температур между горячим и холодным