

систем с повышением температуры горячего спая термоэдс изменяется не монотонно, сначала возрастает, а затем убывает и даже переходит через нуль (точка инверсии). Кроме того, величина термоэдс (и коэффициента Пельтье) чувствительна к внешним механическим воздействиям, искажающим структуру металла и энергетические уровни электронов.

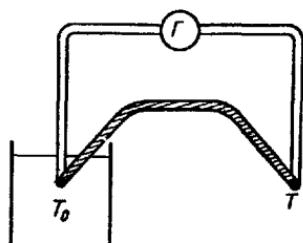


Рис. 240.

Поэтому применяемые в технике и для научных исследований термопары всегда нуждаются в тщательной индивидуальной градуировке.

В электрических схемах и приборах всегда имеются спаи или контакты различных по своему составу и обработке проводников. При колебаниях температуры окружающей среды в этих местах контактов возникают неконтролируемые буждающие термоэдс. Вследствие малости этих термоэдс они обычно неказываются на работе приборов, но при очень точных и тонких измерениях необходимо учитывать и предотвращать возможность подобных влияний.

С другой стороны, термоэдс имеет широкое полезное практическое применение, как простой электрический метод измерения температур. При подобных измерениях с помощью термопар или термоэлементов один из спаев поддерживается при вполне определенной постоянной температуре T_0 (например, помещается в тающий лед) и измеряется идущий в замкнутой цепи термоток

$$I = \frac{\mathcal{E}_{1,2}}{R} = \frac{e_{1,2}}{R} (T - T_0) \quad (22.15)$$

с помощью гальванометра, как это изображено на рис. 2.40. В более грубых технических термопарах один

из спаев имеет просто температуру окружающей среды. Для повышения чувствительности термоэлементов их соединяют последовательно в термобатарею (рис. 2.41). При прецизионных измерениях предпочтительнее измерять не термоток (22.15), а непосредственно термоэдс, компенсируя ее известной электродвижущей силой.

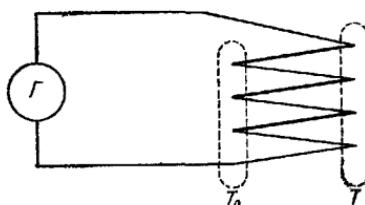


Рис. 241.

§ 23. Термоэлектроинная эмиссия. Электронные лампы

Вследствие хаотичности теплового движения отдельные электроны металла время от времени приобретают избыток кинетической энергии, превышающий работу их выхода eP , и вылетают из металла. Происходит своеобразное «испарение» электронов из ме-

тала в окружающую среду, тем более интенсивное, чем выше его температура.

Когда некоторая часть электронов выходит из металла, он заряжается положительно и втягивает электроны — происходит «конденсация» электронного пара обратно в металл. В результате этих двух противоположных процессов устанавливается определенная концентрация электронного пара над металлом, ничтожно малая при обычных температурах и резко возрастающая при повышении температуры. Испускание электронов нагретыми металлами носит название термоэлектронной эмиссии.

Для исследования явления термоэлектронной эмиссии составим схему, изображенную на рис. 2.42. В стеклянный баллон впаяны два электрода — катод K и анод A . Катод представляет собой металлическую спираль, нагреваемую протекающим в ней током I_n от вспомогательной цепи накала. Реостат накала R_n позволяет регулировать величину этого тока, измеряемого амперметром A_n , и нагревать катод до различных температур T .

Между катодом и анодом прикладывается значительная разность потенциалов U_a (до 100—200 в). Это напряжение снимается с анодной батареи B через потенциометр и измеряется вольтметром V_a . Передвигая движок \mathcal{D} потенциометра P , можно изменять величину U_a от нуля до максимального значения, определяемого э. д. с. батареи.

Под действием приложенной разности потенциалов U_a электроны, испущенные накаленным катодом, движутся к положительному электроду, аноду и замыкают цепь. Чтобы эти электроны не отклонялись в стороны при столкновениях с газовыми молекулами, баллон L откачивается до вакуума. Ток I_a в анодной цепи измеряется последовательно включенным миллиамперметром mA .

На рис. 2.43 изображена примерная зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a . Приложенное между электродами поле будет перетягивать часть электронов из электронного «облачка» вокруг накаленного катода на второй электрод и нарушить равновесие. Убыль электронов в «облачке» приведет к тому, что скорость «конденсации» электронов станет меньше скорости их испускания катодом, часть «испарившихся» из катода электронов уже не вернется обратно и отсосется электрическим полем к аноду. Чем выше

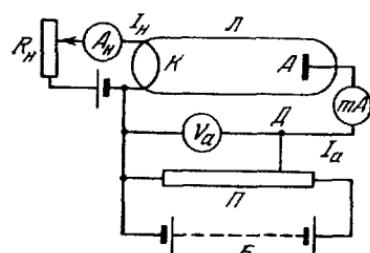


Рис. 2.42.

напряженность электрического поля между электродами, тем большая часть испущенных электронов увлекается полем и направляется к аноду и тем меньшая часть их захватывается катодом.

В слабых полях вследствие наличия значительного объемного заряда электрическое поле вблизи катода сильно искажается. Это приводит к тому, что зависимость анодного тока I_a от приложенной разности потенциалов U_a (вольт-амперная характеристика) имеет даже в слабых полях нелинейный характер. По расчетам Лэнгмюра и Богуславского

I_a на этом участке пропорционально $U_a^{3/2}$ («закон трех вторых»).

При больших разностях потенциалов практически все электроны, «испаряющиеся» с катода, уносятся на анод и ток I_a перестает увеличиваться с ростом U_a . Это максимальное значение I_a носит название тока насыщения $I_{\text{нас}}$.

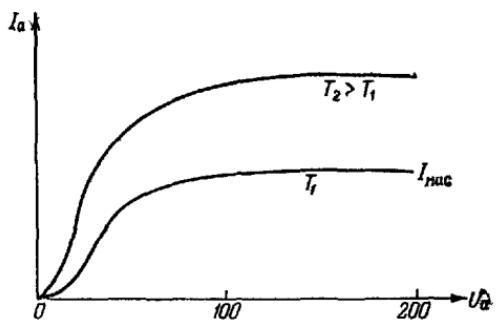


Рис. 2.43.

Если повысить температуру катода от T_1 до $T_2 > T_1$, то испускание электронов усиливается и вся вольт-амперная характеристика пойдет выше (см. рис. 2.43).

Увеличится при этом и ток насыщения $I_{\text{нас}}$. Точный теоретический расчет с учетом волновых свойств электронов в металле приводит к следующей зависимости плотности тока насыщения от температуры:

$$\frac{I_{\text{нас}}}{S} = AT^2 e^{-\frac{eP}{kT}}. \quad (23.1)$$

Здесь S — площадь катода, T — его абсолютная температура, $e=2,7182$ — основание натуральных логарифмов, а в показателе стоит отношение работы выхода электрона из металла eP ^{*)} к средней энергии теплового движения kT . Для чистых металлов теоретическое значение константы равно

$$A = 120 \frac{a}{\text{см}^2 \cdot \text{град}^2}.$$

При $P=3$ в = 0,01 СГС ед. потенциала и при комнатной температуре, $T=300^\circ\text{K}$,

$$\frac{eP}{kT} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \approx 116,$$

$$e^{-116} = 10^{-\frac{116}{2,3}} = 10^{-50,4} = 4 \cdot 10^{-51}.$$

^{*)} Здесь той же буквой e обозначен заряд электрона.

Следовательно, ток насыщения

$$\frac{I_{\text{нас}}}{S} = 120 \cdot 300^2 \cdot 4 \cdot 10^{-51} \approx 4 \cdot 10^{-44} \frac{a}{cm^2},$$

т. е. неизмеримо мал.

Однако с повышением температуры ток насыщения очень круто возрастает. Согласно (23.1) при увеличении температуры на 5°

множитель T^2 возрастает примерно на $2^\circ/\%$, а множитель $e^{\frac{eP}{kT}}$ — почти в 3 раза. Зависимость (23.1), изображенная на рис. 2.44, определяется главным образом экспоненциальным (показательным) множителем, и при температурах порядка 2000° термоэлектронный ток в вакууме достигает вполне измеримых значений.

Для снижения температур накала, при которых термоэлектронный ток достигает заметной величины, необходимо уменьшать величину работы выхода eP в показателе выражения (23.1) или контактный потенциал P . Поскольку последний существенно зависит от состояния поверхности металла (см. § 22), такого снижения можно добиться с помощью добавления незначительных примесей в поверхностный слой металла. Так, покрытие вольфрамовых нитей одномолекулярным слоем тория резко снижает работу выхода и дает возможность получать заметную термоэлектронную эмиссию уже при температурах порядка $1000^\circ C$. Широкое применение имеют так называемые оксидные катоды, поверхность которых состоит из окисей металлов (бария и др.), частично разлагающихся при накале.

Откаченный баллон L с впаянными внутри него двумя электродами K и A , изображенный на рис. 2.42, является простейшим электровакуумным прибором — двухэлектродной электронной лампой, или диодом.

Если в описанном выше опыте изменить направление электрического поля и присоединить накаливаемый электрод K не к минусу, а к плюсу батареи, то поле будет прижимать электронное облако к электроду, электроны будут возвращаться обратно на нить и через безвоздушный промежуток ток идти не будет. На этом принципе основано применение диодов для выпрямления переменного тока. Будучи включенным в электрический контур, диод играет в нем роль клапана, пропускающего ток лишь в одном направлении. Как показано на рис. 2.45, в течение того полупериода, когда на

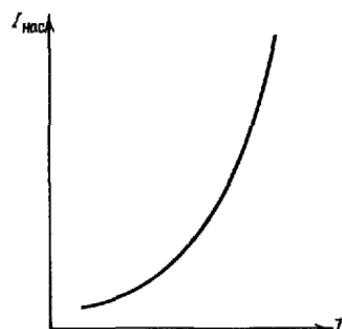


Рис. 2.44.

катоде минус, а на аноде — плюс, электрический ток проходит через лампу. В течение же второго полупериода изменения внешнего напряжения, когда на катоде плюс, а на аноде минус, лампа «заперта», цепь разорвана, и ток в обратном направлении не идет (однополупериодное выпрямление).

Для использования обоих полупериодов переменного напряжения можно применить электронную лампу с двумя впаянными в нее анодами (двойной диод), включив ее по схеме, изображенной на рис. 2.46. Внешний источник переменного тока создает во вторичной обмотке трансформатора T переменную разность потенциалов. Средняя точка трансформатора выводится наружу и является

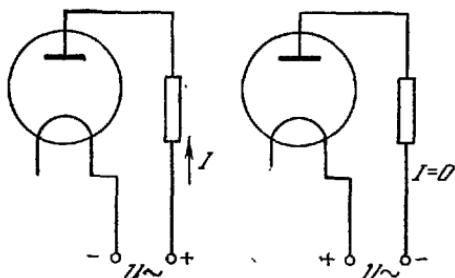


Рис. 2.45.

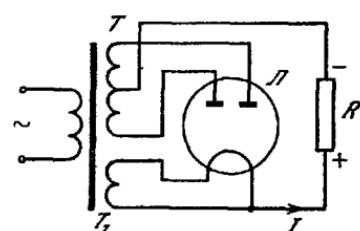


Рис. 2.46.

минусом для цепи выпрямленного тока. Крайние точки трансформатора подаются на аноды лампы L . Для накала катода служит дополнительный трансформатор T_1 . Испускаемые из катода электроны идут к тому из анодов, который в этот момент имеет положительный потенциал, и замыкают цепь соответствующей половины трансформатора T . Так как согласно § 14 направление тока I противоположно направлению движения отрицательных электронов, то вывод, сделанный от катода, всегда является плюсом по отношению к средней точке трансформатора T и через включенное между ними внешнее сопротивление R течет ток постоянного направления от катода к аноду (двухполупериодное выпрямление).

Этот выпрямленный ток не является постоянным в полном смысле этого слова. Он постоянен лишь по направлению, а не по величине. На рис. 2.47, a показан график зависимости тока от времени во внешней цепи без электронной лампы. Переменный ток i обычно меняется по синусоидальному закону:

$$i = i_0 \sin \omega t. \quad (23.2)$$

Выпрямляющий диод срезает отрицательную половину периода и дает импульсы тока (рис. 2.47, b). Двойной же диод по схеме рис. 2.46 изменяет направление тока в отрицательном полупериоде на обратное и создает выпрямленный пульсирующий ток (рис. 2.47, c).

Мощные выпрямительные лампы для выпрямления значительных токов носят название кенотронов. Кенотроны имеют большие габариты и высокую эмиссию электронов. Для уменьшения влияния объемного заряда возле катода приходится между анодом и катодом прикладывать большие разности потенциалов (порядка киловольт).

Другим способом ослабления действия объемного заряда электронов, вылетающих из катода, является заполнение баллона небольшими количествами газа, например ртутными парами. Возникающие при столкновениях с быстрыми электронами положительные ионы газа движутся к катоду и нейтрализуют объемный заряд отрицательных электронов. Такие лампы, называемые газотронами, могут работать как выпрямители при значительно более низких напряжениях, чем кенотроны.

При накале нити катода проходящим через нее током вдоль нити получается заметное падение потенциала, искажающее электрическое поле между катодом и анодом внутри лампы. Поэтому целесообразно накаливать катод не непосредственно, а с помощью специального подогревающего элемента, электрически с ним не контактирующего.

Включение в лампу третьего промежуточного управляющего электрода — «сетки» — делает возможным ее применение для усиления

переменных напряжений. На рис. 2.48 приведена схема трехэлектродной лампы — триода, работающей как усилитель. Разность потенциалов U_a создает внутри лампы электрическое поле. При плоских электродах поле можно считать однородным, а его напряженность — равной

$$E = \frac{U_a}{L}, \quad (23.3)$$

где L — расстояние между катодом и анодом. Если поместить сетку вблизи катода на расстоянии $l \ll L$, то повышение потенциала в месте расположения сетки:

$$U_1 = El = U_a \frac{l}{L} \ll U_a, \quad (23.4)$$

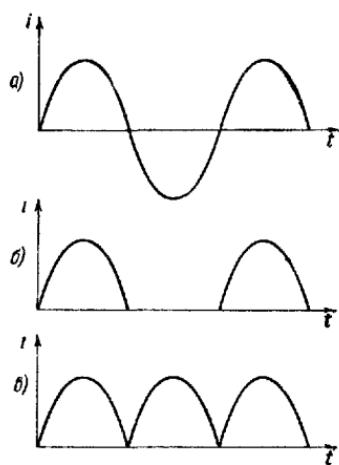


Рис. 2.47.

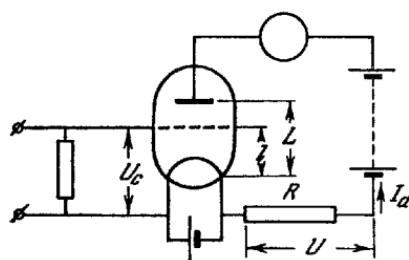


Рис. 2.48.

будет еще незначительным. Прикладывая тогда между катодом и сеткой сравнительно небольшую отрицательную разность потенциалов U_c , можно вернуть часть летящих электронов обратно к катоду и сильно уменьшить анодный ток, а при $|U_c| > U_1$ — даже полностью запереть лампу. Наоборот, при положительном U_c можно сильно увеличить анодный ток.

Если в анодную цепь включено большое сопротивление R , то падение напряжения на этом сопротивлении:

$$U = I_a R, \quad (23.5)$$

изменяется прямо пропорционально анодному току I_a . Таким образом, небольшие изменения потенциала U_c на сетке могут создавать во много раз большие изменения потенциала U в анодной цепи.

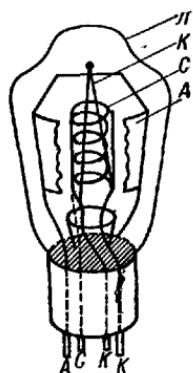


Рис. 2.49.

Чтобы все электроны, испускаемые катодом, попадали на анод, последний делают в виде цилиндра, охватывающего накаленную нить K со всех сторон. На рис. 2.49 приведен схематический разрез через трехэлектродную лампу. Нить, натянутая вдоль оси, является катодом K . Вокруг этой нити с небольшим зазором намотана спираль, служащая сеткой C . Электроны, испускаемые накаливаемой нитью, проходят в зазоры между витками спирали и попадают на цилиндр, служащий анодом. Вся эта система помещается в откаченный баллон L .

Линии поля в такой лампе направлены по радиусам, и поле неоднородно. Однако все качественные закономерности, рассмотренные в настоящем параграфе, включая закон трех вторых, остаются справедливыми и при таком расположении электродов.

В настоящее время электронные лампы от миниатюрных до огромных, на самые различные мощности, широко используются в электро- и радиотехнике, автоматике и телемеханике. В зависимости от назначения лампы в нее может быть впаян ряд дополнительных управляемых электродов.

Выход электронов из металла может происходить не только при его нагревании, но и за счет других воздействий. Так, при освещении поверхности металла электроны могут вырываться за счет энергии падающего света. Основные закономерности такой фотоэлектронной эмиссии будут разобраны в томе III при рассмотрении фотоэлектрического эффекта.

При ударе о поверхность металла электрона, предварительно разогнанного электрическим полем до очень большой скорости, возможна вторичная электронная эмиссия. При этом за

счет энергии ударяющего электрона может быть вырван не один, а несколько электронов. Это явление используется в различных типах электронных умножителей. Принципиальная схема электронного умножителя изображена на рис. 2.50. Электрон, вырванный из первого электрода (например, под действием света),

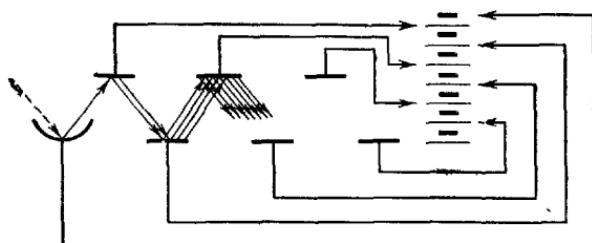


Рис. 2.50.

падает на второй электрод (диод), пройдя ускоряющую разность потенциалов \mathcal{E} . При этом из второго электрода выбиваются δ электронов. Эти электроны падают на третий электрод, пройдя такую же разность потенциалов \mathcal{E} , и выбиваются из него δ^2 электронов и т. д. При $n+1$ электродах число электронов, вылетающих из последнего электрода, в δ^n раз больше числа электронов, вырванных из первого электрода. При $\delta=1,35$ (чистый металл) и $n=20$ полный коэффициент умножения δ^n имеет порядок 400. Для кислородноце-зивых катодов величина δ достигает значений 5—10 и коэффициент умножения δ^n может быть очень большим. Суммарная разность потенциалов $n\mathcal{E}$, приложенная ко всему умножителю, обычно порядка 1000 в.

Если приложить между двумя металлическими пластинами очень большую разность потенциалов, то электрическое поле может вырывать свободные электроны из отрицательно заряженной пластины и затем переносить их к положительной. Подобная холодная (автоэлектронная) э м и с с и я электронов наблюдается лишь в очень высоких полях, напряженностью порядка 10^8 в/см. Для получения столь высоких напряженностей поля катод делают в виде маленького металлического шарика радиуса r (точнее, закругленного острия проволочки с $r \approx 10^{-7}$ м), а анодом служит внутренняя поверхность большой колбы, в центре которой располагается шарик (рис. 2.51). Как было найдено в § 7,

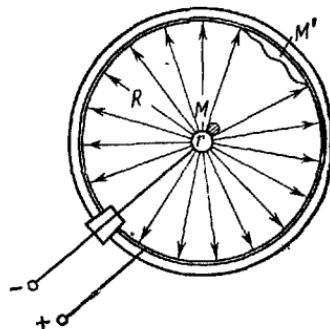


Рис. 2.51.

напряженность поля у поверхности заряженного шарика

$$E = -\frac{k_0 q}{\epsilon_0 r^2} \quad (23.6)$$

и может быть сделана очень большой при достаточно малых r . Это явление используется в электронном микропроекторе. Вырванные электроны ударяются с большой скоростью об анод и при соответствующем подборе материала последнего вызывают его свечение. Если на поверхности катода находится адсорбированная молекула M , то в этом месте автоэлектронная эмиссия затруднена и на аноде наблюдается тень M' от этой молекулы, увеличенная в очень большое число (R/r) раз (R —радиус анода).