

ГЛАВА IX

ТОК ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

§ 50. Термоэлектронная эмиссия. Формула Ричардсона — Дёшмена

Большое число применений имеет ток в высоком вакууме, когда носителями тока являются электроны, испускаемые катодом. Эмиссия (испускание) электронов из металла, как уже указывалось в § 45, может вызываться различными причинами. В вакуум-трубках при возникновении тлеющего разряда и при образовании катодных лучей электроны вышибаются из поверхностного слоя металла ударами положительных ионов. При глубоком вакууме, когда давление разреженного газа составляет миллионные доли миллиметра ртутного столба, число ионов, бомбардирующих катод, становится недостаточным для поддержания заметной эмиссии электронов, вырываемых из катода, и образования ощутимых катодных лучей не наблюдается. Но и при таком глубоком вакууме эмиссия электронов оказывается значительной, если катод накален (*термоэлектронная эмиссия*) или если на катод направлены достаточно интенсивные лучи света (*фотоэлектронная эмиссия*). Эмиссия электронов может быть также вызвана бомбардировкой поверхности некоторых тел потоком электронов (*вторичная электронная эмиссия*).

Кроме того, эмиссия электронов, как это уже указывалось в § 45, может быть вызвана интенсивным электрическим полем (*автоэлектронная*, или *холодная*, эмиссия). Напряженность поля, способного вырывать электроны из металла, имеет порядок величины в несколько миллионов вольт на 1 см. Однако некоторая автоэлектронная эмиссия наблюдается и при относительно небольших напряженностях поля (*эмиссия эффекта просачивания*, или *туннельного эффекта*, § 45).

В различных электронных приборах применяются все виды эмиссии, но чаще всего используется наиболее удобно управляемая термоэлектронная эмиссия.

Выбрасывание электронов накаленным катодом происходит вследствие увеличения энергии движения полусвободных электро-

нов металла за счет притока тепла. При повышении температуры металла электроны незаполненной зоны (§ 35), переходя на высшие энергетические уровни, приобретают энергию, достаточную для преодоления работы выхода (§ 33).

Приложенное к электродам трубки напряжение не оказывает влияния на число электронов, выбрасываемых каждую секунду из вещества катода; при наличии электрического поля вырвавшиеся из вещества катода электроны движутся от катода под действием электрического поля; если же поля нет, они падают обратно, но на их место вылетают другие, и в пространстве над поверхностью накаливаемого металла образуется своеобразное *электронное облако*.

Образование электронного облака над поверхностью накаливаемого металла представляет собой явление, аналогичное испарению жидкости. Чем выше температура металла, тем большее количество электронов покидает поверхность накаливаемого металла. Каждый электрон, покидая металл, должен преодолеть притяжение со стороны положительных ионов металла. Поэтому из «электронного газа», содержащегося внутри металла, вырываются наружу только те электроны, кинетическая энергия которых превосходит «работу выхода».

Электронное облако представляет собой отрицательный заряд, расположенный в пространстве близ поверхности накаливаемого металла. В отличие от обычного поверхностного заряда электронное облако называют *пространственным зарядом*.

С повышением температуры поток электронов, выбрасываемых накаливаемым металлом, растет сперва медленно, а потом все быстрее и быстрее. Ричардсон вывел теоретически формулу, выражающую зависимость интенсивности испускания электронов от температуры испускающего тела. Если накаливаемый металл представляет собой катод вакуумной трубки, к которой приложено такое напряжение,

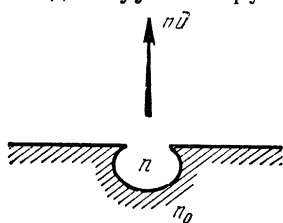


Рис 185

что все испускаемые металлом электроны увлекаются электрическим полем, то интенсивность испускания электронов будет измеряться величиной *тока эмиссии*, приходящегося на каждый квадратный сантиметр накаливаемой поверхности металла. Указанную величину i_s называют также *плотностью тока эмиссии при токе насыщения*. (Если к электродам приложено слишком малое напряжение, то не все

испускаемые металлом электроны увлекаются полем, и плотность тока будет меньше, чем при токе насыщения, т. е. меньше, чем i_s .)

Для пояснения формулы Ричардсона представим себе, что в накаливаемом металле у поверхности его имеется полуоткрытая полость (рис. 185). При статистическом равновесии концентрация n электро-

нов в этой полости согласно e -положению Больцмана (т. I, § 98) будет равна

$$n = n_0 e^{-\frac{A}{kT}},$$

где n_0 — концентрация свободных (или, вернее, полусвободных) электронов в металле, A — работа выхода электрона из металла, равная разности потенциальных энергий электрона в металле и вне металла: $A = e(V - V_0)$; k — постоянная Больцмана и T — абсолютная температура.

Число электронов, ежесекундно вылетающих из отверстия рассмотренной полости, отнесенное к площади отверстия, т. е. плотность тока термоэлектронной эмиссии, является величиной, пропорциональной произведению средней скорости теплового движения электронов в полости (а средняя скорость пропорциональна \sqrt{T}) на концентрацию электронов в полости. Стало быть,

$$i_s = B' \sqrt{T} e^{-\frac{A}{kT}}. \quad (1)$$

Это и есть формула Ричардсона.

Здесь T — абсолютная температура, e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,718$), B' и A — постоянные величины, имеющие различные значения для различных металлов.

Так как константа A стоит в показателе степени, то ее величина оказывает гораздо большее влияние на величину плотности тока эмиссии i_s , чем коэффициент B' ; чем меньше константа A , тем больше (при прочих равных условиях, т. е. при заданных T и B') плотность тока эмиссии.

По смыслу вывода формулы Ричардсона коэффициент B' пропорционален числу электронов в единице объема электронного газа внутри металла. Эмиссионная константа A представляет собой работу выхода электрона.

Опыты показали, что ток эмиссии возрастает с повышением температуры несколько быстрее, чем следует по закону Ричардсона (1). При выводе формулы эмиссии Ричардсон исходил из представления, что скорости движения электронов в металле распределены по закону Максвелла. Однако в действительности (как было пояснено в § 30) электронный газ в металле уже при нормальных температурах находится в вырожденном состоянии и подчиняется статистике Ферми.

Основываясь на квантовой теории, Дёшмен (1923 г.) показал, что формула Ричардсона должна быть заменена следующей формулой:

$$i_s = BT^2 e^{-\frac{A}{kT}}. \quad (2)$$

В этой формуле константа B теоретически должна была бы быть одинаковой для всех металлов и равной

$$\frac{4\pi m e k^2}{h^3} = 120 \frac{a}{\text{см}^2 \text{град}}$$

(здесь m и e — масса и заряд электрона, k — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка). Для некоторых чистых металлов эта константа действительно близка к указанному значению, но для других металлов она имеет величину, в некоторых случаях примерно в два раза меньшую (Ba, Ta, Mo, Pd), в иных случаях — во много раз большую.

Константа A в законе Ричардсона — Дёшмена имеет тот же смысл и ту же величину, что в законе Ричардсона (1), а именно, A представляет собой работу выхода электрона из металла. Теоретически разность работы выхода электрона из двух каких-либо металлов ($A_1 - A_2$) должна быть равной контактной разности потенциалов этих металлов в вакууме, что в общем подтверждается на опыте в тех случаях, когда константы B для этих металлов одинаковы.

Эмиссионные константы

Вещество катода	B , $a/\text{см}^2 \text{град}$	A , электрон- вольт ¹⁾
Молибден	55	4,20
Тантал	60	4,19
Платина		
обезгаженная	32	5,32
необезгаженная	1700	6,3
Цезий	162	1,81
Барий	60	2,11
Уголь	30	4,34
Вольфрам	60	4,53
с мономолекулярной пленкой тория	30	2,63
с мономолекулярной пленкой цезия	3,2	1,36
оксидированный	0,2	1,35
торированный	2,5	2,55

¹⁾ Очевидно, что, пользуясь формулой (2) и применяя значение постоянной Больцмана $k=1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град, надо и работу выхода A выразить в эргах ($1 \text{ эв} = 4,80 \times 10^{-10} \cdot \frac{1}{300} = 1,60 \cdot 10^{-12}$ эрг) или же применять значение

$$k=8,616 \cdot 10^{-5} \text{ эв/град}$$

Если приводимые выше численные значения константы A умножить на число Авогадро, то получившиеся числа будут означать как бы скрытую теплоту испарения «грамм-атома электронов».

На рис. 186 показано, как возрастает с повышением температуры плотность тока эмиссии для вольфрама. При повышении температуры вольфрама от 2000 до 2100°, т. е. всего на 5%, плотность тока эмиссии увеличивается почти вчетверо.

Повышение температуры вольфрама от 2000 до 3000° приводит к увеличению плотности тока термоэлектронной эмиссии в миллионы раз.

Некоторые примеси оказывают чрезвычайно сильное влияние на величину электронной эмиссии. Это влияние примесей было подробно изучено многими учеными и в особенности Ленгмюром (1913—1923 гг.). Вольфрам, покрытый тончайшей пленкой тория, дает испускание электронов, которое при температурах порядка 1000—1500° К в миллионы и миллиарды раз превышает испускание чистого вольфрама. Такое же и еще большее увеличение эмиссии вызывается пленкой цезия, бария и оксидов некоторых металлов. Ток эмиссии в 150 *ма* на 1 *см*² поверхности накаливаемого чистого вольфрама получается при температуре примерно 2300° К; при накаливании «оксидированного» вольфрама та же плотность тока эмиссии получается при температуре примерно 1300° К. Подвергнутый специальной обработке торированный и оксидированный вольфрам имеет широчайшее применение в приборах, основанных на явлении электронной эмиссии.

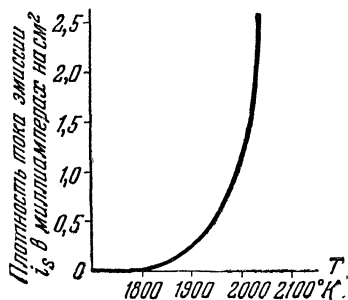


Рис. 186. График закона Ричардсона для вольфрама.

В целях сопоставления накаливаемые катоды характеризуют отношением полного тока эмиссии к мощности, расходуемой на накал катода. Вольфрамовые проволоки при температуре накала 2450°—2500° К дают ток эмиссии в 3—4 *ма* на каждый ватт мощности тока накала. (Повышение температуры накала вольфрамовых нитей свыше 2600° чрезмерно сокращает срок их службы.) Катоды оксидированного вольфрама дают при нормальной для них температуре накала около 1000° К ток в 30—50 *ма/вт*; почти такую же эмиссию дают катоды из торированного вольфрама при нормальной для них температуре накала 1850° К. Однако при высоких напряжениях между анодом и катодом оксидированные и торированные катоды быстрее разрушаются от бомбардировки катода положительными ионами остатков газа.

Для использования термоэлектронной эмиссии применяют катоды двух типов: *прямого накала*, накаляемые непосредственно током от аккумулятора или переменным током низкого напряжения от трансформатора, и *косвенного накала (подогревные)*. В катодах косвенного накала (рис. 187) проволока, накаляемая током, помещена

внутри узкого керамического цилиндра и служит только для нагрева этого цилиндра; термоэлектронная эмиссия осуществляется внешней металлизированной поверхностью цилиндра (цилиндрик катода поверх слоя металла покрыт тонким слоем окиси кальция с прибавкой редких земель).

Термоэлектронная эмиссия получила наиболее широкую область применения в электронных лампах, которые имеют разнообразное радиотехническое назначение и различное устройство, но вместе с тем имеют одну общую черту. А именно, в электронных лампах в отличие от других термоэлектронных приборов так размещают электроды, чтобы создаваемое ими поле, налагаясь на поле пространственного заряда (облака электронов у поверхности накаливаемого катода),

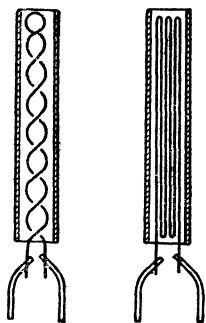


Рис. 187. Катоды косвенного накала (подогревные).

позволяло бы при небольших изменениях напряжения, подводимого к вспомогательным электродам, получать резкие и возможно большие изменения величины термоэлектронного тока, проходящего через лампу. С этой целью аноды и дополнительные сетчатые электроды электронных ламп устраивают обычно в виде коаксиальных цилиндров строго рассчитанных размеров и помещают накаливаемый катод по оси цилиндра. Действие электронных ламп разобрано в §§ 52 и 53.

Об одном из важных применений термоэлектронной эмиссии — об «электронной пушке», служащей для получения электронного луча в катодных осциллографах, — рассказано в § 68. В электронной пушке электроны, испускаемые накаливаемым катодом, получают значительное ускорение в электрическом поле между катодом и кольцевыми анодами. Этот метод ускорения электронного потока применяется во многих электронных приборах и, в частности, в высоковольтных (на миллионы вольт) электронных трубках, предназначенных для атомно-ядерных исследований.

Устройство этих трубок и других мощных ускорительных приборов атомно-ядерной физики, в которых также используется термоэлектронный ток (бетатронов), и методы расчета ускорительных и фокусирующих полей пояснены в разделах физики атома и электронной оптики в третьем томе курса.

§ 51. Торможение электронного потока. Рентгеновые трубки

Среди разнообразных применений электронного потока, испускаемого накаливаемым катодом и ускоряемого действием электрического поля, особое место занимает использование явлений, возникающих при *внезапном торможении* быстро двигавшихся электронов.