

Д8.Б6.01
С547

Сидякин В.Г.
Авганский Ю.М.

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕС-
КОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Сидякин В.Г. Техника физического

В. Г. СИДЯКИН, Ю. М. АЛТАЙСКИЙ

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ИЗДАТЕЛЬСТВО КИЕВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА — 1965

Пособие содержит сведения об электрических и магнитных измерениях, технике работы с вакуумом и других приемах лабораторной практики. В основе практикума лежит многолетний опыт работы лаборатории техники физического эксперимента Киевского ордена Ленина политехнического института.

Рассчитано на студентов инженерно-физических специальностей вузов, а также может быть использовано начинающими научными сотрудниками, инженерами физических и заводских лабораторий, преподавателями физики.

Физика наряду с другими естественными науками изучает объективные свойства материального мира. Процесс научного познания этих свойств, как известно, состоит из трех основных этапов:

- 1) восприятия, т. е. первичного изучения исследуемого явления при помощи наблюдения;
- 2) обобщения, т. е. создания гипотезы (теории);
- 3) проверки истинности гипотезы на опыте (на практике).

Как видно, опыт, эксперимент не являются единственными способами научного исследования, но их роль как критерия истинности решающая.

Проникая все дальше в глубь природы явления, открывая первопричины его, современная экспериментальная физика использует тончайшие методы и сложнейшие приборы, над созданием которых трудятся целые институты. Техника физического эксперимента и лабораторной работы, достигшая в настоящее время высокого уровня, требует от исследователя самого широкого круга знаний по различным вопросам науки и техники и чрезвычайно разнообразных навыков и приемов работы.

Неудивительно, что молодые научные работники, еще не овладевшие навыками, часто оказываются в затруднении, затрачивают непроизводительно силы и время при самостоятельном решении тех или других экспериментальных задач. Еще в худшем положении оказываются молодые инженеры-физики, работающие в заводских лабораториях, удаленных от научных центров. Не получив соответствующей подготовки по технике эксперимента в институтах (подобный курс впервые введен в Киевском политехническом институте в 1955 г.) и не имея возможности часто консультироваться с опытными специалистами, они, затрачивая много времени, экспериментальную задачу решают далеко не простейшим путем.

Цель практикума — дать возможность студентам на материале раздела «Свойства твердого тела» ознакомиться с некоторыми основными положениями техники физического эксперимента в этой области физики. Практикум имеет то преимущество, что он не ставит студента в узкие рамки инструкции, а дает широкие возможности творческой инициативе последнего.

Практикум состоит из двух разделов.

Первый раздел включает некоторые вопросы теории и техники эксперимента и является как бы расширенным вступле-

нием, а также справочной дополнительной литературой к лабораторным заданиям, которые даны во втором разделе. Кроме того, первый раздел содержит сведения, которые могут быть использованы при выполнении описанных лабораторных заданий и окажутся очень полезными при постановке других экспериментальных работ. В практикуме описаны некоторые приемы (кроме общеизвестных), выработанные и оправдавшие себя в лаборатории «Техника физического эксперимента» Киевского ордена Ленина политехнического института.

Второй раздел практикума имеет 11 лабораторных заданий; каждое рассчитано в среднем на 12 учебных часов. При условии, что на данный курс отведено 24—36 (или более) часов, руководитель практикума может выбрать для каждого студента 2—3 лабораторных задания, в которых будет охвачен довольно широкий круг сведений по технике эксперимента. Из приведенных 13 работ не все равноценны по трудности, поэтому практикум с успехом могут проходить студенты 2-го, 4-го и 5-го курсов.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ
ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Глава 1

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ
ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

§ 1. Гигиена физического эксперимента

Большую роль в физическом эксперименте играет чистота его выполнения. Понятие *чистота эксперимента* включает в себе не только точность и корректность опыта, но и чистые руки экспериментатора, хорошо подготовленные инструменты и чистота рабочего места. Современная физика полупроводников знает факты, когда одна стотысячная или даже миллионная доля процента посторонней примеси существенно меняет картину явления при исследовании свойств того или другого полупроводникового материала.

Для получения достаточно точных и правильных результатов необходимо не только неоднократно производить целые серии измерений и выбирать средние значения, но и делать эти измерения последовательно, тщательно и аккуратно (например, при самой несложной работе с аналитическими весами). Результат взвешивания всегда будет зависеть от плотно закрытой дверцы колпака весов, от чистоты гирьки разновеса и т. п. Монтаж любой радиотехнической или электрической схемы должен быть не только правильным (без этого схема вообще не будет работать), но и произведен технически грамотно. Например, при сборке электрической схемы должны быть удобно расположены приборы, ключи, переключатели; провода не должны хаотически переплетаться и мешать доступу к отдельным узлам схемы, концы их должны быть плотно прижаты под клеммы или тщательно подпаяны в местах соединений. При всех работах с кислотами и щелочами необходимо соблюдать особую чистоту, тщательно промывать и просушивать инструменты после каждого употребления. При работе с летучими веществами, вредными для человеческого организма, необходимо строго следить за соблюдением техники безопасности. Все опыты с ними должны проводиться в вытяжном шкафу или в присутствии соответствующих геттеров (поглотителей).

Чистота эксперимента также состоит в том, чтобы изолировать рабочие части приборов и установок от внешних воздействий: солнца, пыли, влаги, магнитных и электрических полей и т. п.

Современный физический эксперимент, осуществляемый на приборах большой чувствительности и высокой точности, не терпит неаккуратности, халатности при его проведении. Опыт требует чрезвычайного внимания на всех этапах.

§ 2. Погрешности измерений физических величин

При измерении физических величин из-за несовершенства приборов, наших органов чувств и методов измерения икогда нельзя найти точного значения измерительных величин, т. е. всегда допускаются погрешности. Все погрешности при измерениях разделяются на систематические, случайные и промахи. Систематические погрешности, возникающие в результате неисправности прибора или упрощенного метода измерений, а также промахи, зависящие от мастерства (точнее говоря, от внимательности) экспериментатора, здесь рассматриваться не будут. Случайные погрешности зависят от недостаточной точности и чувствительности приборов и наших органов чувств; поэтому в дальнейшем будут учитываться только они.

Измерить физическую величину — это значит сравнить ее с другой однородной величиной, принятой за образец, эталон, единицу. Поскольку при множестве измерений одной и той же физической величины получить ее числовое значение с преувеличением или с недостатком равновероятно, за численное значение ее принимается среднее арифметическое числовых значений некоторого определенного (больше двух) количества измерений

$$a_{cp} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}, \quad (1,1)$$

где n — количество измерений.

Чтобы указать пределы, в которых находится истинное значение искомой величины, вводится понятие абсолютной ошибки (погрешности) измерения.

Абсолютной погрешностью отдельного измерения называется абсолютная величина разности между полученным числовым значением этого измерения и средним арифметическим всех полученных измерений

$$\Delta a_i = |a_i - a_{cp}|; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Средней абсолютной погрешностью называется среднее арифметическое из абсолютных погрешностей всех измерений

$$\Delta a_{\text{ср}} = \mp \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_n}{n}. \quad (2,1)$$

Ясно, что численное значение искомой величины a лежит в пределах

$$a_{\text{ср}} + \Delta a_{\text{ср}} > a > a_{\text{ср}} - \Delta a_{\text{ср}},$$

обычно это записывается так:

$$a = a_0 \mp \Delta a_0, \quad (3,1)$$

где $a_0 = a_{\text{ср}}$, $\Delta a_0 = \Delta a_{\text{ср}}$. В случае необходимости более точно указать пределы величины a пользуются средней вероятной погрешностью, которая, согласно теории вероятности, составляет величину, немного меньшую, чем $2/3$ средней абсолютной погрешности.

В случае единичного измерения абсолютная погрешность берется равной половине наименьшей единицы, которой мы пользуемся при измерении. Так, если цена деления шкалы амперметра равна 1 a , то погрешность измерения — 0,5 a .

Для того чтобы указать на качество измерения, вводится понятие относительной погрешности, которая определяется как отношение средней абсолютной погрешности к среднему значению искомой величины

$$\varepsilon = \frac{\Delta a_0}{a_0}. \quad (4,1)$$

Чаще относительную ошибку выражают в процентах

$$\varepsilon = \frac{\Delta a_0}{a_0} \cdot 100 \%. \quad (4,1a)$$

Абсолютные и относительные погрешности постоянных величин (абсолютных constant) равны нулю.

Вышеописанным способом можно найти абсолютную и относительную погрешности любой физической величины, подлежащей непосредственному измерению. Сложнее обстоит дело, если искомая величина отыскивается косвенным путем, путем ряда измерений и дальнейшего математического расчета на основании существующих правил. Например, площадь прямоугольника мы чаще всего находим с помощью линейного измерения его двух сторон с последующим перемножением полученных численных результатов ($a_{\text{см}} \cdot b_{\text{см}} = Q_{\text{см}}^2$), или величину сопротивления часто ищем как частное от деления измеренных величин: напряжения на концах этого проводника и величины протекающего по нему тока $\left(R_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{з}}}{I_{\text{а}}} \right)$.

Не останавливаясь подробно на теории погрешностей, укажем на некоторые ее выводы, которые дадут нам возможность сравнительно легко отыскать абсолютную и относительную погрешность искомой величины в случае косвенных измерений.

Для того чтобы найти абсолютную погрешность искомой величины N , которая является функцией нескольких независимых переменных x, y, z и т. д.

$$N = f(x, y, z, \dots), \quad (5,1)$$

необходимо вычислить полный дифференциал функции

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots, \quad (6,1)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}, \dots$ — частные производные, и заменить все дифференциалы независимых переменных ($dx, dy, dz, \dots$) абсолютными погрешностями измерений ($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$). Чтобы получить максимальную абсолютную погрешность величины N , нужно, кроме того, заменить частные производные $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \dots$ на абсолютную их величину (то есть во всех частях соотношения (6,1) отбросить знак минус, где он встречается). Итак, получим

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (7,1)$$

Максимальная относительная ошибка определяется из соотношения

$$\varepsilon = \frac{\Delta N}{N}, \quad (8,1)$$

причем абсолютная ошибка ΔN вычислена с помощью формулы (7, 1).

Если искомая величина выражена формулой, удобной для логарифмирования, можно относительную погрешность найти проще: прологарифмировав обе части соотношения (5, 1), продифференцируем их. Сделав соответствующую замену дифференциалов на абсолютную погрешность измерения и заменив «—» на «+», где он имеется, получим выражение для относительной погрешности.

Пример. Ускорение силы тяжести из опытов с математическим маятником вычисляется по формуле

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2},$$

где g — ускорение силы тяжести;
 l — длина маятника;
 T — период колебания маятника.

Тогда можно найти относительную погрешность

$$\lg g = \lg 4 + 2 \lg \pi + \lg l - 2 \lg T,$$

$$\frac{dg}{g} = \frac{dl}{l} - \frac{2dT}{T}.$$

Окончательно

$$\varepsilon = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T},$$

где Δl и ΔT — абсолютные погрешности при измерении длины и периода колебания маятника.

Отметим особый случай графической иллюстрации погрешности при вычислении с помощью формулы $y=f(x)$. Пусть Δx — абсолютная ошибка измерения независимой переменной x , тогда с помощью формулы (7, 1) абсолютная ошибка Δy будет равна

$$\Delta y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \Delta x.$$

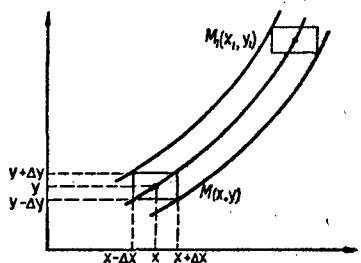


Рис. 1. Полоса погрешностей.

Если вместо точек $M(x, y)$ графика функции $y=f(x)$ наносить прямоугольники со сторонами, соответственно равными $2 \Delta x$ и $2 \Delta y$, и с центром в точках графика функции $y=f(x)$, то кривая (график) заменится полосой, верхний и нижний край которой есть геометрическое место соответствующих углов прямоугольника. В этой полосе (рис. 1) при данной погрешности измерения находятся истинные величины значений $y=f(x)$.

Необходимо обратить внимание на то, что при оформлении результатов измерения экспериментатор должен знать, с какой точностью работают приборы, и не вычислять величины с помощью данной формулы и полученных в результате измерения исходных величин с большей точностью, чем могут дать приборы. Так, измеряя сопротивление методом вольтметра и амперметра классов точности 0,5 и, следовательно, имея относительную ошибку при вычислении величины сопротивления в 1%, нет никакого смысла вычислять сопротивления дальше третьей значащей цифры. Действительно, пусть значение напряжения будет 7 в, следовательно, неточность измерения составит 0,035 в, значение тока 0,064; таким образом, неточность измерения тока составит 0,0003А (ΔI), тогда относительная ошибка изме-

рения сопротивления

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = 0,01 = 1 \% .$$

Понятно, что нецелесообразно в данном случае вычислять сопротивление, скажем, до пятого знака, и запись

$$R = (116,66 \mp 1) \text{ ом}$$

не имеет смысла. Следует писать

$$R = (117 \mp 1) \text{ ом}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Яковлев. Физический практикум. Т. 1. Гостехиздат, М., 1945.
2. А. Н. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях, Гостехиздат М., 1950.
3. Я. С. Безикович. Приближенные вычисления. Гостехиздат, М. 1941.

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 1. Гальванометры

Для измерения малых токов и напряжений обычные микроамперметры, милливольтметры оказываются непригодными. Для измерения таких токов применяются, так называемые, зеркальные гальванометры; в случае переменного тока — вибрационные гальванометры. Для измерения малых зарядов применяют баллистические гальванометры.

Зеркальный гальванометр

Зеркальные гальванометры постоянного тока могут измерять токи порядка $10^{-8} \div 10^{-11}$ а, а напряжения — $10^{-6} \div 10^{-9}$ в. Такая высокая чувствительность объясняется тем, что в поле постоянного магнита подвешена на довольно длинной нити рамка с током (к ней прикреплено зеркальце светового указателя), которая обладает небольшим механическим вращающим моментом; поэтому достаточно весьма малого тока, чтобы отклонить рамку на значительный угол.

Гальванометр М-21 представляет собой прибор, состоящий из цилиндра, который укреплен на массивном основании. Внутри цилиндра подвешена на тонкой нити рамка с зеркальцем; против зеркальца в цилиндре сделано окошко. Луч попадает от внешнего осветителя на зеркальце рамки и оттуда, отражаясь, на шкалу прибора.

Для гальванометров марки Г.З.С. луч от осветителя попадает через линзу, помещенную в окошке гальванометра, непосредственно перед зеркалом его, и оттуда отражается на шкалу прибора. С помощью трех подвижных ножек гальванометр устанавливается горизонтально (у гальванометра М-21 для этого есть уровень). Для поворачивания зеркальца в нужном направлении гальванометры снабжены корректором, который находится наверху цилиндра; для закрепления зеркальца при переноске и хранении гальванометров имеется арретир (у гальванометра Г.З.С. сверху, у М-21 — сбоку). Для измерения ве-

личины критического сопротивления гальванометр М-21 снабжен магнитным шунтом (назначение и принцип действия его описан ниже).

Рассмотрим работу гальванометра. Пусть под действием тока рамка гальванометра повернулась на некоторый угол α (впоследствии α будем отсчитывать в числе делений шкалы), тогда момент действующей силы выразится уравнением

$$M = \frac{d}{dt} m \cdot v \cdot r, \quad (1,2)$$

где m — масса рамки и зеркала;

$v = r \frac{d\alpha}{dt}$ — линейная скорость рамки;

r — радиус центра тяжести половины рамки.

Обозначив $I = mr^2$, получим

$$M = I \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (2,2)$$

где I — момент инерции системы;

$\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ — угловое ускорение.

Этот механический момент M получается в результате уравновешивания магнитного момента, момента самоиндукции, момента сопротивления воздуха и момента упругости подвеса.

Магнитный момент D , как известно, равен

$$D = I\Phi, \quad (3,2)$$

где I — ток, протекающий через рамку;

Φ — магнитный поток постоянного магнита, в поле которого вращается рамка.

Механический противодействующий момент M_1 , вызванный упругостью подвеса, пропорционален углу закручивания нити рамки

$$M_1 = -W\alpha, \quad (4,2)$$

где W — удельный закручивающий момент.

Кроме того, при движении рамки возникает момент успокоения самоиндукции. Он вызывается тем, что при движении рамки в магнитном поле возникает ток, создающий пару сил. Момент этой пары определяется следующим образом. Пусть рамка повернулась на угол α . Тогда изменение магнитного потока определится произведением магнитной индукции на удвоенную площадь S^* , ограниченную дугой угла α и высотой рамки l . следовательно,

$$\Phi = 2S^*B = 2Bl \frac{\alpha}{2} = BS\alpha, \quad (5,2)$$

где l — высота рамки;
 a — ширина рамки;
 S — площадь рамки.

Э. д. с. самоиндукции E выражается

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt} = nBS \frac{da}{dt} = -\Phi \frac{da}{dt}, \quad (6,2)$$

где n — число витков рамки;
 Φ — суммарный магнитный поток.

Для обмотки гальванометра, замкнутой на какое-то внешнее сопротивление R_a , выражение для тока будет иметь вид

$$I' = \frac{E}{R_g + R_a} = \frac{-\Phi}{R_g + R_a} \frac{da}{dt}, \quad (7,2)$$

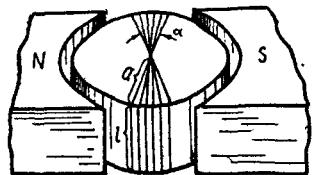


Рис. 2. Схема возникновения момента самоиндукции.

где R_g — сопротивление внутренней обмотки гальванометра. Тогда M'_2 — момент, вызванный самоиндукцией, будет равен

$$M'_2 = \Phi I' = -\frac{\Phi^2}{R_g + R_a} \frac{da}{dt} = P_1 \frac{da}{dt}, \quad (8,2)$$

где $P_1 = \frac{\Phi^2}{R_g + R_a}$ — коэффициент успокоения.

Кроме того, следует учесть успокоение, вызванное сопротивлением воздуха, которое в первом приближении тоже пропорционально угловой скорости,

$$M'_3 = -P_2 \frac{da}{dt}, \quad (9,2)$$

где P_2 — коэффициент вязкости воздуха.

Суммарный момент успокоения, таким образом, равен

$$M_2 = M'_1 + M'_3 = -(P_1 + P_2) \frac{da}{dt} = -P \frac{da}{dt}, \quad (10,2)$$

где $P_1 + P_2 = P$.

P_2 обычно очень мало по сравнению с P_1 и им часто пренебрегают; и лишь в том случае, когда сопротивление цепи гальванометра сравнительно велико (следовательно, P_1 мало), то значение P_2 может быть близко к P_1 .

Теперь можно записать уравнение движения рамки гальванометра

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = D + M_1 + M_2 = \Phi I - W\alpha - P \frac{da}{dt}$$

или

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = \Phi I \quad (11,2)$$

(дифференциальное уравнение движения гальванометра).

Подобное исследование уравнения (11, 2) приводит к тому, что определяется возможность путем подбора сопротивления $R_{кр}$, на которое будет замкнут гальванометр, привести гальванометр в аperiodический (или критический) режим работы. Сущность критического режима заключается в том, что подвижная система гальванометра, а следовательно, и зайчик на измерительной шкале остановятся в соответствующем (проходящему току) положении. К этому положению зайчик подходит плавно (без затухающих колебаний) за время, равное четверти полного периода колебания рамки.

Условие критического режима

$$P_{кр}^2 = 4IW. \quad (12,2)$$

Отношение коэффициента успокоения P при условиях, отличных от критических, к коэффициенту $P_{кр}$ при критическом успокоении называется степенью успокоения, обозначается через β и равно

$$\beta = \frac{P}{P_{кр}} = \frac{P}{2\sqrt{IW}}. \quad (13,2)$$

При $\beta < 1$ — гальванометр работает в периодическом режиме (гальванометр «недоуспокоен»); при $\beta = 1$ наступает критический режим; $\beta > 1$ — аperiodический режим (гальванометр «переуспокоен»).

При исследовании всех режимов наиболее выгодным оказался режим при $\beta = 0,9$ (гальванометр немного «недоуспокоен» — сопротивление немногим больше критического).

Чувствительность гальванометра

Из уравнения (11, 2) можно получить выражение установившегося отклонения стрелки или зайчика светового указателя гальванометра

$$\alpha_i = \frac{\Phi}{W} \cdot I = S_i I, \quad (14,2)$$

где α_i — угол, рад;

W — удельный момент закручивания подвеса;

Φ — полный магнитный поток, мкс;

I — ток в цепи гальванометра в абсолютных электромагнитных единицах.

Величина S_i представляет отклонение светового указателя гальванометра при протекании по нему единицы силы тока в том случае, если расстояние между зеркальцем и шкалой составляет 1 м. Величина S_i носит название чувствительности гальванометра и выражается в мм·м/а.

Чувствительность современных гальванометров по току достигает $10^{11} \div 10^{12}$ мм·м/а.

Величина, обратная чувствительности, называется постоянной по току

$$C_i = \frac{1}{S_i}. \quad (15,2)$$

Она численно равна силе тока, вызывающей отклонение гальванометра на 1 мм шкалы при расстоянии между зеркалом и шкалой в 1 м и измеряется в а/мм·м.

Так как при данном отклонении гальванометра, то есть при протекании по нему тока I , на обмотках гальванометра падает некоторое напряжение, то вводится величина C_U , определяемая соотношением $C_U = R_g C_i$, где R_g — сопротивление гальванометра. C_U измеряется в в/мм·м и называется постоянной гальванометра по напряжению. Численно она равна напряжению, способному дать отклонение светового указателя на одно деление при расстоянии между зеркалом и шкалой, равном 1 м.

Величина, обратная постоянной по напряжению, называется чувствительностью гальванометра по напряжению и определяется равенством

$$S_U = \frac{1}{C_U} = \frac{1}{C_i R_g} = \frac{S_i}{R_g}, \quad (16,2)$$

где S_i — чувствительность по току;

R_g — внутреннее сопротивление гальванометра.

Таким образом, чувствительность по напряжению S_U определяется числом делений шкалы, на которое отклоняется световой указатель при расстоянии между зеркалом и шкалой 1 мм при приложенном напряжении, равном 1 в, и измеряется в мм·м/в.

Вибрационный гальванометр

Если зеркальный гальванометр применяется для измерения постоянного тока и напряжения, то для измерения малых величин переменного тока и напряжения применяются вибрационные гальванометры.

Разберем принципиальное устройство такого гальванометра.

Из теории магнитноэлектрических гальванометров угловая частота колебания рамки определяется выражением

$$\omega = \sqrt{\frac{W}{I}}, \quad (17,2)$$

где W — удельный момент кручения;
 I — момент инерции.

Таким образом, видно, что для повышения частоты необходимо либо увеличить силу механического противодействующего момента, либо уменьшить момент инерции. Последний принцип и положен в основу работы вибрационного гальванометра.

Вибрационный гальванометр представляет собой прибор, в котором рамка, обладающая достаточно малым моментом инерции, успевает колебаться с частотой переменного тока 50 гц. При этом подвес рамки подбирается так, что период колебаний системы совпадает с частотой измеряемого тока, т. е. так, чтобы они были настроены в резонанс.

Характер движения подвесной части гальванометра зависит от ряда факторов, сказывающихся на успокоении прибора. Такими факторами являются:

- 1) успокоение, оказываемое воздухом;
- 2) успокаивающее действие токов Фуко;
- 3) электромагнитное успокоение индукционных токов.

Влияние первых двух факторов сравнительно невелико и проявляется в создании сдвига фаз между собственными колебаниями подвесной части и переменным током. Электромагнитное успокоение очень зависит от сопротивления, на которое замкнут гальванометр.

Если последовательно с гальванометром включить большое сопротивление

$$R \gg R_{\text{внутр}},$$

то электромагнитным сопротивлением ввиду его малой величины можно пренебречь. Такое включение сопротивления обычно применяется для измерения силы тока, так как в этом случае резонанс будет соответствовать наибольшей чувствительности гальванометра к току. При подключении небольших сопротивлений параллельно гальванометру имеет место максимальная чувствительность гальванометра к напряжению.

Каждый гальванометр имеет приспособление для настройки в резонанс.

Пучок света, падающий на шкалу (рис. 3), образует сплошную полосу — сначала узкую и постепенно расширяющуюся с увеличением тока, а потом достигающую максимальной ширины при настройке гальванометра в резонанс. Каждый гальванометр снабжен еще корректором — приспособлением, позволяющим передвигать световую полосу вверх, вправо, влево.

При включении (как и в случае обычных зеркальных гальванометров) необходимо предварительно включить подсветку, а затем уже подвижную часть прибора.

Все данные о параметрах гальванометра (C_i , C_U , $R_{кр}$, диапазон измеряемых частот) обычно бывают указаны на табличке, прикрепленной к корпусу прибора, или в паспорте.

Баллистический гальванометр

Баллистический гальванометр предназначен для измерения быстро протекающих небольших количеств электричества. Мемой измеренного количества электричества является величина первого отброса зайчика гальванометра. При этом необходимо, чтобы прохождение тока в рамке прекратилось прежде, чем подвижная система придет в колебание. Для соблюдения этого условия нужно, чтобы подвижная система обладала достаточно большим моментом инерции, что достигается увеличением момента инерции рамки.

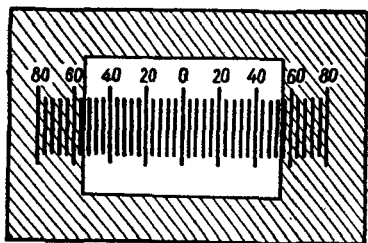


Рис. 3. Шкала вибрационного гальванометра.

В доказательство выдвинутого условия (пропорциональность первого отброса количеству проникшего через гальванометр электричества) рассмотрим процессы, протекающие в гальванометре в течение двух промежутков времени:

Период — прохождение тока, при неподвижной рамке (время τ);

Период — промежуток от начала движения рамки до возвращения ее в исходное положение.

Напишем дифференциальное уравнение движения рамки гальванометра (§ 1)

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = \Phi i, \quad (18,2)$$

где I — мгновенное значение тока. В первый промежуток времени рамка неподвижна, то есть $\alpha=0$; следовательно, уравнение (18,2) принимает вид

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} = \Phi i.$$

Интегрируя уравнение в пределах от 0 до τ , имеем

$$I \frac{d\alpha}{dt} + P\alpha = \Phi_0 \int_0^{\tau} I dt.$$

Так как $\alpha = 0$, $I \frac{d\alpha}{dt} = \Phi \int_0^{\tau} I dt$, но $\int_0^{\tau} I dt = Q$, следовательно,

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\Phi}{I} Q,$$

то есть начальная скорость движения рамки в конце I промежутка времени пропорциональна количеству электричества, протекающему через рамку гальванометра.

Рассмотрим движение во II промежуток времени — с момента $t = \tau$ по старому отсчету и $t = 0$ по новому. Начиная с этого момента, ток в цепи гальванометра отсутствует, и уравнение (18, 2) приобретает вид

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = 0. \quad (19, 2)$$

Заметим, что для баллистического гальванометра остаются в силе условия, а следовательно, и режимы зеркального гальванометра; рассмотрим критический режим работы гальванометра. Для него $P^2 = 4IW$. В этом случае решение уравнения имеет вид

$$\alpha = e^{-at} (C_1 + C_2 t), \quad (20, 2)$$

где a — единственный корень характеристического уравнения, равный $-\frac{P}{2I}$.

При начальных условиях $\alpha \Big|_{t=0} = 0$ и $\frac{d\alpha}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{\Phi}{I} Q$ из (20, 2), получаем

$$C_1 = 0;$$

$$C_2 = \frac{\Phi}{I} Q.$$

Следовательно,

$$\alpha = e^{-at} \frac{\Phi}{I} Qt. \quad (21, 2)$$

Найдем максимальный отброс (приравняв нулю $\frac{d\alpha}{dt}$)

$$\frac{d\alpha}{dt} = -ae^{-at}\frac{\Phi}{I}Qt + e^{-at}\frac{\Phi}{I}Q = 0. \quad (22,2)$$

Получаем $t = \frac{1}{a}$.

Подставляя (22,2) в (21,2), получим

$$\alpha_{\max} = \frac{2\Phi}{eP} Q,$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Обозначим $\frac{2\Phi}{eP} = S_b$. Тогда $\alpha_{\max} = S_b Q$. Величина S_b называется баллистической чувствительностью и определяется как амплитуда первого отклонения гальванометра, измеренная в миллиметрах шкалы, отстоящей от зеркальца гальванометра на расстоянии в 1 м при прохождении через гальванометр единицы количества электричества.

Величина, обратная чувствительности, называется баллистической постоянной; она равна

$$C_b = \frac{1}{S_b}. \quad (23,2)$$

Универсальный шунт

Для удобства работы с гальванометрами последние часто снабжаются универсальными шунтами, назначение которых состоит в изменении снижений чувствительности гальванометра в определенное число раз (обычно в 10, 100, 1000 и т. д.), то есть изменение чувствительности идет на один, два, три и так далее порядка.

На рис. 4 приведен внешний вид шунта. В основе работы шунта лежат такие требования:

1) чувствительность должна быть уменьшена в определенное число раз;

2) сопротивление, на которое замкнут гальванометр, должно оставаться постоянным;

3) общее сопротивление гальванометра и присоединенного к нему шунта должно оставаться постоянным.

Исходя из этих условий, нетрудно провести расчет шунта (рис. 4). Пусть чувствительность гальванометра надо понизить в n раз, то есть, чтобы на гальванометр разветвлялась $\frac{1}{n}$ часть тока $\frac{I}{I_g} = n = \frac{I_g + I_1}{I_g} = 1 + \frac{I_1}{I_g}$. Но напряжение на соединенных параллельно сопротивлениях равно $I_1 R_1 = I_g R_g + I_g R_2$.

Следовательно,

$$\frac{I_g + I_1}{I_g} = 1 + \frac{I_1}{I_g} = n = 1 + \frac{R_g + R_2}{R_1} = \frac{R_1 + R_2 + R_g}{R_1}.$$

Итак, первое условие шунтирования имеет вид

$$\frac{R_1 + R_2 + R_g}{R_1} = n.$$

Второе условие: сопротивление, на которое замкнут гальванометр, как видно из рис. 4, равно

$$R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R + R_3}} = R_2 + \frac{R_1(R + R_3)}{R + R_1 + R_3} = R.$$

Третье условие: полное сопротивление системы шунта должно оставаться равным R_g , то есть

$$\frac{(R_g + R_2) R_1}{R_g + R_2 + R_1} + R_3 = R_g.$$

Рис 4. Принципиальная схема универсального шунта.

Из этих трех условий (решая совместно три уравнения) получаем значения R_1 , R_2 , R_3

$$R_1 = \frac{n(R + R_g)}{n^2 - 1}; \quad R_2 = \frac{Rn - R_g}{n + 1}; \quad R_3 = \frac{R_g n - R}{n + 1}.$$

Описанная принципиальная схема шунтирования носит название схемы Фолькмана. Эта схема точна, но сложна, и, кроме того, следует помнить, что шунт по подобной схеме может быть рассчитан только для определенного R_g и определенного сопротивления внешней цепи R .

На практике чаще применяют более простую принципиальную схему, которую часто называют схемой Айртона. Идея шунта, собранного по такой схеме, проста и легко может быть понята из рис. 5. Монтажная схема такого шунта приведена на рис. 6.

Гальванометр в такой схеме, как видно из рисунка, всегда замкнут на постоянное сопротивление $R_0 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

Нетрудно сообразить, что сопротивление R_0 должно быть близким к критическому $R_0 \gg R_{кр}$, что обеспечивает работу гальванометра в нормальном апериодическом режиме.

Если переключатель шунта стоит в положении 3, как показано на рис. 6, обозначим

$$R_1 + R_2 = R_{ш} \text{ и } R_3 + R_4 = R_d$$

и, пользуясь правилами Кирхгофа, нетрудно подсчитать, что

$$R_{ш} = k(R_0 + r_g),$$

$$R_{д} = R_0(1 - k) - kr_g,$$

где k — степень уменьшения чувствительности.

Из этих уравнений всегда можно рассчитать значения $R_1, \dots, R_4$ при заданном R_0 и k .

Рассчитаем шунт для конкретного гальванометра с $R_{кр} = 6000 \text{ ом}$ на 5 положений, то есть, если рычаг находится в пер-

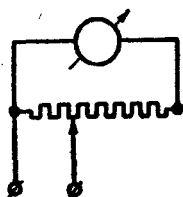


Рис. 5. Принципиальная схема шунта Айртона.

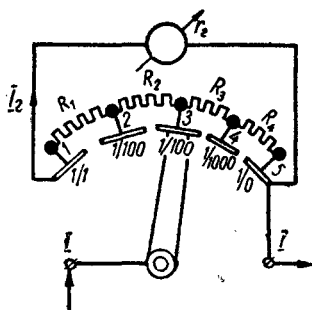


Рис. 6. Монтажная схема шунта Айртона.

вом положении, чувствительность гальванометра максимальная, а в пятом положении — гальванометр замкнут накоротко. Промежуточные положения уменьшают чувствительность тока в 10, 100, 1000 раз, то есть $k = 1/10$; $1/100$; $1/1000$ соответственно.

Для расчета составим систему уравнений: рычаг находится во втором положении

$$R_{ш} = (R_2 + R_3 + R_4) = kR_0 = 0,1 \cdot 6000 = 600 \text{ ом},$$

$$R_{д} = R_1 = 0,9 \cdot 6000 = 5400 \text{ ом},$$

следовательно, $R_1 = 9(R_2 + R_3 + R_4)$.

Ясно, что для третьего положения $(R_1 + R_2) = 99(R_3 + R_4)$ и для четвертого положения рычага $(R_1 + R_2 + R_3) = 999R_4$. Таким образом, имеем четыре уравнения

$$R_1 = 5400,$$

$$R_1 = 9(R_2 + R_3 + R_4),$$

$$R_1 + R_2 = 99(R_3 + R_4),$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = 999R_4,$$

откуда $R_1 = 5400 \text{ ом}$, $R_2 = 540 \text{ ом}$, $R_3 = 59,4 \text{ ом}$, $R_4 = 0,6 \text{ ом}$,

то есть шунт для гальванометра с $R_{кр} = 6000 \text{ ом}$ рассчитан. Практически универсальный шунт оформляется либо в виде штепсельного, либо в виде рычажкового переключателя. Схема штепсельного универсального шунта, построенного на несколько измененной схеме Айртона, приведена на рис. 7.

Градуйровка и правила работы с зеркальным гальванометром

Выбор гальванометра. При выборе гальванометра для измерения той или иной величины в конкретной электрической цепи следует соблюдать такие правила:

во-первых, обращать внимание на данные цепи;

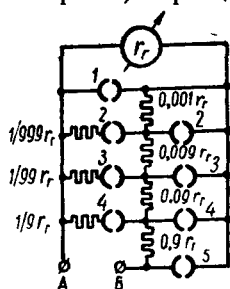


Рис. 7. Вариант монтажной схемы шунта Айртона.

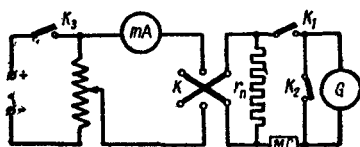


Рис. 8. Схема измерения параметров гальванометра:

Π — потенциометр; mA — миллиамперметр класса точности 0,5; r_n — образцовое сопротивление; K_1, K_2, K_3, K — ключи; MC — магазин сопротивлений; G — гальванометр.

во-вторых, гальванометр должен обладать подходящей чувствительностью, достаточной для измерения тока или напряжения в конкретном случае;

в-третьих, чувствительность гальванометра не должна быть слишком большой, так как это при отсутствии шунта затруднит работу.

Что касается критического сопротивления гальванометра, то, как указано ранее, оно должно быть близко к сопротивлению цепи. Если сопротивление внешней цепи сильно отличается от критического, то гальванометр (для гальванометра М-21) включается через внутреннее сопротивление или производится регулировка магнитным шунтом; при выведенном магнитном шунте критическое сопротивление максимальное (при этом, однако, изменяются постоянные гальванометра).

Во всех самых разнообразных случаях применения гальванометра можно указать некоторые общие принципы выбора:

1. Гальванометр нужно выбрать таким, чтобы можно было поставить его в критический режим работы, отвечающий наименьшему времени его успокоения.

2. Следует добиться согласования гальванометра со схемой измерительной цепи по максимуму мощности ($R_{цепи} = R_g$) для

получения наивысшей чувствительности. В этом случае время успокоения неминимальное.

Измерение параметров гальванометра. Для измерения параметров гальванометра — критического сопротивления и чувствительности можно рекомендовать приведенную на рис. 8 схему.

Идея метода заключается в том, что параллельно с гальванометром включается образцовое сопротивление весьма малой величины. Таким образом, на гальванометр ответвляется лишь незначительная часть тока, тем более, что последовательно с гальванометром включается очень большое сопротивление. Действительно, пусть миллиамперметр показывает значение тока, равное I , тогда через сопротивление r_n пойдет ток I_0 , а через сопротивление MC и R_g ток i , так что

$$I_0 + i = I.$$

Причем падение напряжения на сопротивлении r_n будет равно $I_0 r_n$, а на параллельно включенном с ним сопротивлении $R_{кр} + R_g$ — $i(R_{кр} + R_g)$, но $I_0 r_n = i(R_{кр} + R_g)$. Прибавим к обеим частям равенства $i r_n$, получим

$$(I_0 + i) r_n = i(R_{кр} + R_g + r_n).$$

Но

$$I_0 + i = I, \quad i = C_i \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \frac{1}{l},$$

где l — расстояние от осветителя до шкалы;

α_1, α_2 — отклонение светового указателя вправо и влево;

C_i — чувствительность гальванометра по току,

$R_{пл} = R_{кр} + R_g + r_n$ — полное сопротивление цепи.

Получим

$$C_i R_{пл} \cdot \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \frac{1}{l} = I r_n; \quad C_i = \frac{2 I r_n l}{R_{пл} (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (24,2)$$

Для определения критического сопротивления потенциометром подается такой ток, чтобы отклонения зайчика составляли 100—150 делений шкалы. При этом на магазине MC должно быть установлено такое (большое) сопротивление, чтобы колебания зайчика были периодическими. Затем, постепенно уменьшая сопротивление магазина и соответственно уменьшая величину даваемого напряжения с помощью потенциометра так, чтобы отклонения зайчика по-прежнему не превышали 100—150 делений, добиваются такого положения, при котором режим гальванометра становится критическим, то есть, чтобы колебания зайчика были не периодическими (зайчик отклоняется на некоторое

число делений и путем постепенного ряда периодических колебаний останавливается около этого нового положения равновесия), а аperiodическими (зайчик достигает нового положения равновесия, определяемого величиной тока, проходящего через гальванометр, без каких бы то ни было колебаний).

При дальнейшем понижении сопротивления колебаний вокруг положения равновесия также не будет, но задача заключается в

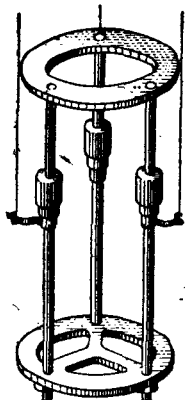


Рис. 9. Подвес Юлиуса.

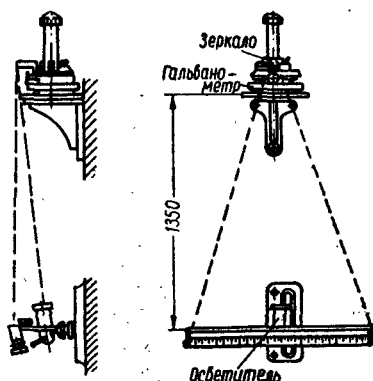


Рис. 10. Схема вертикальной установки гальванометра с вертикальным отсчетным устройством.

том, чтобы выбрать именно такой режим, при котором периодические колебания переходят в аperiodические.

Постоянная по напряжению вычисляется по формуле $C_{VR_{пл}} = C_i$.

В заключение остановимся на рассмотрении настольных зеркальных гальванометров австрийской фирмы G6ergz. Они отличаются наличием двух шкал и двух световых указателей: первая шкала от 0 до 60 делений, вторая от 0 до 300. Когда зайчик выходит за пределы первой шкалы, отсчет ведется по второй. Кроме того, гальванометр комплектуется с универсальным шунтом, что создает большие удобства в работе.

Для удобства выбора гальванометра приведем таблицу параметров отечественных гальванометров (табл. 1).

Установка гальванометров. Зеркальные гальванометры очень чувствительны к механическим сотрясениям и толчкам, так как обладают сравнительно небольшим противодействующим моментом. Для защиты гальванометр устанавливают обычно на кронштейне или консоли, вмозанных в капитальную стену здания или закрепленных на массивной каменной колонне, установленной на полу помещения. Однако при наличии довольно сильных источников толчков и вибрации указанных мер

оказывается не достаточно. В таком случае употребляется массивная металлическая или мраморная плита, которая кладется на лист пористой резины. Иногда делают два-три слоя такой амортизации. Для этой же цели в некоторых случаях применяют подвес Юлиуса. Его конструкция видна на рис. 9.

К нижнему основанию прикрепляется пластина, опущенная в ванну с маслом, выполняющая роль успокоителя.

Устройство отсчетных приспособлений чрезвычайно разнообразно. Наиболее распространенными являются горизонтальные и вертикальные устройства (рис. 10, 11).

Расстояние от зеркала гальванометра до шкалы выбирается в пределах 1—3 м, а иногда и больше. Увеличение расстояния от шкалы до зеркала гальванометра, выгодное с точки зрения получения максимальной чувствительности, имеет свой предел, определяемый погрешностью отсчета

$$l_{\max} = \frac{0,3 \text{ мм}}{\omega \text{ мм/м}} \text{ м},$$

где ω — экспериментальная величина погрешности нулевого показания.

Эмпирически расстояние от шкалы до гальванометра можно выбирать таким образом: число метров до шкалы не должно превышать числа миллиметров диаметра зеркала. При установке двух гальванометров рядом расстояние между ними должно быть не менее 0,25—0,5 м.

При выборе места для установки гальванометра следует помнить, что близкое соседство сильных магнитных и электрических полей, мощных выпрямителей и других излучателей могут искажать показания и мешать измерениям.

§ 2. Электрометры и электрические схемы

Электрометры

Известно, что лучшие гальванометры обладают чувствительностью 10^{-12} а/мм·м, а современный физический эксперимент в целом ряде случаев требует измерений токов порядка 10^{-13} — 10^{-16} а (измерение фототока, вторичной электронной эмиссии, измерение ионных токов и т. д.). Для этого применяются прибо-

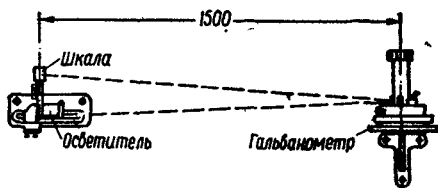


Рис. 11. Схема горизонтальной установки гальванометра с горизонтальным отсчетным устройством.

Таблица 1

Параметры						
Тип гальванометра	Внутреннее со- противление, $R_{вн}$, ом	Критическое со- противление, $R_{кр}$, ом	Постоянная по то- ку, C_i , а/мм·м	Постоянная по на- пряжению C_U , а/мм·м	Баллистическое постоянное C_b , В/мм·м	Период свободных колебаний
М-21	500	20000	$1,5 \times 10^{-9}$	—	—	5
М-21/1	1000	100000	$0,15 \times 10^{-9}$	—	—	10
М-21/2	100	3000	$1,5 \times 10^{-9}$	—	15×10^{-9}	20
М-21/4	20	50	4×10^{-9}	$0,2 \times 10^{-6}$	—	12
М-21/6						
дифференц.	2×100	3500	$1,5 \times 10^{-9}$	—	—	12
ГПЗ-В	20	20	$8,3 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-8}$	3,7
ГЭС-47/1	500	10000	3×10^{-10}	$3,1 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-10}$	7
ГПЗ-А	1000	100000	$2,5 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-10}$	$2,7 \times 10^{-10}$	2,5
М25-3	16	50	12×10^{-9}	$0,8 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-8}$	10
М25-4	100	700	3×10^{-9}	—	—	10
М25-6	700	6000	1×10^{-9}	—	$4,3 \times 10^{-9}$	10

ры, называемые электрометрами. В принципе работы электрометров, служащих для измерения тока, лежит факт накопления заряда за данный промежуток времени. Зная заряд Q и время τ , за которое произошло отклонение указателя электрометра на определенное количество делений по шкале, можем определить величину тока, протекающего через прибор,

$$I = \frac{Q}{\tau}.$$

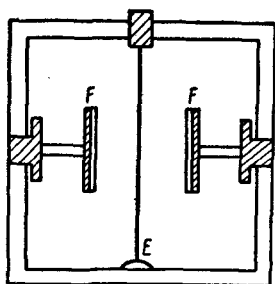


Рис. 12. Схема струнного электрометра.

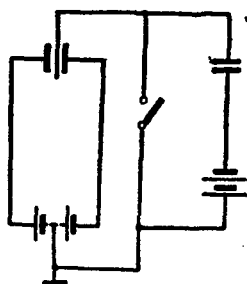


Рис. 13. Схема включения струнного электрометра.

Зная внутреннее сопротивление прибора, можно определить падение напряжения на нем

$$U = IR_{\text{приб.}}$$

Имеются два типа электрометров: струнный и квадрантный.

Струнный электрометр представляет собой металлическую коробку, соединенную с землей, в которой между двумя металлическими пластинками F (имеющими форму ножей), натянута тонкая проводящая нить E (рис. 12). Верхний конец нити прикреплен к металлическому стержню, который соединяется с заряженной системой. Толщина нити составляет от 2 мк до 10. Оба ножа и нить хорошо изолированы от корпуса, на ножи подаются равные по величине, но противоположные по знаку потенциалы. Если нить обладает нулевым потенциалом, то она будет неподвижна, при подаче же на нож заряда нить отклонится в ту или иную сторону. Отклонения нити измеряются при помощи микроскопа. Чувствительность электрометра определяется обычно числом делений, на которое отклоняется указатель электрометра при повышении потенциала на рабочей части последнего на величину 1 в. Чувствительность струнного электрометра порядка 100 делений на 1 в. Для работы собирается схема, приведенная на рис. 13. При замыкании ключа (электрометр соединен с зем-

лей) происходит накопление заряда на обкладке конденсатора, при размыкании на нить подается потенциал, возникающий на обкладках за то время, пока ключ был замкнут. Таким способом можно измерить заряды до 10^{-15} к. Недостатком этого метода является слишком большое время измерения.

Квадрантный электрометр состоит из двух пар квадрантов, изолированных на янтаре и расположенных в горизонтальной плоскости. На проводящей нити подвешен легкий листок слюды или картона с напыленным слоем металла так, чтобы он занимал симметричное положение относительно квадрантов. Затем, подавая напряжение определенной величины на листок, можем определить величину заряда, поданную на одну из пар квадрантов.

В электрометре с несимметричными квадрантами (так называемый электрометр Комптона) чувствительность доводится до 100 000 делений на 1 в. Квадрантный электрометр обладает тем же недостатком, что и струнный, то есть большим временем измерения. Поэтому в настоящее время успешно используются и другие методы измерения, о которых речь пойдет ниже.

Остановимся на некоторых замечаниях относительно работы с электрометрами.

Схема включения электрометра. Существуют три схемы включения электрометра в измерительную цепь: двойное включение, бисквитное включение и квадрантное включение. Двойное включение (без вспомогательной батареи) дает низкую чувствительность данного квадрантного электрометра. Оно заключается в следующем: испытываемое напряжение подается между закороченными попарно квадрантами, провод от «бисквита» подсоединяется к любой паре закороченных квадрантов. Двойное включение пригодно для измерений напряжений переменного и постоянного токов.

Вторые два метода включения требуют вспомогательной батареи (от 50 до 200 в) и пригодны только для измерений постоянного тока.

Бисквитное включение показано на рис. 14. Его преимущество в том, что продолжительность устойчивой работы высоковольтной батареи определяется только сроком ее службы в разомкнутом состоянии.

Схема квадрантного включения приведена на рис. 15.

Преимущество этой схемы заключается в том, что потенциалы пар квадрантов, равных между собой, остаются такими и впоследствии, что в свою очередь влечет за собой постоянство нуля электрометра.

При работе с электрометрическими схемами для исключения контактной разности потенциалов в схеме включения электрометра, а значит и устранения искажений в показаниях по этой причине производят четыре отсчета: два отсчета при двух поло-

жения переключателя при вводе измеряемого напряжения и два отсчета при двух положениях переключателя у вспомогательной батареи (на рисунках переключатели не показаны).

Окончательный результат измерения получим из формулы

$$n = \frac{(n_1 - n_2) + (n_3 - n_4)}{4},$$

где n_1, n_2, n_3, n_4 — отсчеты при соответствующих положениях переключателей, а n — среднее значение измеряемой величины.

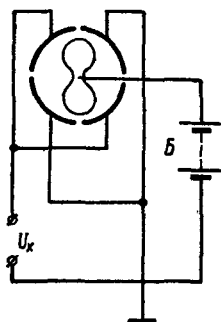


Рис. 14. Схема «бисквитного» включения квадратного электрометра:

U_x — измеряемое напряжение; B — батарея 50—150 в.

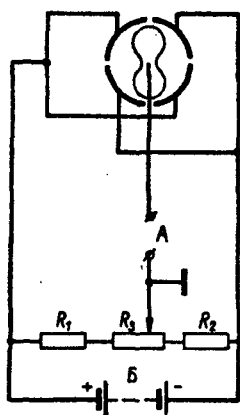


Рис. 15. Схема «квадратного» включения электрометра:

R_1 и R_2 — высокоомные сопротивления; R_3 — потенциометр; B — вспомогательная батарея 50—200 в. Между A и бисквитом включается сопротивление порядка 3—5 Мом (это же относится и к схеме бисквитного включения).

Изоляция в электрометрах и электрометрических схемах. Вопрос изоляции так же, как и вопрос электростатической защиты электрометра и измерительной схемы, должен всегда находиться в центре внимания экспериментатора. Вопрос этот исключительно важен. Часто неудача эксперимента является следствием недосмотра изоляции. Много внимания уделяет вопросу изоляции А. Ф. Иоффе в своей книге «Техника физического эксперимента».

Ограничившись общими замечаниями, отметим, что улучшить изоляцию ответственных участков схемы можно путем покрытия их янтарным лаком, изготовленным по методу П. А. Ильченко (ГОИ). (Растворяют натуральный янтарь в бензоле при высокой температуре $\sim 200^\circ \text{C}$ в толстостенном запаянном стеклянном сосуде, помещенном в стальную бомбу).

Для измерения токов в 10^{-15} — 10^{-16} а применяются косвенные методы измерения. Один из них заключается в измерении разности потенциалов на концах сопротивления, другой — в определении времени зарядки конденсатора известной емкости. Очевидно, чем больше будет сопротивление в первом случае и чем меньше во втором, тем меньший ток можно измерять. Современные электрометры (квадрантные и струнные), собственно говоря, удовлетворяют этим требованиям. Имея сопротивление утечки 10^{16} — 10^{17} ом и распределенную емкость 10 — 20 пф, электрометр, например, при зарядке его емкости до 1 в дает возможность измерять заряды 10^{10} — 10^{11} , а токи порядка 10^{-15} — 10^{-16} .

Действительно, пусть сопротивление электрометра 10^{16} ом включено параллельно с емкостью 10 пф зарядилось до потенциала 1 в; при этом на обкладках конденсатора накапливается заряд $Q = CU = 10^{-11}$. $1 = 10^{-11}$ к. Но такая зарядка (до 1 в) может произойти за время

$$\tau = RC = 10^{16} \cdot 10^{-11} = 10^5 \text{ сек},$$

то есть время измерения 30 час. Понятно, что такая длительность эксперимента не всегда удобна.

В связи с этим необходимо найти средства для более быстрого измерения таких малых зарядов (слабых токов), причем требование к таким приборам остаются прежние (большое входное сопротивление, малая емкость).

Таковыми приборами оказались ламповые электрометры, которые представляют собой не что иное как усилители постоянного тока, дающие возможность усиливать ток до значений, которые регистрируются обычными гальванометрами. В начале входного каскада усилителя включена электронная лампа с большим входным сопротивлением.

Основное требование, предъявляемое к усилителю для электрометрического измерения слабого тока, заключается в том, что помимо малой межэлектронной емкости и большого входного сопротивления он должен обладать также малым сеточным током первой лампы. Последнее необходимо для того, чтобы первая лампа имела большое сопротивление между сеткой и остальными электродами, а также для снижения уровня шума, связанного с флюктуационными колебаниями сеточного тока. Ввиду указанных выше особенностей, как показывают точные расчеты, применение обычных усилительных ламп не дает возможности измерять слабые токи из-за большого сеточного тока этих ламп. Поэтому разработаны и применяются специальные электрометрические лампы. Прежде всего необходимо указать, что электрометрические лампы чаще всего являются тетрами. Для

уменьшения сеточного тока анодное напряжение в этих лампах выбирается порядка 5—7, иногда 10 в. При этом крутизна характеристики лампы оказывается очень низкой; для увеличения ее вводится так называемая защитная, или катодная, сетка, расположенная между катодом и управляющей сеткой. Потенциал на этой сетке положительный. Благодаря этому границы области, занимаемой облаком электронов около катода, расширяются и поверхность эффективного катода приблизительно совпадает с поверхностью объема, ограниченного катодной сеткой, в связи с чем повышается крутизна анодной характеристики лампы. Последняя у электрометрических ламп колеблется в пределах от 20 *ма/в* до 300 *ма/в*. Защитная сетка снижает также величину анодного тока управляющей сетки, обусловленного эмиссией положительных ионов с катода лампы.

Анодный ток у электрометрических ламп лежит в пределах 40 *мкА*. Сеточный ток порядка 10^{-13} — 10^{-15} *А*. Статический коэффициент усиления по напряжению порядка 1.

В настоящее время разработано до 20 типов электрометрических ламп. Причем, кроме электрометрических тетродов, имеются электрометрические триоды.

Применение электрометрической лампы в электронизмерительной схеме дает возможности понизить измеряемую величину тока в 10^{-2} — 10^3 раз за счет увеличения входного сопротивления без изменения постоянной времени входной цепи. Но предельное значение измеряемого тока определяется также и нестабильностью — дрейфом нулевого отсчета, свойственным вообще усилителям постоянного тока. Как показывает подсчет, даже при применении наиболее стабильных источников тока — аккумуляторов емкостью 100 *А/час* за одну минуту анодный ток будет меняться на 10^{-8} — 10^{-9} *А*, для гальванометра с ценой деления 10^{-9} *А/мм* это составит несколько делений в минуту. Поэтому применяются такие схемы, где дрейф нулевого отсчета сведен до минимума путем независимости, в известных пределах, анодного тока от тока накала. Это достигается применением так называемых мостовых схем. Приведем наиболее распространенную схему на лампе 1ЭП (рис. 16, 17).

Гальванометр в этих схемах включен в диагональ моста, два плеча которого образуют сопротивления R_1 и R_4 , а два других плеча — сопротивления интервала анод—катод лампы R_p и защитная — катодная сетка R_s . Кроме того, для облегчения наладки схемы в одно из плеч включена добавочная переменная разность потенциалов $U_0 = I_n R_0$, которая сначала может быть положена равной нулю. Если мост сбалансирован, следовательно, $I = 0$. Величины сопротивления R_1 и R_4 неизменны, но меняются эмиссия катода и одновременно анодный ток. Представляется возможным выбрать такой режим работы, при котором относительные изменения этих токов будут одинаковыми, то

есть из условия равновесия моста $R_4 I_s = I_a R_1$ где I_a — анодный ток, I_s — сеточный ток, или

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{I_a}{I_s}; I_a = \frac{R_4}{R_1} I_s.$$

Условие одновременного изменения сеточного и анодного тока от тока накала запишется в виде

$$\frac{\partial I_a}{\partial I_H} = \frac{R_4}{R_1} \frac{\partial I_s}{\partial I_H}. \quad (25,2)$$

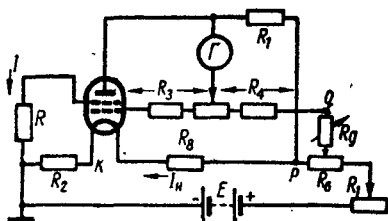


Рис. 16. Вариант мостовой схемы на лампе 1Э1П.

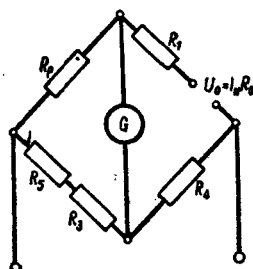


Рис. 17. Эквивалентная схема моста.

Или в случае $U_0 \neq 0$ условие равновесия моста — условие независимости от тока накала анодного и сеточного тока

$$\frac{\partial \left(I_a + \frac{U_0}{R} \right)}{\partial I_H} = \frac{R_4}{R_1} \frac{\partial I_s}{\partial I_H}. \quad (26,2)$$

Выражение (25,2) графически интерпретируется как то, что пересечение касательных к кривым $I_a = f_1(I_H) + \frac{U_0}{R}$; $I_s = f_2(I_H)$ на оси I_H , то есть одновременное превращение производных в нуль. Зависимость

$$I_a = f_1(I_H) \text{ и } I_s = f_2(I_H)$$

из условия (25,2) должна быть прямолинейной (рис. 18). Но эти зависимости на самом деле нелинейны, поэтому эти условия могут выполняться лишь приближенно в области небольших изменений величины I_H . Таким образом, поставить схему в режим, при котором отсутствует дрейф нулевого отсчета, можно только при определенном значении тока накала лампы и напряжении U_0 .

Для настройки прибора собирается вышеуказанная схема (рис. 16). Затем подбираются определенные значения сопротивлений так, чтобы при крайнем левом положении сопротивления R_6 и полностью выведенном потенциометре R_9 ток накала

и потенциалы всех электродов соответствовали бы этикетным значениям. Гальванометр устанавливается на нуль с помощью передвижения движка потенциометра в цепи защитной сетки. Ток накала немного меняют, при этом наблюдают за показаниями гальванометра. В связи с этим обыкновенно происходит смещение зайчика; тогда вновь, установив по миллиамперметру нормальный ток и повернув потенциометр вправо, опять наблюдают за изменением тока накала; если изменения уменьшаются, то полярность U_0 выбрана правильно, а если не уменьшается, то можно попытаться переставить точки p и q местами. Избавиться же от дрейфа нуля совершенно представляет собой весьма кропотливую и трудную задачу. На примере одного из усилителей дадим правила его расчета (рис. 16). Выбрав ту или иную лампу, на которой будет собираться наш усилитель, выписываем ее параметры. Лампа 1Э1П имеет параметры: U_a — анодное напряжение, 6 в; U_{s1} — напряжение катодной сетки, 4 в; U_s — напряжение управляющей сетки, 3 в; U_n — напряжение накала, 1 в; I_n — ток накала. Подобрав данный режим, снимаем значения I_a — анодного тока ($I_a = 120$ мка) и I_s — сеточного тока ($I_s = 620$ мка). Сопротивление R_1 и R_4 должны удовлетворять соотношению балансировки моста, вместе с тем сопротивление R_1 должно быть достаточно большим, чтобы чувствительность схемы не оказалась слишком малой. Рекомендуются брать R_1 от 10 до 20 ком.

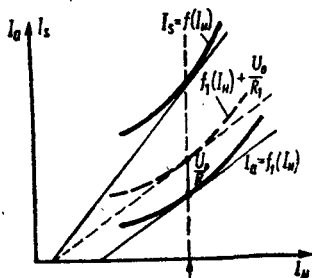


Рис. 18. К интерпретации выражения 125, 21.

Возьмем $R_1 = 15,5$ ком. Тогда $R_4 = R_1 \frac{I_a}{I_s}$.

$$R_4 \approx 15,6 \cdot \frac{120}{620} = 3,02 \text{ ком.}$$

Что касается сопротивления R_3 , то на него падает напряжение тока I_s , поэтому

$$R_3 = \frac{U_{g_0} - U_{s_0}}{I_s} = \frac{6\text{ в} - 4\text{ в}}{620 \cdot 10^{-6} \text{ а}} = 3000 \text{ ом.}$$

(Для удобства регулировки ставим временное сопротивление на 4700 ом).

Сопротивление R_2 задает значительное смещение на управляющей сетке, по нему протекает ток накала, а смещение $U_{s1} = 3$ в, тогда

$$R_2 = \frac{3\text{ в}}{46,5 \cdot 10^{-3} \text{ а}} = 65 \text{ ом.}$$

Практически R_2 подбирается так, чтобы падение напряжения на нем составляло 3 в, а падение напряжения на накале 1 в.

Значение сопротивления R_8 должно быть таким, чтобы на него падало напряжение, примерно равное напряжению, падающему на R_1

$$U_{a_0} - U_H = I_H R_8 - I_a R_1,$$

$$R_8 = \frac{U_{a_0} - U_H + I_a R_1}{I_H}$$

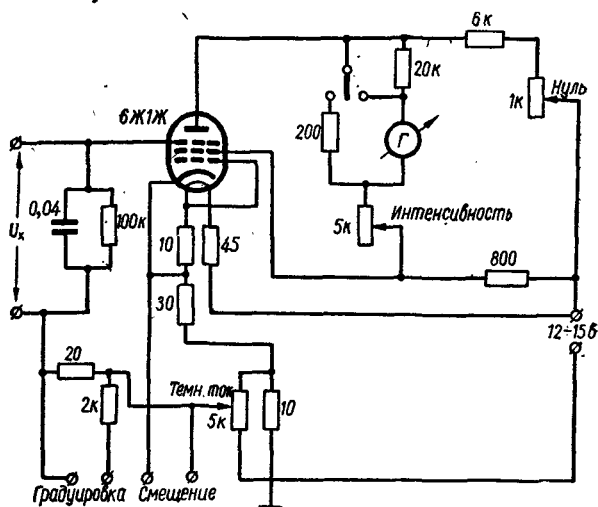


Рис. 19. Вариант мостовой схемы на лампе 6Ж1Ж.

(здесь на R_1 подано напряжение противоположной полярности)

$$R_8 = \frac{6 - 1 + 1,81}{46,5 \cdot 10^{-3}} = 147 \text{ ом}$$

(R_6 обычно выбирается порядка 30—50 ом, ставим переменное сопротивление в 50 ом).

Напряжение батарей должно быть таково, чтобы через цепь, состоящую из сопротивлений $R_2 + R_H + R_8 + R_6$, протекал нормальный ток накала

$$I_H R_2 + I_H R_H + I_H R_8 + I_H R_6 = U_A,$$

$U_A = 18$ в, ибо обычно нужно еще учесть напряжение на R_7 . R_9 выбираем порядка 2500 ом для того, чтобы R_4 имело заданное значение; R_7 — порядка нескольких десятков ом.

Коэффициент усиления по току данной схемы составляет примерно $3 \cdot 10^3 - 10^4$ при различных режимах.

В случае отсутствия электрометрической лампы мостовую схему можно собрать на пентоде-желуде. На рис. 19 приведена несимметричная мостовая схема, собранная на лампе 6Ж1Ж, поставленной в электрометрический режим.

Данная схема обычно используется вместе с фотоэлектронным умножителем, например, ФЭУ-17.

Кроме рассмотренных выше несимметричных мостовых схем, существуют схемы так называемого *параллельного* или *последовательного* баланса, содержащие две лампы в качестве плеч моста. На рис. 20 приведена принципиальная схема параллельного баланса. В таких схемах могут быть использованы

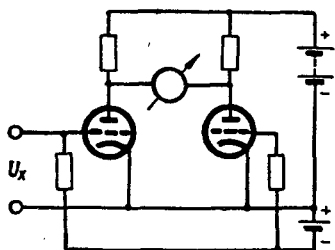


Рис. 20. Вариант мостовой схемы параллельного баланса.

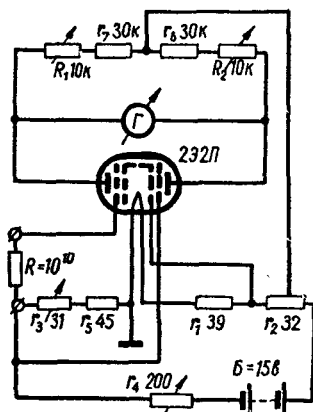


Рис. 21. Вариант мостовой схемы на лампе 2Э2П.

лампы 6Ж1Ж или двойные триоды типа 6Н9С, 6Н8С, 6Н1П и другие (в таких триодах, собранных в одном балансе, характеристики меньше отличаются, чем у двух ламп).

Хорошо себя зарекомендовала мостовая балансная схема, построенная на удвоенной электрометрической лампе 2Э2П (рис. 21).

Мостовые электрометрические схемы часто применяются на входе многокаскадных усилителей. Делается это для того, чтобы для измерения слабых токов в качестве нуля-прибора применять не очень чувствительные зеркальные гальванометры, требующие установки на консолях, а более грубые приборы, которые вместе с усилителем можно легко переносить с места на место. При монтаже такого многокаскадного электрометра в отличие от настройки однокаскадного мостового электрометра необходимо подбирать условия, при которых потенциал анода входной лампы (со стороны отрицательного полюса ее питания) не зависит от напряжения последнего. Практически это условие отыскивается как минимум кривой зависимости тока через гальванометр от тока накала ($I_g = f(I_H)$).

§ 3. Измерение сопротивлений, емкости и индуктивности. Мосты

Методы измерения сопротивления чрезвычайно разнообразны, поэтому остановимся только на некоторых из них, применяемых в лабораторной практике.

Метод амперметра и вольтметра. Этот метод весьма широко распространен, и точность его зависит от точности приборов. В основе этого метода лежит закон Ома $RI=U$.

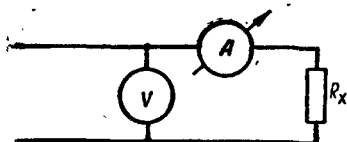


Рис. 22. Метод амперметра и вольтметра (I схема).

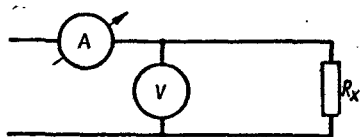


Рис. 23. Метод амперметра и вольтметра (II схема).

При этом возможны измерения как на постоянном, так и на переменном токе. В зависимости от внутреннего сопротивления измерительных приборов и величины измеряемого сопротивления применяются две схемы включения (рис. 22, 23).

В первой схеме вольтметр учитывает падение напряжения не только на измеряемом сопротивлении, но и на амперметре,

$$U = IR_g + IR_x; R_x = \frac{U}{I} - R_g; R_x = \frac{U}{I} \text{ при } R_g \ll R_x,$$

то есть точность схемы тем больше, чем меньше сопротивление амперметра по сравнению с измеряемым сопротивлением.

При пользовании схемой II (рис. 23) измеряется ток, текущий через вольтметр,

$$I = I_x + I_U; R_x = \frac{U_U}{I_x} = \frac{U_U}{I - I_U} = \frac{U_U}{I - \frac{U_U}{R_x}},$$

если R_x достаточно велико, $R_x = \frac{U_U}{I}$.

Таким образом, схема II применима при высокоомных вольтметрах.

Что касается измерения полного сопротивления, то, несмотря на свою небольшую точность, указанный метод незаменим в тех случаях, когда полное сопротивление измеряемого объекта зависит как от силы тока, протекающего по нему, так и от величины приложенного напряжения (например, при измерении полного сопротивления катушки с ферромагнитным сердечни-

ком). Величина полного сопротивления зависит как от формы кривой тока, так и от намагниченности сердечника; если на первый фактор влияет напряжение источника, то второй зависит от силы тока в катушке.

Метод омметра. Омметр — прибор, который служит не столько для точного измерения сопротивления, сколько для быстрой, приблизительной оценки данного сопротивления с точностью до 2,5—3%. Омметры, предназначенные для измерения сопротивлений порядка десятков и сотен мегом, носят название мегомметров. И если у обычных омметров с пределами измерений от нуля до 1000 ом источником может служить батарейка на 1—4 в, то для мегомметров нужны источники э.д.с. до 350—500 и даже 1000 в. Некоторые мегомметры приспособлены для включения внешнего источника (например, в цепь переменного или постоянного тока 220 в). Включение внешнего источника рекомендуется при измерении сопротивлений в несколько мегом.

Мост постоянного тока. Обладая наибольшей точностью, широкое распространение получили так называемые мостовые методы измерения. Если максимальная точность измерения методом амперметра и вольтметра при применении прибора высшего класса точности составляет 0,2%, а измерение омметра вообще дает 2,5—3% точности, то погрешность мостовых методов измерения достигает при определенных условиях 0,001%.

Принципиальная схема моста изображена на рис. 24.

Условие равновесия моста — отсутствие в гальванометре тока. Тогда $U_C = U_D$ или $U_{AC} = U_{AD}$, откуда

$$I_2 R_2 = I_3 R_3, \quad I_1 R_1 = I_4 R_4, \quad U_{CB} = U_{DB},$$

следовательно, $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ при $I_1 = I_2$ и $I_4 = I_3$. Таким образом, если

R_1 — неизвестное сопротивление, то оно равно

$$R_1 = R_2 \frac{R_4}{R_3}. \quad (28,2)$$

Равновесия моста можно добиваться двумя путями: либо меняя сопротивление R_2 , либо изменяя соотношение $\frac{R_4}{R_3}$; при этом лучше, если их сумма будет оставаться неизменной (как следует из теории моста, погрешность измерений в этом случае будет меньше). Что касается чувствительности моста, то при постоянном отношении плеч $\frac{R_4}{R_3}$ она может быть определена как отклонение гальванометра в делениях шкалы при относительном изме-

нении регулируемого плеча на единицу. Пусть $\varepsilon = \frac{\Delta R_2}{R_2}$ — относительное изменение плеча, тогда выражение для чувствительности (в процентах) будет

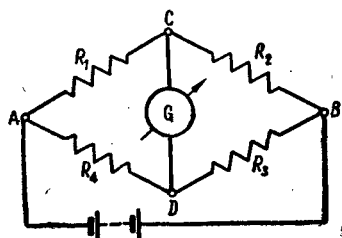


Рис. 24. Принципиальная схема моста.

$$S = \frac{\alpha}{100\varepsilon}, \quad (29,2)$$

где S — чувствительность;
 α — отклонение гальванометра в делениях.

Чувствительность при переменном отношении плеч выражается следующим образом ($R_2 = \text{const}$):

$$S = \frac{\alpha}{100(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)}. \quad (30,2)$$

В зависимости от того, изменяется сопротивление или отношение плеч, различаются магазинные и линейные мосты. Линейные мосты в качестве основы своей конструкции имеют калиброванный провод высокого сопротивления, по которому скользит подвижной контакт. Весь провод в целом представляет два плеча моста, отношение которых определяется местоположением скользящего контакта. Изменение отношения плеч теоретически происходит от нуля до бесконечности. Точность мостов подобного типа весьма невелика, поэтому они почти вышли из употребления.

Весьма широкое распространение получили магазинные мосты с постоянным отношением плеч. В табл. 2 приведены данные о мостах, выпускаемых нашей промышленностью.

Потенциометры. Своеобразной разновидностью моста постоянного тока является потенциометр — прибор, служащий для

Таблица 2

Тип	Погрешность измерений, %	Габариты дл.×шир.×выс.	Вес, кг	Пределы измерен., ом
ММВ	2	200×110×65	1,1	0,05—50000
УМВ	До 100000—0,5 Более 100000—5	220×210×150	3,2	0,01—1000000
ШМВ	1÷10—2 10÷100—1,5	340×235×148	9,7	0,001—10000000
МТ-5	10 ⁻⁵ ÷10 ⁻⁴ —2 10 ⁻⁴ ÷11—2	280×190×160	4,2	10 ⁻⁵ —10
МТВ	0,05	465×345×150	10	10 ⁻⁶ —10
МЭИ	—	550×220×182	5,8	10 ⁻⁵ —99990
МС-1	—	300×200×220	9,0	1—10 ⁷
МС-2	—	300×200×270	8,1	—

измерения напряжений компенсационным методом. Принципиальная схема потенциометра приведена на рис. 25.

Подаваемое на клеммы (A и B) измеряемое напряжение уравнивается источником э.д.с. самого потенциометра с помощью переменного сопротивления R (последнее обыкновенно проградуировано в единицах напряжения). Об уравнивании свидетельствует равенство потенциалов точек A и B , при котором гальванометр устанавливается на нуле. Характерной особенностью потенциометра является то, что он не потребляет

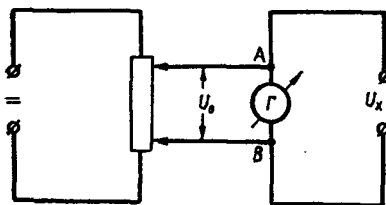


Рис. 25. Принципиальная схема потенциометра.

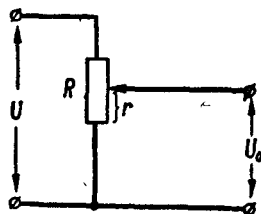


Рис. 26. Схема делителя напряжения.

тока при измерении. В результате этого не происходит перераспределение напряжения между измеряемым объектом и прибором, а следовательно, исключаются ошибки измерения в результате недостаточной точности прибора. Ошибки измерения в потенциометрах определяются классом точности применяемого гальванометра, последние же можно выбирать по своему усмотрению. Предел чувствительности потенциометра также определяется выбранным гальванометром, поэтому для наиболее точных измерений используются зеркальные гальванометры (ГЭС-47, М-21 и др.).

Измерения больших напряжений, чем те, на которые рассчитан данный потенциометр, производятся потенциометром с добавленным к нему делителем напряжения (рис. 26).

Делитель напряжения представляет собой сопротивление R , разбитое на ряд секций, каждая из которых составляет определенную ($0,1 - 0,01 - 0,001$) долю от общего сопротивления. Таким образом, напряжение, снимаемое с секции U_0 , и составляет определенную долю общего напряжения. Некоторые потенциометры заранее комплектуются такими делителями (потенциометр ППТВ-1, ППТН-1 и др.). При самостоятельном употреблении делителя напряжения следует обращать внимание на то, чтобы полное сопротивление делителя было много больше внутреннего сопротивления источника измеряемой э.д.с.

Потенциометр широко применяется и для измерения сопротивлений. Например, при так называемом двухзондовом методе

измерения удельного сопротивления собирается схема, приведенная на рис. 27.

Здесь потенциометр фактически измеряет падение напряжения на участке L , амперметр измеряет текущий через этот участок ток. Используя показания потенциометра и амперметра, вычисляют сопротивление участка, точность измерения которого определяется классом точности амперметра и чувствительностью гальванометра.

Докажем, что в данной схеме включения (рис. 27) в момент

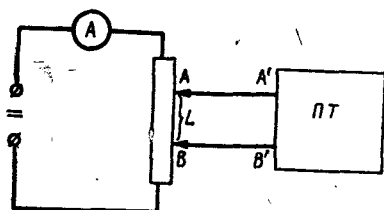


Рис. 27. Схема применения потенциометра.

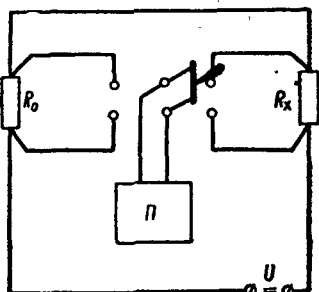


Рис. 28. Схема применения потенциометра.

измерения действительно не потребляется мощность. Пусть ток, текущий через амперметр, I_1 . Тогда в точке A он разветвляется на токи i_1 и i_0 (i_1 — ток через образец, i_0 — ток потенциометра), а через точку B течет ток $I_1 = i_1 + i_0$. Но потенциалы точек A_1 и B_1 из принципа работы потенциометра равны. Следовательно, ток, текущий через потенциометр, $i_0 = 0$, что и требовалось доказать.

Другой, часто встречающийся схемой для измерения сопротивления с помощью потенциометра является схема, приведенная на рис. 28.

Т а б л и ц а 3

Тип	Класс точности	Пределы измерения, Ω
ППТВ	2	$10^{-5} \div 10^4$
ППТН	2	$10^{-5} \div 1$
ПП	3	$0,5 \times 10^{-4} \div -1 \times 10^{-2}$

С помощью перекидного ключа (рис. 28) потенциометр переключается попеременно: то к измеряемому сопротивлению R_x , то к эталонному сопротивлению R_0 , а так как они включены последовательно и ток через них течет одинаковый, то неизвестное сопротивление вычисляется по формуле

$$R_x = \frac{U_x}{U_0} R_0,$$

где U_x — падение напряжения на измеряемом сопротивлении;
 U_0 — падение напряжения на эталонном сопротивлении.

В заключение приведем основные параметры выпускаемых нашей промышленностью потенциометров (табл. 3).

Измерение активного сопротивления на высокой частоте

В практике исследования физических свойств различных материалов очень часто необходимо измерить активное сопротивление рассматриваемого материала на переменном токе высокой частоты. К таким измерениям приходится прибегать для устранения переходного сопротивления на металлических электродах, а также, если имеются основания предполагать присутствие изолирующих прослоек между кристаллическими зернами в данном образце.

Такие измерения, как правило, вызывают определенные технические затруднения, причем литература по данному вопросу практически отсутствует. Предлагается достаточно простой способ измерения активного сопротивления образцов на высокой частоте, дающей достаточно высокую точность измерения.

Для измерений используется радиотехнический прибор — куметр. Диапазон возможных частот определяется в этом случае диапазоном частот генератора куметра и для прибора типа УК-1 достигает 200 Мгц.

Измерение импедансов в резонансных контурах методом замещения является наиболее употребительным в практике радиотехнических измерений и применяется в широком диапазоне частот. При использовании контуров с сосредоточенными параметрами неизвестный импеданс может быть включен последовательно или параллельно резонансному контуру. Если величина неизвестного импеданса мала по сравнению с реактивным сопротивлением ветви контура, что выполняется для случая измерения сопротивления полупроводниковых образцов, используется последовательное включение (рис. 29).

Можно показать, что активная составляющая R_x неизвестного импеданса Z_x определяется при этом из выражения

$$R_x = \omega L \frac{Q - Q'}{Q \cdot Q'} = \frac{1}{\omega C} \frac{Q - Q'}{Q \cdot Q'}. \quad (31,2)$$

В случае заметной реактивной составляющей наблюдается изменение настройки контура, которую необходимо восстановить изменением емкости контура. Тогда

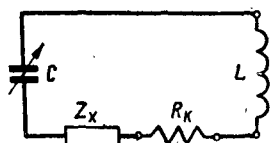


Рис. 29. Схема последовательного включения сопротивления в контур.

$$R_x = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{C - C'}{C'} \quad (32,2)$$

В выражениях (31, 2) и (32, 2) значения параметров схемы при включенном неизвестном импедансе обозначено штрихами. Под добротностью Q , как обычно, понимается соотношение

$$Q = \frac{\omega L}{R_k} = \frac{1}{\omega C R_k}.$$

Соответственно

$$Q' = \frac{\omega L}{R_k + R_x} = \frac{1}{\omega C (R_k + R_x)}.$$

Для измерения импедансов на высокой частоте данным методом удобно воспользоваться куметром, так как при этом от-

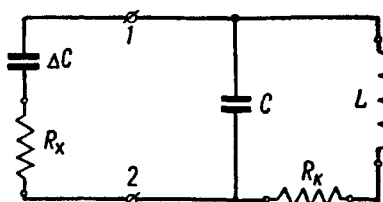


Рис. 30. Эквивалентная схема включения.

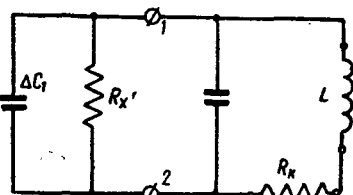


Рис. 31. Эквивалентная схема включения.

падает необходимость в специальном высокочастотном генераторе и специальной дополнительной методике определения Q . Кроме того, куметр обычно снабжается сменными эталонными индуктивностями для работы на выбранной частоте и имеет градуированный эталонный конденсатор. Однако конструкция куметра не предусматривает последовательного включения в эталонный контур, а изменение конструкции прибора является нежелательным с точки зрения возможного ухудшения его точности и нарушения градуировки. В связи с этим был предложен метод измерения сопротивления полупроводниковых образцов, при котором образцы подключались параллельно эталонному контуру куметра с помощью специальной кассеты, укрепленной на емкостных клеммах куметра. Начальная емкость кассеты без образца компенсируется в приборе специальным подстроечным конденсатором. Для уменьшения сильного шунтирующего действия на контур образца с малым сопротивлением измеряемый образец помещается в кассету с воздушным зазором 24 мм между одной из обкладок кассеты и поверхностного образца. Эквивалентная схема включения показана на рис. 30, где точки 1, 2 представляют собой емкостные клеммы куметра.

Расчет сопротивления ведется по измеренным добротностям эталонного контура LCR_k и значениям его емкости при внесенном в кассету образце и без него (соответственно Q', C' и Q, C) при резонансе на выбранной частоте. При этом формула для расчета активного сопротивления образца имеет вид

$$R_x = \frac{C}{\omega(C - C')} \cdot \frac{Q - Q'}{Q \cdot Q'}.$$

Для доказательства этой формулы необходимо произвести последовательный пересчет эквивалентной схемы измерений (рис. 30) в самую общую схему измерения импедансов в резонансных контурах методом замещения (рис. 29).

Путем пересчета схемы рис. 30 на данной частоте в схему рис. 31 получаем эквивалентную схему измерения импеданса путем параллельного подключения к резонансному контуру.

На данной частоте эквивалентность частей схем рис. 30 и рис. 31 слева от клеммы 1, 2 выполняется в случае равенств

$$R_x = \frac{R'_x}{1 + (\omega \Delta C' R'_x)^2};$$

$$\Delta C = \frac{1 + (\omega \Delta C' R'_x)^2}{\omega^2 \Delta C' R_x'^2}.$$

Эти выражения упрощаются при выполнении условия

$$(\omega \Delta C' R'_x)^2 \gg 1,$$

что практически выполнялось на использовавшихся высоких частотах. Тогда

$$R_x = \frac{1}{(\omega \Delta C')^2} R'_x,$$

$$\Delta C = \Delta C'. \quad (33,2)$$

Величина ΔC может быть непосредственно измерена по шкале эталонной емкости при восстановлении резонанса системы после подключения образца

$$\Delta C = C - C'.$$

Активная составляющая R'_x вызывает уменьшение добротности эталонного контура, причем можно показать, что аналогичное уменьшение добротности вызывается включением последовательно в контур сопротивления R''_x , связанного с R'_x соотношением

$$R''_x = \frac{1}{(\omega C)^2 R'_x}.$$

Таким образом, решая это соотношение одновременно с уравнениями (31, 2) и (33, 2), а также имея в виду, что $\Delta C = C - C'$, получаем окончательно

$$R_x = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{C}{(C - C')^2} \cdot \frac{Q - Q'}{Q \cdot Q'}$$

Учитывая размерность единиц и переходя от круговой частоты к линейной, получаем расчетную формулу

$$R_x = \frac{10^9}{2\pi} \frac{1}{f} \frac{C}{(C - C')^2} \frac{Q - Q'}{Q \cdot Q'} \text{ ом},$$

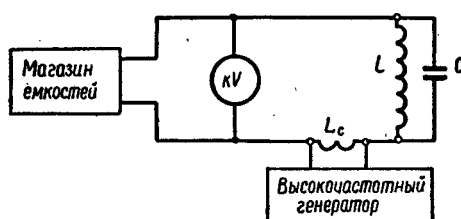


Рис. 32. Блок-схема установки для измерения активного сопротивления.

кV — катодный вольтметр; C — емкость; L — индуктивность; L_c — виток связи (подбирается практически).

где C выражается в пф, а f в МГц.

Для повышения точности отсчета желательно подбирать такие условия опыта, при которых значения Q' и Q, а также C и C' заметно отличаются. Это легко достигается подбором величины зазора, то есть величины ΔC. Погрешность измерений при этом будет определяться самим куметром,

то есть погрешностями при измерении добротности и емкости, и может быть определена обычным способом.

Данный метод имеет свой недостаток. Во-первых, при выводе формул делалось допущение

$$(\omega \Delta C R'_x)^2 \gg 1.$$

Однако такое допущение возможно только для значительных R'_x ($\geq 10^4$ ом). Если сделанное допущение неправильно, окончательная расчетная формула для R примет довольно сложный вид, неудобный для работы. Во-вторых, выпускаемые нашей промышленностью куметры имеют генераторы с узким интервалом частот и измерять сопротивление R от низкой (звуковой) до высокой частоты на одном приборе невозможно.

В таком случае можно использовать установку (рис. 32), где интервал частот будет определяться генератором.

§ 4. Электронно-лучевой осциллограф

Возможность визуального контроля за ходом процесса, большое входное сопротивление, малая инерционность и достигнутая

в последнее время высокая точность измерения обеспечили электронному осциллографу широчайшее применение.

Электронный осциллограф представляет собой прибор, посредством которого можно наблюдать и измерять параметры электронных процессов, а также снимать эксплуатационные характеристики различных приборов.

Принципиальная схема осциллографа представлена на рис. 33. Схема отражает два основных режима работы осциллографа.

В первом случае (положение переключателя П-1) на отклоняющие пластины трубки непосредственно или

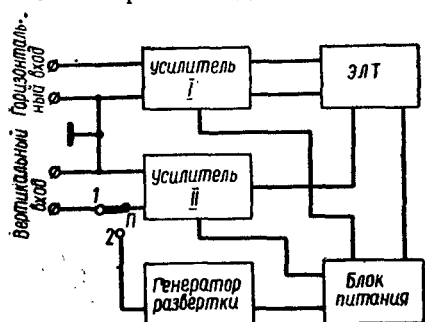


Рис. 33. Принципиальная схема осциллографа.

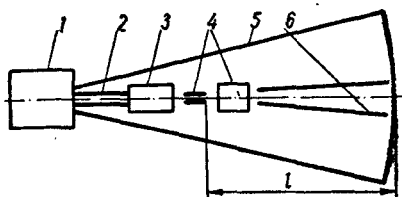


Рис. 34. Схема электронно-лучевой трубки.

через усилители подаются два внешних сигнала. Во втором случае (положение переключателя П-2) исследуется лишь один внешний сигнал, а в качестве второго используется выходное напряжение генератора развертки. Так как в этом случае чаще используют внешний сигнал, как функцию времени, то выходное напряжение генератора развертки имеет форму пилообразных колебаний (напряжение линейно зависит от времени). Взаимодействие остальных узлов ясно из схемы. (Подаваемое напряжение через усилитель поступает на горизонтальные и вертикальные пластины электронно-лучевой трубки, с помощью которых управляет электронным пучком, дающим соответствующее изображение на экране осциллографа).

Кроме основных узлов, имеются и второстепенные, не указанные на схеме (модуляторы яркости и чувствительности, датчики времени, применяемые иногда линии задержки и ждущей развертки и др.).

Остановимся последовательно на устройстве и работе основных частей осциллографа.

Электронно-лучевая трубка. Электронно-лучевая трубка является основной частью осциллографа. На рис. 34 представлена конструкция электронно-лучевой трубки. Она представляет собой стеклянную колбу 5 конусной формы, заканчивающуюся цоколем. Внутри трубки на специальной ножке 2 укреплен прожектор 3 и две пары отклоняющих пластин 4. На внутренней

стенке лобовой части колбы 6 нанесен специальный состав люминофора, чувствительный к электронному удару. Электронный прожектор, состоящий из электронной пушки и нескольких ускоряющих фокусирующих электродов, служит для создания электронного пучка достаточно малого сечения в плоскости экрана. Две пары отклоняющих пластин при подведении к ним напряжения позволяют перемещать луч, а следовательно, и светящееся пятно в плоскости экрана. Выводы от отклоняющих пластин и прожектора проходят через стекло и оформлены в виде цоколя.

Кроме описанного типа трубки, имеется целый ряд специальных трубок (двух-, четырехлучевые трубки, трубки с системой радиального отклонения луча и так далее).

Развертки. Служат для наблюдения на экране закона изменения во времени электрического напряжения и токов. Так как исследуемое напряжение чаще всего является периодической функцией времени (синусоидальное напряжение, Π -импульсы и т. д.), то наиболее распространенной является синхронизированная периодическая развертка, возвратно-линейная, с периодом равным или кратным периоду сигнала. В результате применения такой синхронизированной развертки пятно на экране осциллографа будет перемещаться равномерно слева направо, доходя до определенного положения и быстро возвращаясь в исходную точку. Перемещение повторяется в строгой последовательности. Для осциллографирования вольт-амперных характеристик и измерения фазы или частоты применяется синусоидальная развертка.

При наблюдении формы периодических сигналов применяется ждущая развертка. Последняя представляет собой однократную развертку, запускающуюся фронтом исследуемого сигнала или специальным импульсом. Если необходимо при наличии периодического сигнала исследовать лишь часть его, то также применяется ждущая развертка.

Осуществление пилообразной развертки достигается с помощью генератора пилообразных колебаний, который может быть построен как на лампах, так и на тиратронах.

Синхронизация. Нормальная работа осциллографа возможна при неподвижном изображении на экране трубки исследуемого сигнала; последнее возможно при кратности частот исследуемого и развертывающегося напряжения. Однако целый ряд причин (нестабильность параметров схемы развертки, флуктуации, внешние помехи и пр.) приводят к непрерывному изменению собственной частоты генератора.

Поэтому для обеспечения соответствия частот данное напряжение подается в схему генератора развертки так, что происходит захватывание или синхронизация последнего.

Суть процесса синхронизации сводится к сложению пилооб-

разных и исследуемых колебаний с кратными частотами. Ввиду того, что наложение пилообразного напряжения не изменяет формы исследуемого, на экране получаем вид последнего без искажений.

Усилители. Для усиления слабых электрических сигналов до такого уровня, при подаче которого на пластины можно вызвать необходимое отклонение электронного пучка, применяется усилитель. Ввиду того, что желательно как можно точнее воспроизвести подаваемый сигнал, к усилителям предъявляется ряд требований:

- 1) малый уровень нелинейных искажений;
- 2) обеспечение заданного диапазона усиливаемых частот;
- 3) коэффициент усиления — порядка 10^2 — 10^3 ;
- 4) усилитель должен быть снабжен устройствами, позволяющими осуществлять ступенчатую и плавную регулировку усиления, калибровку чувствительности и т. п.

Помимо основных узлов осциллографа в современном катодном осциллографе существует целый ряд вспомогательных устройств, улучшающих его качества и расширяющих пределы его применимости: генераторы меток времени, линии задержки, стабилизаторы напряжения, электронные коммутаторы и т. д. Некоторые из этих элементов не встраиваются в осциллограф, а используются в виде отдельных приставок.

Основные применения электронно-лучевого осциллографа

Электронно-лучевой осциллограф нашел настолько широкое применение, что невозможно перечислить все известные способы осциллографирования. Кроме измерения электрических величин, осциллограф применяется при измерении и неэлектрических величин, например, при измерении деформации формы тел и т. д. Использование осциллографа зачастую заменяет утомительный труд отдельных измерений токовой характеристикой процесса, например снятие вольт-амперной характеристики электронных ламп или кристаллических триодов.

Рассмотрим основные применения осциллографа.

Измерение напряжения. Процесс измерения весьма прост. На вход прибора подается измеряемое напряжение, после чего производится вычисление по формуле

$$U = \frac{h}{S},$$

где h — отклонение луча;

S — чувствительность осциллографа, мм/в¹.

¹ Чувствительность осциллографа определяется числом миллиметров, на которое отклоняется пятно на экране осциллографа при подаче на пластины

Развертка в процессе измерения может быть выключена. Преимуществами этого метода измерения являются высокое входное сопротивление прибора, безынерционность, возможность измерения амплитуд одиночных импульсов. Недостатком — относительно большая погрешность в связи с изменением чувствительности трубки или коэффициента усиления. При достаточности больших напряжений усилитель должен быть выключен.

При необходимости использования усилителя нужно предварительно точно знать коэффициент усиления и соответственно разделить на него полученный результат.

Измерение сопротивления. При отсутствии специальных приборов (омметров, мостов) измерения сопротивления можно производить с помощью осциллографа. Измерение сопротивления можно производить по схемам, указанным на рис. 35 и 36.

В первой из схем амплитуда падения напряжения на измеряемом сопротивлении сравнивается с амплитудой на известном эталонном переменном сопротивлении R_0 . Регулировкой последнего добиваются равенства напряжения. Очевидно, при этом $R_x = R_0$. Во второй схеме осциллограф просто служит нуль-прибором в 4-плечном мосте, равновесие которого достигается отсутствием смещения луча на экране. Неизвестное сопротивление рассчитывается по общей формуле

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

Подобным образом на осциллографе возможно измерение комплексных сопротивлений.

Измерение частоты. Измерение частоты с помощью электронно-лучевого осциллографа является одним из наиболее распространенных методов. Это объясняется тем, что при своей наглядности и простоте этот метод обладает высокой точностью. Суть метода заключается в том, что к одной паре пластин подводится измеряемая частота, а к другой — известная. При этом на экране получают фигуры Лиссажу, вид которых зависит от соотношения частот.

Пусть к пластинам подведены синусоидальные напряжения с равными частотами

$$x = A \sin \omega t,$$

$$y = B \sin (\omega t + \varphi),$$

где x и y — отклонение луча по горизонтали и вертикали;
 φ — сдвиг фаз.

напряжения в 1 в. Она обычно указана в паспорте каждого прибора или может быть определена экспериментально.

Преобразовывая выражения для x и y , получим

$$y = \frac{B}{A} (x \cos \varphi + \sin \varphi \sqrt{A^2 - x^2}). \quad (34,2)$$

Для $\varphi = 0$ и $\varphi = 180^\circ$ $y = \mp \frac{B}{A} x$, то есть на экране видим прямую с углом наклона α ($\alpha = \arctg \pm \frac{B}{A}$), при $B = A$ эллипс пере-

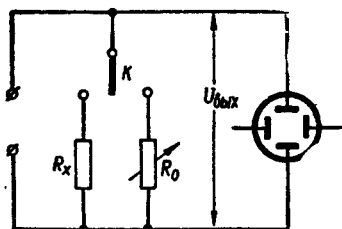


Рис. 35. Схема. I.

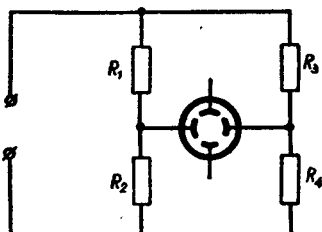


Рис. 36. Схема II.

ходит в окружность. Для $\varphi = 90^\circ$ или $\varphi = 270^\circ$ получаем

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1.$$

В случае неравенства частот на осциллографе возникают более сложные фигуры (фигуры Лиссажу), которые для кратных частот имеют вполне определенную форму, из вида которых можно вполне точно определить подаваемую частоту.

Измерение фаз. Пусть имеем два напряжения одинаковой частоты со сдвигом фаз (именно такие напряжения вызывают на практике необходимость измерения сдвига фаз)

$$U_1 = U_1^* \cos(\omega t + \varphi_1), \quad U_2 = U_2^* \cos(\omega t + \varphi_2).$$

Сдвиг по фазе между U_1 и U_2 равен $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Как известно, если одно из напряжений подать на вертикальные, а другое на горизонтальные пластины, то получится изображение в виде эллипса, положение которого зависит от сдвига фаз и отношения амплитуд приложенных напряжений.

Действительно, подставляя в (34,2) $y = 0$, получим

$$\varphi = \mp \arcsin \frac{x}{A},$$

где x — расстояние от центра экрана (точка 0) до точки пересечения эллипса с осью x (точка B);

A — максимальное отклонение эллипса в точке C (рис. 37).

Однако рассмотренный метод не дает возможности непосредственно определить знак фазового сдвига и, кроме того, обладает значительной погрешностью (до 10%).

Исследование характеристик электронных ламп и полупроводниковых приборов. Осциллографические методы исследования характеристик помимо существенного ускорения, наглядности и удобства регистрации обладают еще целым рядом преимуществ. Благодаря безынерционности измерительного процесса можно

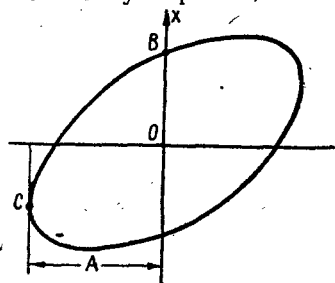


Рис. 37. К измерению фаз.

давать еще целым рядом преимуществ. Благодаря безынерционности измерительного процесса можно

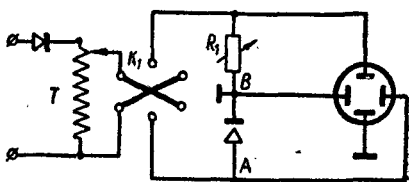


Рис. 38. Схема измерения параметров полупроводникового выпрямителя на осциллографе.

снимать анодные характеристики кристаллических триодов выше пределов допустимой мощности рассеяния, ибо сам процесс происходит очень быстро; по этой же причине стало возможным снятие пиковых значений мощности импульсных ламп, значения которой в 1000 раз превосходит среднюю мощность. Осциллограф не заменим при снятии динамических характеристик ионных приборов, которые, как известно, значительно точнее статических.

Рассмотрим принципы снятия характеристик полупроводниковых устройств (диоды, фотодиоды и т. п.).

Снятие характеристики полупроводниковых диодов и фотодиодов. Снятие характеристики полупроводникового выпрямителя можно производить по схеме, приведенной на рис. 38.

На горизонтальный вход осциллографа подается пульсирующее напряжение, направление которого можно менять с помощью ключа K_1 , причем высота импульса соответствует максимальному значению обратного напряжения U . На вертикальный вход подается напряжение, снимаемое с сопротивления R_1 , пропорциональное току диода. Величину R_1 следует выбирать возможно меньшей, чтобы избавиться от паразитных емкостей источников питания. Величину подаваемого напряжения можно изменять с помощью автотрансформатора или реостата. Сопротивление R_1 лучше всего подбирать в зависимости от внутреннего сопротивления диода с таким расчетом, чтобы можно было выяснить изменение I и U при различных его значениях. В случае фотоэлемента, включенного в фотодиодном режиме, на

экране можно наблюдать изменение вида характеристики в зависимости от уровня освещенности и тем самым определить люкс-амперную характеристику фотоэлемента. Подбором R_1 можно выяснить интервал допустимых нагрузочных сопротивлений данного фотоэлемента.

Снятие характеристик полупроводниковых триодов. Для снятия характеристик полупроводниковых триодов можно реко-

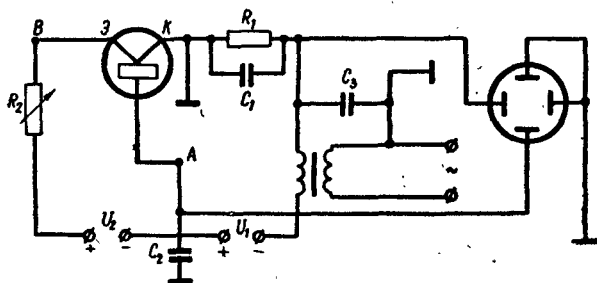


Рис. 39. Схема измерения параметров триода.

мендовать схему на рис. 39. Характеристика $I_K = f(U_K)$ снимается при $I_A = \text{const}$.

В общем случае для снятия триодных характеристик необходим осциллограф с симметричным входом и дополнительными устройствами в виде электронного переключателя и различных генераторов пилообразных напряжений.

К практическому применению осциллографа мы еще вернемся во втором разделе практикума.

§ 5. Измерение магнитных величин

Остановимся лишь на измерениях магнитного потока и напряженности магнитного поля постоянных магнитов, как величин наиболее часто встречающихся в лабораторной практике. Рассмотрим два метода измерения магнитного потока: с помощью калиброванной катушки и баллистического гальванометра и измерение магнитного потока с помощью флюксметра.

Метод калиброванной катушки и баллистического гальванометра

В основе метода лежит измерение заряда, возникающего при пересечении магнитных силовых линий магнитного поля пробной катушкой.

Для измерения необходимы пробная катушка и гальванометр.

Действительно, пусть баллистический гальванометр соединен с

катушкой. При изменении потока Φ в катушке индуцируется э. д. с. E , она равна

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt},$$

где n — число витков катушки;

Φ — магнитный поток.

Но E уравнивается падением напряжения на омическом и реактивном (индуктивном) сопротивлении катушки

$$E = ir + L \frac{di}{dt},$$

где r — сопротивление всей цепи гальванометра, в том числе и внутреннее сопротивление гальванометра;

r_g — внутреннее сопротивление гальванометра;

r_t — внешнее сопротивление, то есть сопротивление катушки;

i — мгновенное значение силы тока в цепи;

L — индуктивность цепи.

Сопоставляя эти уравнения, получим

$$ir + L \frac{di}{dt} = -n \frac{d\Phi}{dt}.$$

Интегрируя уравнение в пределах от 0 до τ ,

$$\int_0^{\tau} ir dt = -n \cdot \int_0^{\tau} \frac{d\Phi}{dt} dt, \quad (35,2)$$

ибо $\int_0^{\tau} L \frac{di}{dt} dt = 0$, так как $i_0 = i_t = 0$ (ток в начале и конце измерения равен нулю).

Но

$$\int_0^{\tau} i dt = Q, \quad (36,2)$$

то есть количество электричества, протекающее за время изменения потока Φ . Интеграл

$$-\int_0^{\tau} \frac{d\Phi}{dt} dt = -\int_0^{\tau} d\Phi = \Phi_0 - \Phi_{\tau} = \Delta\Phi \quad (37,2)$$

равен разности потоков, пронизывающих контур в начале и конце измерения. Тогда, подставляя (36,2) и (37,2) в (35,2), получим

$Q\tau = n\Delta\Phi$, но $Q = C_b\alpha$, откуда

$$\Delta\Phi = \frac{C_b\alpha}{n} \cdot \tau,$$

где C_b — баллистическая постоянная;

α — отклонение гальванометра.

Но

$$\Phi = B\Delta S.$$

где B — магнитная индукция;

ΔS — площадь рамки.

Таким образом, получаем выражение для магнитной индукции

$$B = k \frac{C_b \cdot \tau \cdot \alpha}{n \cdot \Delta S},$$

где k — коэффициент, зависящий от единиц измерения.

Что касается методики измерения, то катушка должна быть изготовлена такой формы, чтобы ее было удобно вносить в межполюсное пространство. Если предполагаем достаточно большую напряженность поля, катушку можно изготовить из одного-двух витков медной проволоки диаметром $0,6 \div 0,8$ мм. В случае малых напряженностей поля для обеспечения заметного отклонения на плоский каркас из изоляционного материала (карболит, текстолит, эбонит и т. д.) наматывается тонкая проволока $0,05$ — $0,02$ с числом витков от 10 до 40 (рис. 40). При этом изменение потока можно получать как путем выдергивания катушки из поля, так и путем ее поворачивания в нем; а также путем включения и выключения поля.

Первые два метода применяются реже, так как при выдергивании катушки трудно при повторном измерении поместить катушку в то же самое место; поворот же катушки бывает просто невозможно осуществить из-за узости межполюсного промежутка, кроме того, вызывает затруднение поворот рамки точно в первоначальное положение без специальных приспособлений. Поэтому чаще всего применяется метод включения и выключения поля (замыкание и размыкание тока, идущего через обмотки электромагнита). Катушка при этом закреплена между полюсами электромагнита. В некоторых случаях при этом после включения поля на катушку будет действовать остаточный магнетизм полюсных наконечников. Во избежание ошибки можно измерять отклонение гальванометра при перемене направления тока в электромагните на обратное. При этом действие остаточного поля полюсных наконечников автоматически компенсируется.

Действительно, пусть полное поле в прямом направлении будет равно H , оно складывается из напряженности внешнего

поля H_B и поля остаточного магнетизма H_0

$$H = H_B + H_0.$$

При включении тока в обратном направлении молекулярные диполи повернутся и, следовательно, остаточное поле

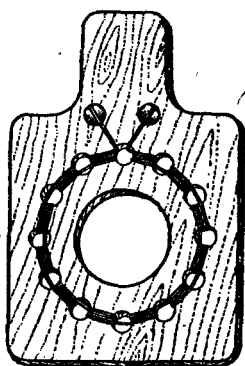


Рис. 40. Пробная катушка.

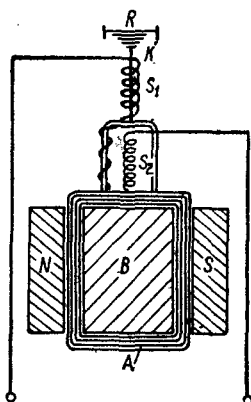


Рис. 41. Эскиз флюксметра.

будет действовать в обратную сторону; общее поле будет $-H = -H_B + H_0$. Следовательно, при переключении поля $H = -(-H) = 2H_B$, то есть поле остаточного магнетизма будет скомпенсировано.

Измерение магнитного поля с помощью флюксметра

Для измерения характеристик магнитного поля вместо баллистического гальванометра часто употребляется флюксметр. Флюксметр — это магнитноэлектрический гальванометр, в котором противодействующий момент закручивания подвеса L сведен до минимума. По сравнению с электромагнитным торможением величиной L можно пренебречь в обычных условиях работы флюксметра, то есть, когда последний замкнут на небольшое сопротивление и сильно переуспокоен. Устройство флюксметра изображено на рис. 41. Подвижная катушка с обмоткой A подвешена на коконовой нити K и спиральной пружине R , последняя служит для ослабления толчков и сотрясений прибора. Ток в катушке подводится через две цилиндрические спирали S_1 и S_2 из тонкой серебряной нити. Катушка помещена в узком зазоре, образованном постоянным магнитом $N-S$ и железным сердечником B . В зазоре $N-S$ получается в достаточной мере сильный, однородный и радиально направленный магнитный поток. С катушкой связана стрелка,

которая при повороте катушки перемещается над двусторонней шкалой с равномерными делениями. Для арретирования подвижной части имеется специальное механическое приспособление.

Шкала флюксметра градуируется непосредственно в единицах измерения магнитного потока.

Как следует из теории флюксметра, величина отклонения пропорциональна изменению магнитного потока

$$\Delta\Phi = C\alpha,$$

где C — постоянная флюксметра вычисляется по формуле

$$C = \frac{1}{n} \left(\frac{P_2}{\Phi} + P_1 \right),$$

где P_2 — удельный момент сопротивления воздуха;

Φ — поток постоянного магнита флюксметра;

P_1 — коэффициент электромагнитного успокоения;

n — число витков пробной катушки.

Под α следует понимать то число делений по шкале, на которое переместится стрелка флюксметра. Ввиду того, что флюксметр практически не имеет направляющего момента, то стрелка может занимать любое положение на шкале, и только с помощью арретира можно привести ее на нуль; поэтому

$$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1,$$

где α_1 — число делений, которое указывала стрелка до отклонения;

α_2 — показания стрелки после измерения.

Из конструктивных особенностей и теории флюксметра вытекают его характерные свойства: во-первых, постоянная C не зависит от сопротивления, на которое замкнут флюксметр, если это сопротивление не превышает сопротивления обмотки флюксметра; во-вторых, отклонение флюксметра не зависит от времени изменения измеряемой напряженности поля, оно одинаково вплоть до изменения магнитного потока продолжительностью до 10 сек; в-третьих, стрелка флюксметра в конце отклонения останавливается и может так оставаться практически сколько угодно долго, что значительно упрощает наблюдения; в-четвертых, установка флюксметра весьма легкая и простая работа не требует тех усилий, которые нужны для установки гальванометра.

Все эти условия обеспечили флюксметру широкое применение в лабораторной практике. Флюксметр может применяться везде, где для магнитных измерений применяется баллистический гальванометр, но при этом, как мы уже указывали, сопро-

тивление измерительной катушки, на которую замкнут флюксметр, не должно быть больше его внутреннего сопротивления.

Широко применяется флюксметр при определении кривых намагничивания, при измерении остаточного магнитного потока, так как его показания не зависят от времени снятия магнитного поля.

Градировка приборов

Прежде чем приступить к работе с новым, еще не известным прибором, необходимо проградуировать его, то есть сравнить с уже точно проверенным прибором. В особенно частой градуировке нуждаются такие приборы, которые обладают высокой точностью измерения, например микроамперметры, гальванометры и т. п.

Градировка флюксметра в единицах магнитного потока выполняется экспериментально при помощи образцовой катушки самоиндукции (схема рис. 42).

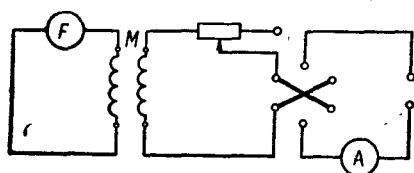


Рис. 42. Схема для градуировки флюксметра.

Вторичная обмотка катушки взаимной индукции включается непосредственно на флюксметр, первичная — через реостат, амперметр и переключатель в сеть постоянного тока ($U=6$ в). Сопротивление вторичной обмотки катушки взаимной индукции не должно превосходить предельного значения сопротивления для данной конструкции флюксметра. Установив некоторый ток (несколько десятков *ма*), изменяют его величину или направление и в этот момент наблюдают отклонение стрелки флюксметра. Изменение магнитного потока, сцепленного с вторичной обмоткой катушки взаимной индукции, вычисляется по формуле

$$\Delta\Phi = \Delta I M, \quad (38,2)$$

где ΔI — изменение тока в первичной цепи;

M — взаимная индукция,

$\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, *вб*.

При включении или выключении тока (от нуля до I или обратно) считаем $\Delta I = I$. При изменении направления тока $\Delta I = 2I$. Но, как известно,

$$\Delta\Phi = C\alpha,$$

где C — постоянная флюксметра.¹ Сравнивая с (38,2), находим

¹ Обычно постоянная C дается в паспорте прибора для милливеберметра (флюксметра) порядка 10^{-4} *вб/дел*.

$$C = \frac{\Delta IM}{\alpha}.$$

Делая несколько измерений при различных силах тока и получая различные значения отклонения, определяем среднее значение постоянной C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические и магнитные измерения. Под ред. Е. Г. Шрамкова. Госэнергоиздат, М., 1948.
2. А. М. Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. ГИИТЛ, М., 1954.
3. К. Б. Караидеев. Мостовые схемы. Госэнергоиздат, 1949.
4. А. М. Турчин. Электрические измерения. Госэнергоиздат, М., 1961.
5. И. М. Вишенчук, Е. П. Соголовский, Б. И. Швецкий. Электроно-лучевой осциллограф и его применение в измерительной технике. Физматгиз, М., 1959.
6. Электрические измерения. Под ред. Фремке. Госэнергоиздат, М., 1963.
7. Р. А. Валитов. Радиотехнические измерения. «Советское радио», М., 1963.
8. Л. Б. Устинова. Электрометрические усилители. ПТЭ. № 4. 1961, стр. 5.
9. Ф. И. Барсуков. Генераторы и селективные усилители низкой частоты. «Энергия», 1964.
10. Л. Н. Герцригер и И. А. Лифшиц. Избирательный высокочувствительный усилитель. ПТЭ. № 5, 1961, стр. 97.
11. Ю. И. Грибанов. Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений. Госэнергоиздат, М., 1961.
12. И. Я. Брейда. Ламповые усилители сигналов постоянного тока. Госэнергоиздат, М., 1961.
13. Шпурин. Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам. Воениздат МО СССР, М., 1953.
14. Шпурин. Справочник по новым электроизмерительным приборам. Воениздат МО СССР, 1964.
15. Ю. И. Грибанов. Измерение напряжения в высокоомных цепях. Госэнергоиздат, М., 1961.
16. Фотогальванометрические компенсационные приборы. «Энергия», М., 1964.
17. А. Г. Алексеев, В. Н. Прохоров и К. В. Мутков. Электронные приборы и схемы в физико-химическом исследовании. Госхимиздат, 1961.

Глава 3

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В современных физических лабораториях измерение оптических величин встречается так же часто и имеет такое же большое значение, как измерение электрических, магнитных и др. Несколько узкий круг вопросов, затронутый в настоящей главе, обусловлен определенной направленностью и рамками данного пособия, то есть рассмотрены только те вопросы, которые так или иначе связаны с лабораторными заданиями данного практикума.

§ 1. Источники света

Техника физического эксперимента предъявляет источникам света самые разнообразные условия, удовлетворить которые подчас бывает очень трудно. Тем более трудно найти источник света, который бы удовлетворил сразу всем условиям. Другими словами, современная техника физического эксперимента не знает универсальных источников света.

Остановимся на некоторых источниках света, применяемых в физическом эксперименте (технике). Знание особенностей каждого из них дает возможность сознательно выбрать один из них, необходимый для решения той или иной конкретной задачи.

1. Первым источником света, на котором следует остановиться, является Солнце. Солнце — источник света, распределение энергии в спектре которого (на уровне Земли) приближается к распределению энергии для излучения абсолютно черного тела при температуре $5400 \div 5500^\circ \text{K}$. Солнце, пожалуй, самый яркий источник. Его световая отдача 80 лм/вт . Кроме указанных, положительных качеств, Солнце обладает еще одним — это идеальный точечный источник света в условиях земного эксперимента.

Лучами Солнца пользуются или непосредственно или направляют их в нужную сторону при помощи системы зеркал (гелиостат).

2. К тепловым источникам света относятся электрические лампочки накаливания. Самым удобным источником белого

света являются вольфрамовые лампы накаливания. Их отдача 10—12 лм/вт.

Все вольфрамовые лампы накаливания дают излучение, близкое к излучению абсолютно черного тела. Спектр последнего можно довольно точно определить по формуле Вина — Планка

$$I_{\lambda} d\lambda = 1,77 \cdot 10^{-12} Q \cdot \lambda^{-5} e^{-\frac{(1,432)^2}{\lambda T}} d\lambda,$$

где I_{λ} — спектральная плотность излучения, *вт/стер*;

$d\lambda$ — ширина спектрального участка, *см*;

Q — площадь источника, *см²*.

Так называемую ленточную лампу (у нее легко подсчитать площадь источника) нетрудно изготовить в лаборатории. Конструкция ее ясна из рис. 43.

Такие лампы пригодны для работы в области от 250 мкм до 5 мк (вольфрамовые лампы в стеклянном баллоне дают непрерывный спектр в области 310—2500 мкм).

При любом употреблении, особенно при фотометрических измерениях, лампу накаливания следует питать от батареи аккумуляторов большой емкости или, в крайнем случае, от хорошо стабилизированного выпрямителя, или через буферную схему (то есть батарея аккумуляторов включается параллельно выпрямителю).

К тепловым источникам света также относятся штифты, сетки накаливания и пламя. Из трех названных источников света чаще пользуются последним. В табл. 4 приведена температура средней части пламени.

3. К другому типу источников света относятся электрические дуги и искра. Преимущество электрических дуг перед другими источниками света заключается в том, что они имеют большую яркость (по сути дела являются разновидностью тепловых источников света). Некоторые специальные конструкции дуг дают яркость большую, чем яркость Солнца. Их основной недостаток — малая стабильность работы. Электрические дуги в основном применяются в спектроскопии. Разновидностью электрической дуги является искра. Искра — это периодический дуговой разряд, применяемый в специальных целях.

Наша промышленность выпускает стационарные установки для получения дуговых и искровых разрядов. Это дуговые генераторы ДГ-2 и ПС-39 и искровые ИГ-1 и ИГ-2.

4. Отдельный тип составляют газосветные источники света. Сюда относятся газосветные трубки тлеющего разряда (водо-

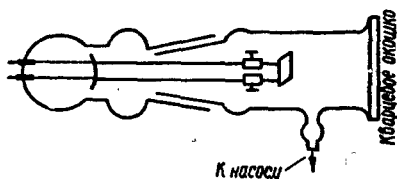


Рис. 43. Схема ленточной лампы.

родные, с парами металлов и с тяжелыми инертными газами — СВД), ртутные лампы низкого, высокого и сверхвысокого давления (СВД), люминисцентные лампы.

Подробнее остановимся на ртутных лампах сверхвысокого давления (СВД). Ртутные кварцевые лампы типа СВД состав-

ляют особый интерес в том отношении, что успешно могут конкурировать с электрическими дугами открытого типа, имея ряд преимуществ перед ними и будучи свободными от недостатков последних. Физические процессы в лампе типа СВД мало чем отличаются от таковых в открытой электрической дуге.

Лампы типа СВД изготавливаются разной мощности — от 75 *вт* до 5000 *вт* (при давлении 25—100 *атм*). Более мощные лампы, работающие под давлением 200—300 *атм*, требуют специального водяного охлаждения.

В лабораторной практике часто применяются ртутные кварцевые лампы типа СВД на 250 и 1000 *вт*. Они выпускаются нашей промышленностью под марками СВДШ-250 и СВДШ-1000. На рис. 44 приведен общий (схематический) вид лампы СВДШ-250¹.

Лампа состоит из кварцевой колбы 1 с впаянными в нее двумя вольфрамовыми токоведущими электродами 2 и электродом поджига 3. Электроды соединяются с цоколями лампы 4 и 5 посредством впаянных в кварц отрезков молибденовой фольги 6 и 7.

Внутри колбы лампы находится определенное дозированное количество ртути. Лампа заполнена аргоном. При дуговом разряде в парах ртути между концами токоведущих электродов лампа дает как видимое, так и ультрафиолетовое излучение.

В первый момент поджига дуга возникает в атмосфере аргона. После нескольких минут горения дуги ртуть в лампе испаряется и в дальнейшем разряд происходит в атмосфере паров ртути при давлении 25—33 *атм*.

Таблица 4

Питание	Т° К
Светильный газ+воздух	2100
Светильный газ+кислород	3000
Ацетилен+воздух	2600
Ацетилен+кислород	3300

¹ В настоящее время эти лампы имеют маркировку ДРШ-250, ДРШ-1000, а также ДРШ-500.

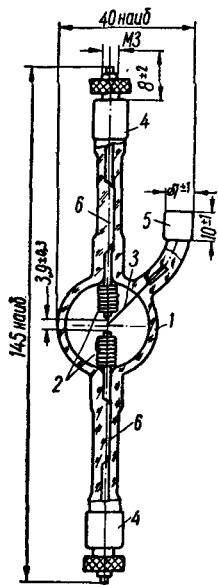


Рис. 44. Ртутная кварцевая лампа.

Основные электрические и световые параметры лампы даны в табл. 5.

Таблица 5

Наименование параметров	Единицы измер.	Номин. знач.	Наиб. значен.	Наим. значен.
Мощность лампы	вт	250	—	—
Напряжение на лампе	в	72	87	57
Световой поток	лм	10000	—	8000
Яркость в центре столба разряда	сб	15000	—	9000

Вначале, после включения лампы в электрическую сеть (пусковой период), ее электрические и световые параметры несколь-

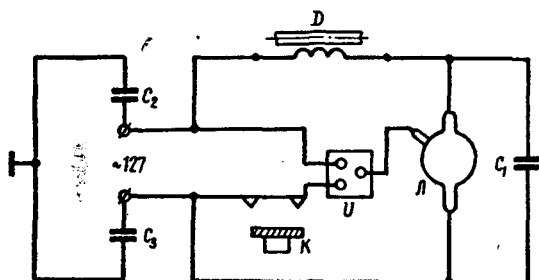


Рис. 45. Схема включения кварцевой лампы СВДШ-250:

D — дроссель; L — лампа СВДШ-230-3; K — кнопочный выключатель; U — индуктор для поджига ламп; C_1 — конденсатор для шунтирования ламп емкостью 0,05 мкф, на рабочее напряжение не менее 250 в; C_2 — C_3 — конденсаторы для блокировки сети на землю емкостью 0,5 мкф, на рабочее напряжение не менее 250 в.

ко изменяются, а затем приобретают значения, указанные в табл. 4.

Лампа СВДШ-250 предназначена для работы на переменном токе и включается последовательно с дросселем в сеть с напряжением 127 в по схеме, указанной на рис. 45.

Для зажигания лампы необходимо включить на короткое время (не более одной минуты) индуктор с длиной искры 15—20 мм, пользуясь добавочным кнопочным выключателем K . После возникновения дугового разряда между токоведущими электродами индуктор выключается. Нормальное рабочее положение лампы — вертикальное, цоколем электрода поджига вверх (допустимое отклонение от вертикального положения 10°). Лампа крепится за цоколи токоведущих электродов. Между проводом от индуктора и цоколем электрода поджига не требуется

надежного электрического контакта, ввиду чего соответствующее соединение может быть выполнено с помощью колпачка или проволочного кольца.

Нормальное зажигание и загорание лампы происходит при температуре окружающего воздуха не ниже 20°C и напряжении сети не ниже 115 в.

Лампа может работать в ограниченном объеме (кожухе) при условии, что размеры кожуха и условия его вентиляции таковы, что температура воздуха на расстоянии 75 мм от центра лампы (в экваториальной плоскости) не превышает 250°C (в установившемся режиме). Для повторного зажигания лампы после ее включения требуется не более 5—6 мин. Кварцевое стекло лампы легко теряет свою прозрачность при загрязнении его поверхности (например, после прикосновения к ней руками, запылении и пр.). Ввиду этого в случае загрязнения колбы необходимо перед включением протереть колбу ватой, увлажненной спиртом.

При работе с лампой типа СВД следует помнить о возможности взрыва баллона лампы. Для предотвращения несчастного случая следует принимать меры предосторожности: лампа вставляется в сеточный или металлический цилиндр, в последнем случае цилиндр должен быть достаточно просторен и вентилируем, чтобы лампа не перегрелась.

§ 2. Измерение спектров поглощения. Оптические устройства

Взаимодействие света с веществом прежде всего проявляется в процессе поглощения (абсорбции) света, излучения света (эмиссии, люминисценции), рефракции (процессе преломления), поляризации, рассеянии света.

Перечисленные свойства света количественно характеризуют «степень взаимодействия» света с веществом и зависят как от природы самого вещества (его химических и физических свойств), так и от длины световой волны, которая взаимодействует с веществом.

В настоящем параграфе остановимся подробно только на абсорбции света. В основе абсорбционных измерений лежит закон Бугера

$$I = I_0 e^{-k d}.$$

Коэффициент k измеряется в обратных сантиметрах и показывает степень ослабления интенсивности падающего пучка I_0 на единицу толщины (I — интенсивность излучения, прошедшего через образец).

Если пользоваться десятичными логарифмами, то можно рассчитать коэффициент k

$$k = \frac{2,303}{d} \lg \frac{I_0}{I}.$$

Итак, чтобы экспериментально измерить k , необходимо измерить I и I_0 , что, как правило, не удастся из-за целого ряда причин объективного характера (потери при многократном отражении от передней и задней стенок кристалла и т. п.).

Если учесть многократные отражения от поверхностей и в середине поглощающего слоя, то закон поглощения будет иметь вид

$$I = I_0 \frac{(1 - x)^2 e^{-kd}}{1 - x^2 e^{-2kd}},$$

где x — показатель отражения поверхности. Если учесть, что $1 \gg x^2 e^{-2kd}$, то можно пользоваться выражением

$$I = I_0 (1 - x)^2 e^{-kd}.$$

Отсюда ясно, что для того чтобы получить точные экспериментальные результаты, необходимо проводить измерения как для поглощения, так и для отражения.

Для примера на рис. 46 приведен спектр поглощения аддитивно окрашенного кристалла KCl при температуре 18°K .

Спектры поглощения измеряются спектрофотометрическими методами, из которых различают визуальный, фотографический и электрический. Так как последний метод (электрический) в современной лаборатории практически вытеснил два предыдущих, то остановимся только на нем.

Прибор для измерения спектров поглощения — спектрофотометр — состоит из двух основных частей: монохроматора и фотоприемника. В случае электрического метода фотоприемниками служат фотоэлементы, термоэлементы, термо- или фотосопротивления в комплекте с усилительной электросхемой. Преимущество электрического метода заключается еще и в том, что при его использовании нетрудно осуществить автоматическую регистрацию измерений.

Основная составляющая часть спектрофотометра — монохроматор, при помощи которого можно осуществить выделение узкого участка спектра, то есть получить монохроматический свет.

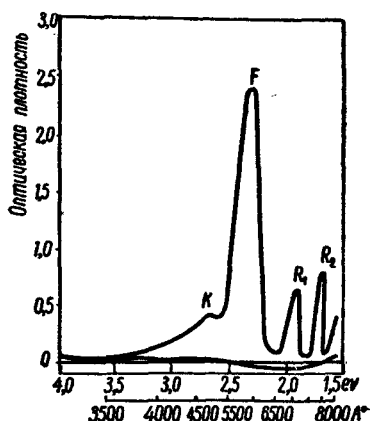


Рис. 46. Спектр поглощения KCl (18°K).

По принципу устройства монохроматоры бывают одинарные и двойные. Двойной монохроматор — это, другими словами, два монохроматора, соединенные вместе. В таком (двойном) монохроматоре монохроматический свет получается большей спектральной чистоты, но следует помнить, что коэффициент

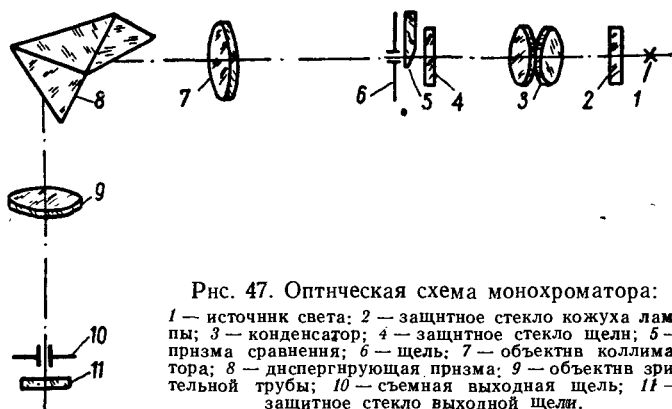


Рис. 47. Оптическая схема монохроматора:

1 — источник света; 2 — защитное стекло кожуха лампы; 3 — конденсатор; 4 — защитное стекло щели; 5 — щель; 6 — призма сравнения; 7 — объектив коллиматора; 8 — диспергирующая призма; 9 — объектив зрительной трубы; 10 — съемная выходная щель; 11 — защитное стекло выходной щели.

пропускания одинарного монохроматора достигает 45%, а двойного — не более 20%.

Наша промышленность выпускает целый ряд монохроматоров различного назначения. Остановимся на довольно часто

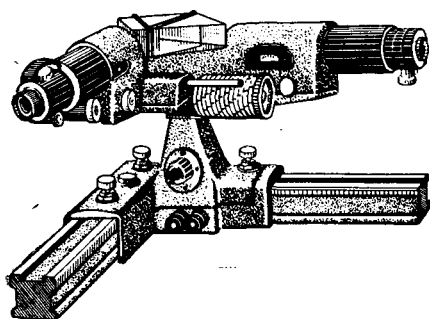


Рис. 48. Общий вид монохроматора.

встречающемся в научно-исследовательских и заводских лабораториях монохроматоре марки УМ-2 (универсальный монохроматор с расчетным диапазоном спектра 3800—10 000 Å). Оптическая схема монохроматора изображена на рис. 47.

Свет через входную щель падает на объектив коллиматора и параллельным пучком проходит через диспергирующую призму. Под прямым углом к падающему пучку света помещается выходная труба монохроматора. Поворачивая призмный стол на различные углы относительно падающего пучка света, получают в выходной щели свет различной длины волны, проходящий через призму с минимальным отклонением.

На рис. 48 изображен общий вид монохроматора без верхней защитной крышки призмы. При работе с монохроматором

в качестве источника света применяется лампа накаливания 12 в, 30 вт, дающая сплошной спектр.

Для градуировки прибора служит ртутно-кварцевая лампа СВДШ-250, дающая линейчатый спектр. Такая лампа с пусковым устройством обычно входит в комплект монохроматора, как и целый ряд дополнительных кювет с держателями, конденсоры и фотоэлектрическое устройство, дающее возможность использовать прибор как спектрофотометр.

Более совершенным прибором для снятия спектров поглощения является спектрофотометр типа СФ-4 с кварцевой и стеклянной оптикой, которая дает возможность работать в широком диапазоне спектра (2100—20 000 Å). Источником излучения в зависимости от участка спектра, на котором производится измерение, служит или водородная лампа в увиолевом баллоне, или кварцево-ртутная лампа, или лампа накаливания. В зависимости от участка спектра фотоприемниками служат или сурьмяно-цезиевый фотоэлемент типа СЦВ-6 (210—650 мкм) или кислородно-цезиевый в стеклянном баллоне (600—1100 мкм), фотоэлементы включаются в цепь усилителя постоянного тока.

§ 3. Фотоэлементы и фотоумножители

Как видно, фотоэлементы наряду с термоэлементами и фотопластинками играют значительную роль в физической лаборатории как приборы для регистрации измерения лучистой энергии.

Основной характеристикой фотоэлемента является его чувствительность к излучению, которая определяется величиной тока, вызываемой единицей светового потока. А так как освещенность измеряется либо в фотометрических единицах (лм), либо в энергетических (вт), то единицей чувствительности фотоэлемента является 1 а/вт , или 1 а/лм для видимой части спектра.

Различается два вида чувствительности — интегральная и спектральная. *Интегральная чувствительность* — это усредненная чувствительность по всему спектру излучения. Поэтому за интегральную чувствительность принимают величину фототока, получаемую в результате падения светового потока в 1 лм от лампы накаливания с цветовой температурой нити в 2850° К

$$K = \frac{I}{\Phi},$$

где I — фототок, а;

Φ — световой поток, лм.

Указание на температуру нити существенно, потому что каждой температуре соответствует свое спектральное распределение излучения.

Спектральная чувствительность — это чувствительность к строго определенной длине волны излучения. Она также выражается в $\lambda/\text{люкс}$ или в а/вт . График зависимости чувствительности от λ называется спектральной характеристикой. Причем

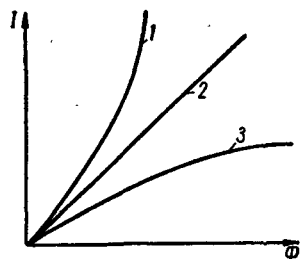


Рис. 49. График люкс-амперных характеристик:

1 — сверхлинейность; 2 — линейность; 3 — сублинейность.

в области максимума спектральной чувствительности фотозадающий элемент обладает наибольшим коэффициентом полезного действия. Именно поэтому для каждой спектральной области желательно использовать соответствующий фотоиндикатор.

Кроме спектральной и интегральной чувствительности, очень важными факторами, определяющими качество фотозадающего элемента, являются следующие.

Электрические характеристики.

Люкс-амперная характеристика. Люкс-амперная характеристика, как говорит

само название, определяет собой зависимость фототока от интенсивности падающего света. Для измерительных целей весьма желательно, чтобы она была линейной, то есть сила фототока строго пропорциональна освещенности. Однако на практике часто наблюдаются отступления от линейности. Более быстрый рост фототока, чем освещенности, часто называют сверхлинейностью, а более медленный рост фототока — сублинейностью (рис. 49).

Вольт-амперные характеристики показывают зависимость тока от приложенного напряжения. Они описывают характер процессов, происходящих в фотозадающем элементе, и тем самым указывают на изменение чувствительности с изменением приложенного напряжения.

Для практических целей удобнее, чтобы чувствительность не менялась с изменением приложенного напряжения. Этим свойством обладают вакуумные фотозадающие элементы, фотодиоды и фототриоды.

Под частотной характеристикой подразумевается способность фотозадающего элемента реагировать на частоту переменных световых сигналов. Обычно чувствительность фотозадающих элементов уменьшается с ростом частоты падающего светового потока. Та частота, при которой фотозадающий элемент меняет на 50% свою чувствительность, считается частотной границей фотозадающего элемента. Частотная характеристика имеет существенное значение при работе с быстроменяющимися световыми потоками, например, в кино, телевидении и т. д.

Постоянство характеристик, утомляемость, срок службы и старение фотоэлементов. Вопрос постоянства характеристик, в первую очередь интегральной чувствительности, является чрезвычайно важным для практического использования фотоэлемента. Он указывает, насколько стабильно будет работать то или иное устройство с данным фотоэлементом. Под утомляемостью и старением подразумевается степень уменьшения чувствительности со временем. Однако, если утомляемость явление обратимое и может длиться часы или даже минуты, то старение явление необратимое, приводящее к постепенному уменьшению чувствительности фотоэлемента и которое может длиться месяцы и годы. Все это необходимо учитывать для правильной эксплуатации и определения срока службы фотоэлемента.

Температурная зависимость определяет тот интервал температуры, при которой применим тот или иной фотоэлемент, тем самым соответственно расширяя или сужая область его применения. Обычно с ростом температуры чувствительность у ряда фотоэлементов резко падает, что ограничивает пределы их использования до 60—70° С.

Предел чувствительности. Для всех фотоэлементов существует верхний и нижний предел освещенности. Верхний предел определяется теми необходимыми изменениями, которые происходят в фотоэлементе под действием света. Нижний предел чувствительности определяется уровнем внутренних шумов фотоэлемента и структурой материала.

В современной физической лаборатории применяются три класса фотоэлементов: фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотоэлементы с внутренним фотоэффектом или фотосопротивления и вентильные фотоэлементы.

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

Первыми на службу науке и технике пришли фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Устройство такого фотоэлемента ясно из рис. 50. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом подразделяются на вакуумные и газонаполненные. Такие фотоэлементы нуждаются во внешнем источнике напряжения (80—100 в для вакуумных и 250—300 в для газонаполненных). Спектральная чувствительность различных типов фотоэлементов с внешним фотоэффектом представлены на рис. 51. Ось ординат изображает среднюю эмиссию фотоэлементов при заданной длине световой волны. Как видно из рисунка, самой широкой полосой частот обладают кислородно-цезиевые фотоэлементы, однако и они имеют существенный недостаток — значительный темновой ток (10^{-9} а), что затрудняет измерение при слабом источнике света.

Для увеличения чувствительности фотоэлементов с внешним фотоэффектом их часто наполняют благородным газом, что повышает их чувствительность в 5—10 раз. Однако при этом зависимость показаний фотоэлемента от освещения теряет линейность, кроме того, возрастает темновой ток. При работе с газонаполненными фотоэлементами следует помнить, что в

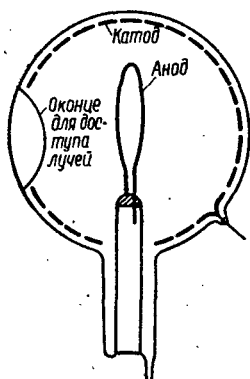


Рис. 50. Принципиальное устройство фотоэлемента с внешним фотоустройством.

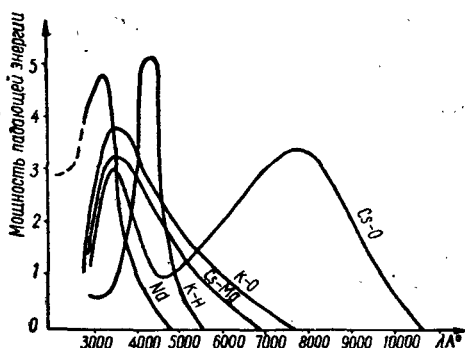


Рис. 51. Графики спектральной чувствительности различных фотоэлементов.

цепь анод — катод следует включать защитное сопротивление $\sim 10^6$ ом, необходимое для предотвращения появления тлеющего разряда.

Вольт-амперные характеристики вакуумных фотоэлементов напоминают характеристики электронных ламп с ясно выраженной областью насыщения, и, следовательно, чувствительность в широком интервале напряжений (40—60 в) не зависит от напряжения.

У газонаполненных фотоэлементов область тока насыщения зависит от давления газа, наполняющего фотоэлемент, и тем шире, чем больше последнее. Так, при давлении $3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. насыщение не имеет места, а при 8 мм рт. ст. область насыщения простирается до 150—160 в. Здесь происходит сложный механизм взаимодействия электронов с разной длиной свободного пробега и энергией, зависящими от давления газа и взаимодействия с атомами газа.

Что касается утомляемости и старения фотоэлементов с внешним фотоэффектом, она зависит от многих причин: материала катода (меньше для металлических, больше для оксидных), газовой среды и режима работы. Правильной эксплуатацией можно добиться, чтобы среднегодовое уменьшение чув-

ствительности не превышало 20%. До конца этот вопрос еще не изучен.

Температурная зависимость чувствительности у элементов с внешним фотоэффектом незначительна. В интервале от -40° до $+80^{\circ}$ С для бариевых катодов, и в интервале от -40° до

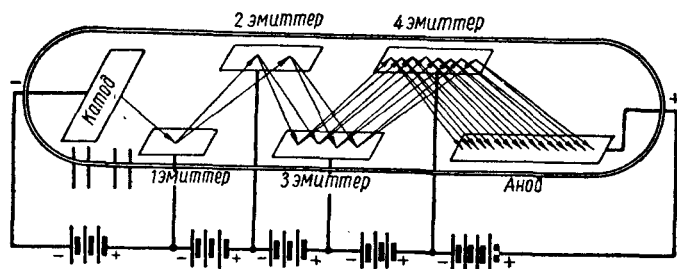


Рис. 52. Схема работы фотоумножителя.

$+50^{\circ}$ С для оксидно-цезиевых чувствительность практически не зависит от температуры.

Нижний предел чувствительности у вакуумных фотоэлементов составляет приблизительно 10^{-8} лм.

Своеобразным развитием фотоэлемента с внешним фотоэффектом является изобретенная в 30-х годах советским ученым Л. А. Кубецким, так называемая, вторично-электронная трубка (современное название фотоумножитель). Принцип действия фотоумножителя ясен из рис. 52.

Таблица 6

Тип фотоумножителя	Область спектр. чувствит., Å	Максимум чувствит., Å	Напряжение питания, в	Чувствит., мка/лм
ФЭУ-22	3700—10000	7500	1400	$3 \cdot 10^6$
ФЭУ-24	3200— 6000	4000	2000	$100 \cdot 10^6$
ФЭУ-27	3000— 8000	5000	2000	$100 \cdot 10^6$

В табл. 6 приведены данные некоторых фотоумножителей, выпускаемых нашей промышленностью для спектроскопии и спектрофотометрии.

Ценным качеством фотоумножителей является линейность их люкс-амперной характеристики.

Так как температурная зависимость, частотная характеристика, старение и утомляемость определяются свойствами фотокатода (фотокатоды у фотоумножителей и у фотоэлементов с внешним фотоэффектом одни и те же), то все сказанное в этом

отношении о фотоэлементах с внешним фотоэффектом справедливо и для фотоумножителей.

Благодаря наличию механизма усиления фототока предельную чувствительность фотоумножителей удалось повысить до 10^{-13} лм.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, фотосопротивления

Подобно вакуумным фотоэлементам фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления) резко меняют свой ток под действием падающего излучения.

Фотосопротивления обычно представляют собой образец из полупроводника или изолятора, лишенного каких-либо внутренних запорных слоев и источников э. д. с., а потому подчиняющийся в темноте закону Ома, то есть

$$\sigma_T = en_T u,$$

где σ_T — электропроводность, или проводимость образца в темноте;

e — заряд носителя тока с электрона или дырки;

n_T — концентрация носителей тока;

u — подвижность носителей тока.

Как показано в настоящее время, под действием света в образце появляются добавочные носители тока, в результате чего возникает добавочная проводимость σ_Φ

$$\sigma_\Phi = en_\Phi u,$$

где σ_Φ — проводимость, возникающая под действием света, или фотопроводимость;

n_Φ — концентрация носителей фототока.

Тогда полная проводимость при освещении выразится в виде

$$\sigma_n = \sigma_T + \sigma_\Phi = e(n_T + n_\Phi)u.$$

Повышение концентрации носителей, участвующих в проводимости, связано с тем, что под действием света связанные носители переходят в свободное состояние. Понятно, что такое появление добавочной проводимости возможно не только под действием света, но и под влиянием других ионизирующих излучений α - и β -частиц, γ -квантов, нейтронов, протонов и т. д.

Обычно в полупроводниках концентрация свободных носителей в темноте значительно меньше, чем на свету. Так, например, у CdS отношение фототока к темновому может составить 10^4 — 10^5 . Поэтому ясно, что фотосопротивления являются весьма ценными приборами.

Хотя к фотосопротивлению и применимо понятие интегральной чувствительности, как отношение фототока к падающему на фотоэлемент световому потоку, однако следует помнить,

что она резко зависит от приложенного внешнего напряжения. Поэтому имеет смысл говорить об интегральной чувствительности только с указанием приложенного напряжения.

Аналитически в большинстве случаев зависимость фототока от освещенности имеет вид

$$I_{\Phi} = B\Phi^a$$

(закон сублинейности), где $0 < a < 1$, что графически показано на рис. 49 (кривая 3). То есть интегральная чувствительность большинства фотосопротивлений убывает с увеличением светового потока.

Разнообразие спектральных характеристик у различных типов фотосопротивлений связано с тем, что спектральная чувствительность сильно зависит от структуры вещества фотосопротивления.

Вольт-амперные характеристики у большинства фотосопротивлений линейны, отступления от закона Ома обычно наблюдаются лишь при больших полях.

Явление фотопроводимости представляет весьма сложный процесс, в ходе которого носители неоднократно переходят из одного состояния в другое, на что требуется определенное время. Поэтому сам процесс фотопроводимости является весьма инерционным. И поэтому фотосопротивления в отношении частотных характеристик никак не могут соперничать с вакуумными фотоэлементами.

Своеобразно в фотосопротивлениях протекают процессы утомляемости и старения. У большинства фотосопротивлений в первые дни после изготовления чувствительность быстро растет, а затем достигает предельного значения, практически не меняющегося в течение многих лет. Явление утомления у фотосопротивлений происходит значительно медленнее, чем у других типов фотоэлементов. Оно является следствием больших кратковременных приложенных напряжений или сильных освещений и весьма вредно влияет на продолжительность службы этих приборов.

Вопрос о предельной чувствительности фотосопротивлений тесно связан с вопросом о шумах материала, из которого изготовлены фотосопротивления. А так как большинство фотосопротивлений изготавливается из полупроводников, шумы которых изучены слабо, причины значительных шумов фотосопротивлений, а следовательно, низких пороговых чувствительностей до конца не известны. Максимальная пороговая чувствительность фотосопротивлений составляет 10^{-9} лм. Однако точно установлено, что пороговая чувствительность чаще всего растет с ростом напряжения.

Весьма неприятным качеством фотосопротивлений является резкая зависимость их чувствительности от температуры. У

большинства фотосопротивлений она падает с ростом температуры. Поэтому очень часто используют метод охлаждения фотосопротивления для повышения его чувствительности.

В табл. 7 помещены характеристики основных типов фотосопротивлений, серийно выпускаемых нашей промышленностью.

Таблица 7

Тип фотосопротивления	Вещество	Интегральная чувств. при номинальном напряжении, А/лм	Спектр. характеристика, мк		Граничная частота, гц	Коэффициент нелинейности
			тах	красная граница		
—	Селен (полнокристаллический)	10^{-4} — 10^{-3}	0,7	0,9	500	0,7
ФСК—М	CdS монокристаллический	2—10	0,51	0,57	1000	0,5—0,7
ФС—К	CdS поликристаллический	1,2—3,2	0,52	0,9	100	0,5—0,8
СКФ—М	CdSe монокристаллический	6—12	0,72	0,82	10000	0,7—1,2
ФСД	CdSe поликристаллический	4—8	0,75	1,22	1000	0,6
ФСА	PbS поликристаллический	10^{-2}	2,1	2,3	До 100000	0,4
ФСБ	Bi ₂ S поликристаллический	$5 \cdot 10^{-4}$	1,05	1,07	1000	—

Как видно из таблицы, у большинства фотосопротивлений максимум спектральной чувствительности лежит в области 0,6—1 мк, то есть в красной и близкой инфракрасной частях спектра, и только у Pb₂S и PbS максимум расположен в более далекой инфракрасной области. Это обусловило широкое применение последних для целей регистрации инфракрасного излучения.

Фотоэлементы из CdS и CdSe обладают большой интегральной чувствительностью, и, кроме того, их спектральная характеристика простирается на весь спектр видимого и ультрафиолетового света, проявляя достаточную чувствительность к рентгеновскому и γ -излучению. Поэтому эти два типа фотосопротивлений получили наибольшее распространение в качестве датчиков фотореле, счетчиков γ -квантов, дозиметров рентгеновского излучения, в системах автоматики и контроля производственных процессов.

Приведенные выше типы фотосопротивлений далеко не исчерпывают всех видов этих приборов. Уже сейчас широко начинают внедряться в производство, оправдавшие себя фотосопротивления из CdTe, Si, Ge, SeTe и пр.

Вентильные фотоэлементы

По своим свойствам вентильные фотоэлементы, то есть элементы с запирающим слоем, выгодно отличаются как от фотоэлементов с внешним фотоэффектом, так и от фотосопротивлений. Отличительной особенностью вентильных фотоэлементов

является то, что они могут работать как с источником внешней э. д. с., так называемый фотодиодный режим, так и без него — вентильный режим. Поэтому для фотоэлементов с запорным слоем имеется ряд параметров, совершенно не свойственных другим типам фотоэлементов.

В случае включения в вентильном режиме такими параметрами являются:

1. Ток короткого замыкания $I_{к.з.}$, то есть ток, текущий через фотоэлемент при замыкании его накоротко. Он зависит от типа фотоэлемента и от его площади, поэтому обычно указывается ток с единицы площади. Характерной особенностью тока короткого замыкания является его линейная зависимость от освещенности.

2. Э. д. с. холостого хода $V_{х.х.}$, то есть э. д. с., которая развивается на клеммах разомкнутого фотоэлемента. Она не зависит от площади фотоэлемента, а только лишь от его типа. Э. д. с. холостого хода имеет характерную зависимость от освещенности; начиная с определенных значений освещенность практически постоянна.

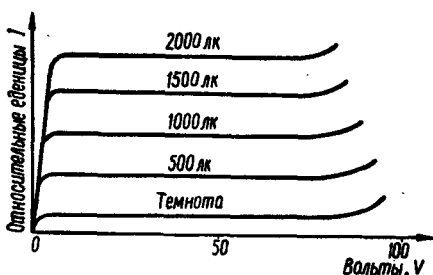


Рис. 53. Вольт-амперные характеристики при разных освещенностях.

В фотодиодном режиме имеет место типичная зависимость темнового и фототока от напряжения с явно выраженным насыщением. На рис. 53 представлено семейство вольт-амперных характеристик при разных уровнях освещенности.

Благодаря наличию насыщения в фотодиодном режиме и линейной зависимости $I_{к.з.}$ от освещенности в вентильном фотоэлементе для обоих режимов применимо понятие интегральной чувствительности и характерна линейная зависимость фототока от освещенности.

Частотная зависимость вентильных фотоэлементов определяется емкостью запорного слоя, а так как последняя зависит от наличия внешней э. д. с., то в фотодиодном режиме предельная частота значительно выше, чем в вентильном. Так, предельная частота германиевых фотоэлементов в фотодиодном режиме составляет 10^6 гц, а в вентильном всего 10^5 гц. Кроме того, частотная характеристика зависит от материала, из которого сделан фотоэлемент.

Явления утомления и старения фотоэлементов зависят в основном от рода материнского вещества фотоэлементов и сходны с таковыми для фотосопротивлений.

Температурная зависимость для фотоэлементов с запорным

слоем выражена особенно сильно. В случае фотодиодного режима темновой ток, представляющий собой по сути дела обратный ток выпрямителя, экспоненциально растет с ростом температуры.

Фототок одних фотоэлементов (германиевые фотодиоды) не зависит от температуры, у других (меднозакисные) — зависит. В вентильном режиме от температуры обычно зависит и ток короткого замыкания и э. д. с. холостого хода. Таким обра-

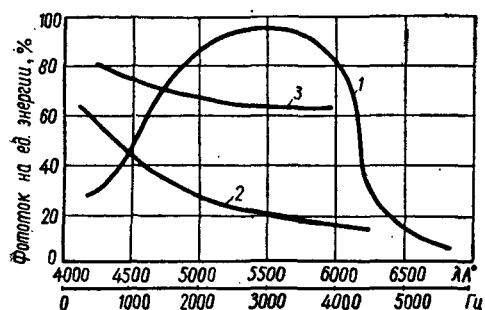


Рис. 54. Частотные характеристики различных фотоэлементов.

зом, с ростом температуры рабочие характеристики вентильных фотоэлементов резко ухудшаются (у германиевых фотоэлементов при температурах выше 60°C уровень темнового тока может превзойти уровень фототока).

Предел чувствительности вентильных фотоэлементов определяется как шумами сопротивления материала, так и

шумами в запиорном слое, он значительно ниже, чем у фотосопротивлений, и достигает 10^{-7} а/лм.

Так как фотоэлементы с запиорным слоем имеют весьма существенное значение в современной науке и технике, то остановимся на них несколько подробнее.

Селеновые фотоэлементы. Первый по времени вентильный фотоэлемент был изготовлен из закиси меди (его параметры приведены в табл. 7), но вскоре его вытеснил селеновый фотоэлемент, который был изобретен почти одновременно с ним и получил более широкое распространение. Селеновые фотоэлементы имеют спектральную характеристику, практически захватывающую всю видимую область спектра — его спектральная характеристика близка к спектральной характеристике человеческого глаза (рис. 54, кривая 1), поэтому он с успехом применяется в фотоэкспонетрах и других фотометрических приборах. Хорошие образцы селеновых фотоэлементов достигают чувствительности 600 мка/лм. Частотная характеристика селенового фотоэлемента приведена на рис. 54 (кривая 2).

Сернистоталлиевые фотоэлементы. В 1938 г. советскими физиками Ю. П. Маслаковцевым и Б. Т. Коломийцем был создан сернистоталлиевый фотоэлемент, который значительно превосходит селеновый по чувствительности (10 000 мка/лм). Он обладает рядом и других достоинств: его спектральная характеристика захватывает широкий участок

спектра ($4000 \div 12\,000 \text{ \AA}$), максимум который находится в ближайшей инфракрасной области; частотная характеристика значительно лучше подобных характеристик других вентильных фотоэлементов (рис. 54, кривая 3); у названного фотоэлемента при малом сопротивлении внешней цепи фототок прямо пропорционален интенсивности светового потока. Однако, несмотря на перечисленные достоинства, сернистоталлиевые фотоэлементы в связи с разработкой более совершенных типов фотоэлементов имеют ограниченное применение.

Сернистосеребряные фотоэлементы. В 1941 г. в Академии наук УССР физиками В. К. Бернацким и Д. С. Гейхман была завершена первая стадия работ по созданию фотоэлемента из сернистого серебра. Современные элементы этого типа выпускаются под маркой ФЭСС (ФЭСС-У2, ФЭСС-У3, ФЭСС-У10). Инте-

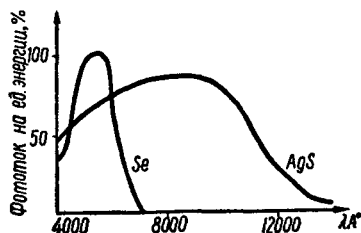


Рис. 55. Спектральные характеристики фотоэлементов из селена и сернистого серебра.

гральная чувствительность таких элементов достаточно велика, у отдельных экземпляров достигает значений 9000 мка/лм . Сернистосеребряные фотоэлементы стабильны в работе и не подвергаются сильному старению, имеют довольно широкую спектральную чувствительность (рис. 55). На рисунке приведена для сравнения спектральная характеристика селенового фотоэлемента (с максимумом в интервале $8000\text{—}9000 \text{ \AA}$).

Во время работы с этим типом фотоэлементов следует соблюдать некоторые меры предосторожности: не следует подвергать его засветке свыше 100 лк и прикладывать внешнее напряжение.

Сернистосеребряные фотоэлементы в настоящее время имеют достаточно многообразное применение: 1) в фотометрии для контроля источника света, изучения интенсивности излучения, прозрачности среды; 2) в автоматике для управления механизмами и технологическими процессами, в системах сигнализации и автоблокировки (в этих случаях ФЭСС-У могут работать непосредственно на чувствительное реле, не требуя усиления фототока, поэтому такие приборы весьма простые и удобные в обращении).

Германиевые фотоэлементы. Еще большей чувствительностью обладают германиевые фотоэлементы, открытые Шайвом в 1949 г. Их свойства подробно описаны в главе 17. Дальнейшим развитием вентильных фотоэлементов являются германиевые фотодиоды, описанию их свойств посвящена глава 18. Кроме достаточно большой чувствительности по току

(30 мВ/лм), германиевые фотодиоды обладают также хорошей частотной характеристикой и значительной чувствительностью по напряжению (изменение падения напряжения на нагрузочном сопротивлении, включенном последовательно с германиевым фотодиодом, при освещенности последнего световым потоком в 1000 лк , может достигать 100 и более вольт). Спектральный максимум фотоэлементов из германия составляет 1,5 мк . Наиболее перспективными для практических целей являющиеся недавно разработанные германиевые элементы с $p-n-p$ -структурой — фототриоды, представляющие собой комбинацию фотоэлемента с кристаллическим триодом. Ввиду усиления первичного фототока в этом приборе (механизм усиления подобен таковому в кристаллическом триоде) чувствительность лучших образцов достигает 20 А/лм . Фототриоды, подобно фотодиодам, включаются в цепь последовательно с нагрузочным сопротивлением источником внешнего напряжения, а поэтому обладают также определенной вольтовой чувствительностью.

Благодаря тому, что спектральная характеристика германиевых фотоэлементов очень близка к спектральной характеристике лампы накаливания, они получили разнообразное применение в системах промышленной автоматики и сигнализации и могут использоваться в фотометрических целях. Кроме того, ввиду достаточно малых размеров, значительной чувствительности и стабильности в работе германиевые фотодиоды абсолютно незаменимы в счетно-решающих устройствах.

Кремниевые фотоэлементы. Одним из наиболее совершенных вентильных фотоэлементов в настоящее время является кремниевый фотоэлемент. Так как материал, из которого он изготовлен (Si — кремний), обладает достаточным удельным сопротивлением и спектральной характеристикой, близкой к характеристике солнечного спектра, то кремниевые фотоэлементы являются одними из наиболее подходящих в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую. К. п. д. преобразования у кремниевых фотоэлементов в настоящее время является наибольшим из всех известных и достигает 14%.

Подобно германиевым кремниевые фотоэлементы могут быть использованы как в вентильном, так и в фотодиодном режимах, обладая в последнем случае значительно большей чувствительностью (максимальное рабочее напряжение кремниевго элемента достигает 450 и более вольт).

Соединение отдельных элементов в батареи дает возможность создать удобные источники питания для различных приборов (счетчики частиц, радиоприемники и радиопередатчики). На искусственных спутниках и космических ракетах кремниевые фотоэлементы существенно облегчили проблему питания радио и телеаппаратуры. Находящимся в состоянии разрабо-

ток кремниевым фотоэлементам, несомненно, принадлежит огромное будущее, как новым дешевым источникам энергии.

В табл. 8 приведены параметры описанных фотоэлементов.

Таблица 8

Фотоэлемент	Чувствительность, мкА/лм	Инерционность, сек.	λ_{max} , мк	Линейность
Вакуумные-цезиевые	20—40	$1,0 \cdot 10^{-9}$	0,45	Линейность
Газополиные цезиевые	150—400	$6 \cdot 10^{-9}$	0,45	Линейность
Медно-закисные	100—200	10^{-3}	0,6; 0,9	Нелинейность
Селеновые	400	$3 \cdot 10^{-4}$	0,7	Нелинейность
Сернистосвинцовые	5000	$4 \cdot 10^{-4}$	2,4	Нелинейность
Сернистосеребряные	6000	10^{-3}	1,1	
Сернистоталлиевые	8000	10^{-2}	0,96	
Кремниевые	7000	10^{-5}	1,1	Линейность
Германиевые	30000	10^{-5}	1,5	Линейность

Другие типы вентильных фотоэлементов. К другим весьма перспективным типам фотоэлементов можно отнести фотоэлементы из искусственно синтезированных материалов таких, как GaAs, InP, CdS, CdTe и др.

Так, элементы, созданные на базе GaAs имеют такие характеристики: ток короткого замыкания $I_{\text{к.з.}} = 70 \text{ ма/см}^2$, э. д. с. холостого хода $V_{\text{х.х.}} = 0,87 \text{ в}$ при к. п. д. 6%. Специальным образом изготовленные фотоэлементы из CdS показывают $I_{\text{к.з.}} = 300 \text{ ма/см}^2$, $V_{\text{х.х.}} = 0,7 \text{ в}$. Созданные в 1956 г. в Институте полупроводников АН СССР фотоэлементы из CdTe дали такие результаты: $I_{\text{к.з.}} = 2 \text{ ма/см}^2$, $V_{\text{х.х.}} = 0,5 \text{ в}$, к. п. д. = 2%.

Таким образом, возможности вентильных фотоэлементов далеко не исчерпаны и имеются все предпосылки для создания еще более чувствительных стабильных и надежных фотоэлектрических преобразователей лучистой энергии.

Рассмотрен далеко неполный перечень применяемых фотоэлектрических приборов, каждый из которых выполняет незаменимую роль в практике производства, расширяя и дополняя возможности других фотоэлектрических приборов.

Так, для получения больших чувствительностей при регистрации малых токов используют фотоумножители, фотосопротивления из CdS и CdSe и фотодиоды. При необходимости работать в инфракрасной части спектра используют охлажденные в жидком воздухе фотосопротивления из PbS и PbSe, а также для длин волн до 1,5—2 мк — германиевые фотоэлементы. Для регистрации и фотометрии при рассеянном дневном свете лучше всего подходят селеновые фотоэлементы и фотоэлементы из Ag_2S ; при солнечном — кремниевые, при искусственном освеще-

нии лампой накаливания — германиевые. При необходимости воспроизведения высокочастотных характеристик наряду с вакуумными начинают входить в практику германиевые фотодиоды и фототриоды. Для получения высокой стабильности применяются вакуумные фотоэлементы и фотосопротивления.

Таким образом, разнообразие требований практики удовлетворяется различными типами фотоэлементов. Растущие запросы техники вызывают к жизни развитие и разработку все новых и новых типов фотопреобразователей энергии излучения¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Шишловский. Экспериментальная оптика, «Радянська школа», К., 1949.

2. «Полупроводники в науке и технике». Т. II. Изд-во АН СССР, М., 1958.

3. Дж. Стронг. Техника физического эксперимента. Гостехиздат, М., 1951.

4. Э. Ангерер. Техника физического эксперимента. Физматгиз, М., 1962.

5. Н. О. Чепчик, С. М. Файнштейн, Г. М. Лившиц. Фотоумножители. ГИТТЛ, М., 1957.

6. И. А. Марголин, Н. П. Румянцев. Основы инфракрасной техники. Изд-во Министерство обороны СССР, М., 1957.

7. С. В. Свечников. Фотодвухполосники. «Техника», 1965.

8. Полупроводниковые приемники и преобразователи излучения. Под ред. А. И. Фриера и И. И. Голубкина. Изд-во «Мир», 1965.

9. В. И. Туркулец и Н. П. Удалов. Фотодиоды и фототриоды. Госэнергоиздат, М., 1962.

10. З. С. Вознесенский, В. М. Соболев. Электрические источники света. Госэнергоиздат, М., 1957.

11. П. М. Тиходеев. Световые измерения в светотехнике. Госэнергоиздат, М., 1957.

12. В. Саммер. Фотоэлементы в промышленности. Госэнергоиздат, М., 1961.

13. М. Минарт. Свет и цвет в природе. Физматгиз, 1959.

14. Ю. М. Алтайский, К. М. Кролевец, В. С. Янович. Высокочувствительный германиевый фототриод. — «Автоматика и приборостроение», № 1, 1960.

15. Р. Смит, Ф. Джонс, Р. Чесмер. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. ИЛ, 1959.

16. Фотоэлектрические и оптические явления в полупроводниках. — Труды I Всесоюзного совещания по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниках. Изд-во АН УССР, К., 1959.

¹ В последнее время появились сообщения о возможности создания вентильных фотоэлементов чувствительностью до 100 а/лм и более.

Глава 4

НЕКОТОРЫЕ ПРИЕМЫ ЛАБОРАТОРНОЙ ПРАКТИКИ

При работе в физической лаборатории необходимо обладать целым рядом навыков и приемов работы с разнообразными материалами. Эта необходимость вызвана, во-первых, тем, что отдельные операции (простейшие работы со стеклом, пластмассами и другими материалами) должны выполняться непосредственно в процессе проведения эксперимента, так как передача заказа в мастерские (квалифицированным мастерам) непомерно затянута бы опыт; во-вторых, тем, что целый ряд операций, например, поверхностные покрытия, точечные сварки, микропайка, экспериментатор должен проводить сам.

§ 1. Методы холодной обработки стекла и других материалов

Шлифовка и полировка

Для придания изломанным кускам стекла правильной формы и гладкой поверхности, а также для матирования блестящей поверхности применяются соответственно шлифовка и полировка поверхности стеклянных образцов. Шлифовка осуществляется на специальном шлифовальном круге (который приводится во вращение мотором) при помощи специального порошка — абразива (в качестве вяжущего материала для абразива применяется вода, масло). При отсутствии шлифовального станка можно применять плиту из гладкого твердого материала и шлифовку производить вручную.

Процесс шлифовки сводится, в сущности, к тому, что каждая частица абразива, когда она катится под давлением между полировальником и обрабатываемой поверхностью, создает на этой поверхности трещины, которые приводят к скалыванию материала (рис. 56).

Для шлифовки обычно применяются карборундовые и корундовые порошки. Эффективность шлифовки зависит от остроты граней шлифующих крупинки. Карборундовые зерна при шлифовке раздавливаются, образуя при этом большое количество острых углов и ребер; шлифуют эти зерна в 6 раз быстрее, чем зерна корунда. Поэтому корунд применяется для тонкой шлифовки, а карборунд — для грубой обдирки.

В процессе полировки происходит сглаживание выступов, так как зерна абразива вязнут в мягком материале полировальника (масло, смола), располагаясь параллельно направлению движения полировальника. Таким образом, получается своеобразный соскабливающий инструмент. Высота каждой частицы автоматически устанавливается в мягком материале полировальника относительно его поверхности так, что снимает с выступающих участков стекла тонкий и гладкий срез.

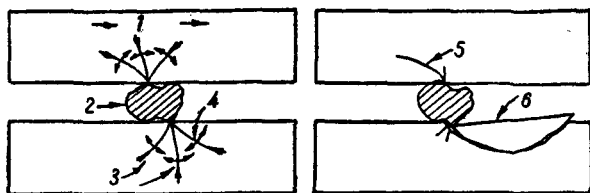


Рис. 56. Процесс шлифовки:

1 — направление движения; 2 — частица абразива; 3 — сила сжатия; 4 — сила напряжения; 5 — начало излома; 6 — скол.

Что касается металлов, то последние являются более мягким материалом, чем стекло, и полируются при помощи ворсистых тканей: шелка, сукна, бархата, фетра (велюра). Здесь роль параллельно расположенных зерен абразива играют ворсинки материала. В качестве полировочной смеси можно использовать один из составов: венской извести 50 частей, крокуса 25 частей и окиси хрома 25 частей или стеарина 10 частей, керосина 3 части, олеиновой кислоты 2 части и окиси хрома 85 частей.

Состав наносят на поверхность металла и полируют ворсистой тканью, смоченной в бензине.

Для предотвращения окисления отполированную поверхность можно покрыть светлым щитом — лаком.

Своеобразным способом полировки является травление металлической поверхности. Для травления меди, латуни, железа, стали, цинка и т. д. применяется «царская водка» — смесь азотной и соляной кислот (половина на половину по весу). После травления поверхность необходимо тщательно промыть в проточной воде.

Травление алюминия, дюралюминия проводят в 5—6%-ном растворе едкого натрия. Затем поверхность обрабатывается проточной водой и крепким раствором азотной кислоты (кислота восстанавливает естественный цвет алюминия). После этого поверхность вновь промывается в проточной воде и сушится.

Травление может быть использовано для изготовления надписей или шкал на металле. Для этого поверхность латуни,

цинка или алюминия полируют, промывают водой и сушат. Затем на нее наносят надписи любым спиртовым лаком; подготовленный таким образом металл травят в кислоте. Все, что было написано лаком, остается нетронутым кислотой, и надписи получаются выпуклыми.

Если на поверхность металла нанести тонкий слой воска и сделать надписи скребком, а затем протравить в кислоте, то в этом случае надпись получится глубокая — вытравленная в металле.

Для травления латуни можно применять азотную кислоту, для алюминия и цинка — соляную.

Когда с поверхности металла будет удален воск (например, горячей водой), на сухую пластинку можно нанести цветную масляную краску, которая затечет в вытравленные места. Лишнюю краску снимают тряпкой.

Для снятия с алюминиевых деталей поверхностной окиси надо промывать алюминиевые изделия (поверхность) в теплой воде жесткой волосяной щеткой, обильно смазанной хозяйственным мылом.

Особым случаем полировки металлов может быть электрополировка. Приведем способ электрополировки латунных деталей несложной конструкции. В ванну наливается 40—60%-ный раствор ортофосфорной кислоты (рис. 57) и переключатель ставится в положение *анодный процесс*. Свинцовый электрод ванны *К* служит катодом и полируемое изделие анодом *А*. Латунную пластинку необходимо очистить наждачной бумагой, затем обезжирить в 5%-ном растворе соды и вымыть водой. Закрепив пластинку в подвеске, погружают ее под напряжением в электролит ванны. Рабочее напряжение 4—6 в, плотность тока 0,2—0,3 а/см². Процесс полировки длится 30—60 сек. При этом режиме латунь хорошо полируется, приобретая красивый блеск. Для удовлетворительной электрополировки меди достаточно 1—2 мин. В тех случаях, когда требуется надолго сохранить блеск, рекомендуется погрузить изделие на 1 мин в 10%-ный раствор хромпика ($K_2Cr_2O_7$).

Для успешной полировки анод должен быть меньшего размера, чем катод.

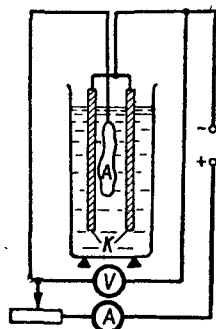


Рис. 57. Схема электрополировки.

Защитные покрытия на металлах

Металлы и сплавы на воздухе (особенно сырым) быстро окисляются и, таким образом, довольно кропотливая работа по обработке поверхности очень быстро может быть сведена на

нет. Для предотвращения действия влаги, паров, кислот и тому подобное поверхность металла покрывается защитной пленкой. Эта пленка часто служит и для придания изделию красивого вида.

Для предотвращения окисления алюминия и его сплавов на поверхность (заранее отполированную) наносится тонкий слой едкого калия (10%-ный раствор). После высыхания поверхность приобретает красивый перламутровый оттенок, который сохраняется длительное время (несколько лет).

Надежным защитным покрытием для остальных деталей служит воронение. Хорошо протравленную и промытую деталь нагревают до такого состояния, при котором деталь начинает менять цвет от светло-голубого и синего до черного (подбирается по желанию). Затем ее опускают в сосуд с машинным маслом или керосином (там их выдерживают до остывания).

Поверхность медных и латунных деталей часто покрывают слоем серебра для защитного и декоративного покрытия.

Наиболее простой способ покрытия — серебрение заключается в следующем. Деталь опускается в старый, многократно использованный раствор гипосульфита. Время выдерживания в растворе зависит от концентрации серебра в растворе. После промывки и сушки детали ее полируют суконкой.

Другой, более сложный способ серебрения меди заключается в натирании поверхности составом: 2 г натрия, 4 г винного камня и 1 г ляписа, размешанного на воде до кашицеобразного состояния.

Существует также несколько способов золочения металлических деталей. Остановимся на одном из них.

На хорошо очищенную и отполированную поверхность кистью наносится раствор для золочения, после чего высушенная деталь прогревается на жаровне (горючий материал — деревянный уголь) или в спиртовом пламени. Вторичной полировки не требуется.

Раствор для золочения: 240 г «царской водки» растворяют с 1 г золота, после чего добавляется 1 г хлористой сурьмы и 1 г олова. После растворения олова (его растворение можно ускорить, если провести кипячение раствора в водяной бане) добавляется 20 г насыщенного раствора борной кислоты.

Раствор хранится в стеклянном сосуде с притертой пробкой в темноте. Хорошим защитным покрытием для меди может служить лаковая пленка.

Лак для меди готовится таким образом: в 100 г воды растворяется 4 г молочного сахара (лактосахарозы). Смесь кипятят в течение 10—15 мин. Затем при непрерывном помешивании добавляют 4 г медного купороса. Лак наносится на деталь в горячем состоянии.

С более сложными, но и более универсальными методами

поверхностных покрытий (например, покрытие на стекло, фарфор и другие диэлектрики) мы познакомимся дальше, в отдельной главе, после знакомства со вспомогательной техникой (например, вакуумной), необходимой при осуществлении таких покрытий.

Резание, грубая обдирка и сверление стекла

Резание стекла производится более твердым, чем стекло, материалом, лучше всего алмазом; кроме того, стекло режется, хотя и хуже, победитом и другими сплавами. Резание стекла производится следующим образом: на стекло наносится царапина и затем нажатием вдоль царапины делается слом.

При нанесении царапины на поверхность стекла его необходимо положить на пружинящую поверхность (сукно, асбест и др.), чтобы поверхность стекла плотно прилегала к ней. Обламывать ненужные части нужно одним резким движением.

В случае вырезывания фигур сложной конфигурации существует прием резания стекла ножницами под водой.

Грубую обдирку можно производить на шлифовальном круге крупным абразивом.

В этом случае, как и в случае шлифовки, следует давать возможность абразиву поступать под обрабатываемую поверхность, для этого следует поднимать и прижимать обрабатываемую деталь к шлифовальному кругу частотой 1—2 раза в секунду.

Для сверления стекла употребляется не обычное сверло, а полая медная или латунная трубка, зажимающаяся в патрон сверлильного станка. Место сверления намечают заранее специальным карандашом. Затем вокруг места, подлежащего операции, насыпается абразив в смеси с маслом или водой (рис. 58). Для того чтобы сверло при выходе своим краем не создало избыточного натяжения, в результате которого могли бы возникнуть трещины, стекло с обратной стороны подклеивается другим кусочком стекла, дерева или картона. Сверление нужно осуществлять осторожным прижатием сверла к стеклу так, чтобы на его конце и внутри было достаточно абразива. Для этого опускают и поднимают патрон с частотой 1—2 раза в секунду, создавая таким образом условия для непрерывного поступления абразива к обрабатываемому месту. Стронг рекомендует вместо масла и воды в качестве связывающего материала для абразива использовать смесь скипидара и камфоры (на 1 л скипидара 10 г камфоры).

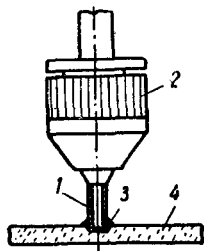


Рис. 58. Сверление отверстий:

1 — медная трубка; 2 — патрон; 3 — абразив с маслом; 4 — стекло.

§ 2. Методы получения высоких температур

В настоящее время основными устройствами, с помощью которых достигаются высокие температуры в лаборатории, являются газовые горелки и электропечи.

Нагревательные приборы

1. Газовые горелки в лабораторной практике используются в том случае, когда нужно получить локальный разогрев большой детали или быстро нагреть мелкие предметы до высокой

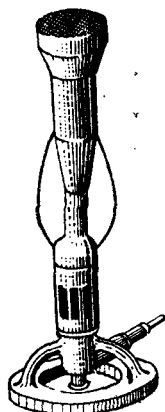


Рис. 59. Бунзеновская горелка.

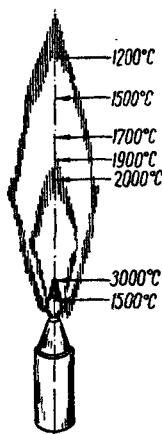


Рис. 60. Распределение температуры в пламени горелки.

температуры. Они широко применяются при пайке и сварке металлов и являются незаменимыми при горячей обработке стекла и кварца.

Рассмотрим основные типы горелок. Простейшим видом горелки является обыкновенная школьная спиртовка, дающая температуру до $700\text{--}800^\circ\text{C}$. С помощью паяльной трубки, продувая воздух через пламя спиртовки, можно получить температуру до 1200°C . На рис. 59 представлена усовершенствованная бунзеновская горелка. Она представляет собой трубку со специальной отливкой, через которую поступает газ (метан, бутан, природный газ); в трубке имеются боковые отверстия для входа воздуха. Благодаря инжекторному действию струи газа через эти отверстия воздух втягивается в горелку. Смешиваясь с газом, воздух реагирует с ним и дает ровное пламя.

Ввиду того, что горелка протягивает через свои отверстия только половину кислорода, необходимого для полного сгора-

ния газа, применяют приспособления, ограничивающие скорость выхода газа. Эту роль может выполнить сетка на конце горелки.

Такая горелка со светильным газом дает температуры порядка $2600\text{--}1800^\circ\text{C}$. Для получения более высоких температур газ нужно сжигать с воздухом или кислородом, который с помощью специальных наконечников пропускается под давлением внутри струи газа. Самые высокие температуры получают при использовании ацетилена с кислородом, при этом максимальная температура пламени достигает 3000°C . На

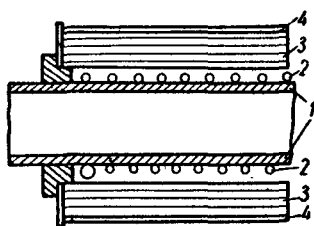


Рис. 61. Эскиз трубчатой печи.

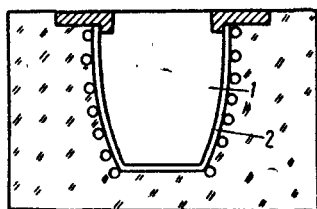


Рис. 62. Схема тигельной печи.

рис. 60 показано распределение температуры в пламени кислородно-ацетиленовой горелки.

2. Для нагревания крупных предметов до высокой температуры используются газовые печи. Имеются газовые печи, дающие температуру до 2600°C . Однако гораздо более широкое распространение получили электрические нагревательные системы. По назначению их можно разделить на печи и термостаты. Первые служат для нагрева до определенной температуры веществ и материалов, а также для проведения различных процессов, требующих изменения температуры. Термостаты применяются для поддержания температуры на определенном уровне длительное время.

Наибольшее распространение в лабораториях получили трубчатые, муфельные и тигельные печи сопротивления. Криптоловые, дуговые, индукционные печи в лабораторной практике применяются значительно реже.

Трубчатая печь (рис. 61) представляет собой трубку 1 из изолирующего материала с обмоткой 2 из металла с высоким удельным сопротивлением. Снаружи трубка покрыта асбестом, шамотом или другим изолирующим материалом 3 и помещена в металлический кожух 4.

Трубчатые печи очень удобны в тех случаях, когда нужно в различных частях системы последовательно создавать изменение температуры (зонная плавка полупроводников, водородная установка для впавления примесей в полупроводниках и

т. д.). В этом случае печь «надевается» на нагреваемую трубу и по специальным рельсам может ездить вдоль трубы. Трубчатые печи могут быть использованы для нагрева материалов под вакуумными колпаками.

Большинство выпускаемых промышленностью трубчатых печей могут быть установлены как вертикально, так и горизонтально, поэтому именно трубчатые печи и получили наибольшее распространение в лабораторной практике. Изготовление разъемных трубчатых печей представляет большое удобство для экспериментатора (например, когда печь жестко закреплена и необходимо быстро понизить температуру).

Наряду с трубчатыми печами в лабораторной практике используются тигельные печи (рис. 62). У последних рабочее пространство 1 выполнено из шамотового тигля 2, куда помещают сосуд с нагреваемым веществом.

В тигельных печах в основном производят плавку металлов, нагрев твердых и жидких тел до температуры 500—1000°С; в них удобно производить закалку отдельных деталей, а также они могут быть использованы для снятия различных характеристик отдельных устройств и приборов.

Муфельные печи, представляющие по сути дела те же горизонтальные трубчатые печи, но с одним заглушенным концом, используются для тех же целей, что и тигельные. В ряде случаев в них удобнее производить закалку более громоздких предметов, так как рабочее пространство в них обычно достаточно велико по объему.

3. Кроме электрических печей, для получения высокой температуры иногда в лабораторной практике используются так называемые полосовые нагреватели. Они изготавливаются из ленты тугоплавких металлов (молибден, тантал, вольфрам), через которые с помощью трансформаторов пропускается большой ток (десятки или сотни ампер). Для предотвращения окисления нагрев производится в вакууме или в атмосфере инертного газа.

Преимуществом данного типа нагревателей является возможность чрезвычайно быстрой регулировки в очень широких пределах скорости нагрева и охлаждения (от долей до сотен градусов в секунду). При этом изучаемые образцы помещаются непосредственно на нагреватель. Полосовые нагреватели незаменимы для сверхбыстрого подъема температуры, необходимой, например, для быстрого распыления тугоплавких металлов и т. п.

4. Термостаты, как мы уже отмечали, предназначаются для поддержания определенной постоянной температуры в течение длительного времени. Наиболее простым способом термостатирования является помещение приборов в плавящееся или кипящее вещество. Однако гораздо более удобно использовать

другой принцип — принцип подвода тепла и регулировки температуры. Рабочие температуры в термостатах обычно не превышают 200—300° С.

Близкими по устройству к термостатам являются сушильные шкафы, служащие для сушки или для термообработки различных материалов и приборов при температурах до 250° С. К сушильным шкафам в отличие от термостатов предъявляются менее жесткие требования в отношении регулировки температуры. Сушильные шкафы изготавливаются с гораздо большим объемом рабочей камеры, чем печи той же мощности. Объем рабочих камер достигает в некоторых лабораторных сушильных шкафах 0,2 м³ и более.

Основные принципы конструирования печей и нагревательных систем

В лабораторной практике очень часто приходится изготавливать нагреватели специальных назначений. Изготовить нагреватель с заранее заданными параметрами труднее, чем это кажется с первого взгляда, поэтому мы и остановимся на основах конструирования таких приборов.

Как известно, для работы печи в стационарном режиме количество поступающего тепла должно быть равно количеству отдаваемого во внешнее пространство. При этом необходимо различать, какими путями поступает и отдается тепло. Существуют три способа передачи тепловой энергии: конвекция, теплопроводность и лучеиспускание. В зависимости от температуры, объема и формы рабочей камеры, нагреваемого вещества и так далее превалирует тот или иной способ передачи. Так, например, при относительно низких температурах (до 200° С) в достаточно больших объемах при наличии газовой или жидкой среды существенную роль играет конвекция и теплопроводность. Поэтому в жидкостных термостатах обязательно существует устройство для интенсивного перемешивания жидкости. При температурах от 200 до 900° С главную роль при отводе и рассеянии тепла играет теплопроводность, и к концу теплового интервала 600—700° С активную роль начинает играть лучеиспускание. Печи на такие температуры делаются с мощной изоляцией асбеста, шамота и т. п. И, наконец, при температурах выше 1000—1100° С основную роль играет лучеиспускание.

Правильно учитывая тепловой режим данного тела, можно строго вычислить скорость нагрева и охлаждения. Если основную роль играет теплопроводность, то используется уравнение Фурье

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где T — температура данной точки тела;

t — время;

q, c — константы, связанные соотношением $h^2 = \frac{\kappa}{qc}$ (h — коэффициент температуропроводности).

Для стационарного одномерного случая

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

Отсюда

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{qc} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0.$$

Следовательно,

$$\frac{\partial T}{\partial x} = M,$$

где M — константа.

С физической точки зрения можно показать, что

$$M = - \frac{\Phi}{kA},$$

где Φ — поток тепла;

A — площадь поверхности теплопередачи;

κ — коэффициент теплопроводности.

Отсюда

$$\Phi = - kA \frac{\partial T}{\partial x},$$

то есть поток тепла, перпендикулярный поверхности с площадью A , пропорционален коэффициенту теплопроводности и градиенту температуры.

При вычислении потока существенную роль играет форма нагреваемого тела. Для прямоугольного параллелепипеда

$$\Phi = - \frac{kA}{x} (T_2 - T_1),$$

где x — расстояние между поверхностями и с температурой T_2 и T_1 .

А для двух концентрических цилиндров

$$\Phi = - k \frac{2,73l}{\lg \frac{r_2}{r_1}} (T_2 - T_1),$$

где l — длина цилиндров;

r_1 и r_2 — их радиусы.

Так что, зная k , r_2 и r_1 , можем определить потери тепла цилиндрической печи, если температура внутри ее T_2 , а снаружи T_1 . Зная мощность нагревателя, можем рассчитать необходимую толщину слоя и подобрать материал изоляции для достижения данной температуры.

Более сложный вид имеет решение уравнения в нестационарном случае, которое дает зависимость температуры от времени нагрева или охлаждения данного нагревателя. Так, для медленного охлаждения цилиндра имеет место соотношение

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) e^{-\frac{2Nh^2t}{r_0}},$$

где T_0 — первоначальная температура цилиндра;

где T_1 — температура среды;

h — коэффициент температуропроводности;

N — коэффициент остывания или нагрева.

N определяется количеством тепла, передаваемым в окружающую среду с 1 см^2 поверхности при нагреве (остывании) на 1° ; t — так называемое время релаксации, то есть время проникновения теплового импульса на глубину r_0 .

Что касается конвекции, то этот вопрос является весьма сложным (а в лабораторной практике не очень существенным), поэтому на нем мы останавливаться не будем. Коротко разберем случай излучения.

Как известно, общая отдача тепла с единицы площади поверхности абсолютно черного тела путем радиации выражается формулой Стефана — Больцмана

$$\Phi = A\sigma T^4,$$

для неабсолютно черного тела

$$\Phi = A\varepsilon\sigma T^4,$$

где ε — коэффициент светимости, зависящий от температуры тела и, конечно, от цвета и структуры вещества; (представляет собой отношение излучения данной поверхности к излучению абсолютно черного тела), понятно, что $0 < \varepsilon < 1$;

σ — постоянная, равная $1,37 \cdot 10^{-12} \text{ кал/сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{град}^4$;

A — площадь поверхности.

Для большинства неметаллов $\varepsilon \approx 1$; для алюминиевых красок при комнатной температуре $\varepsilon = 0,3 \div 0,5$.

Для нестационарного процесса перенос тепла излучением определяется выражением

$$W = \sigma (T_2^4 - T_1^4),$$

где W — поток тепла с единицы площади;

T_2 и T_1 — температуры излучающей и облучаемой поверхностей.

Для полного расчета печи необходимо учитывать все потери: через теплопроводность, лучеиспускание и конвекцию, что, как мы видим, весьма сложно. Поэтому приводим табл. 9, 10, при помощи которых можно легко рассчитать геометрические размеры печи из заданной максимальной температуры и мощности для трубчатых печей с обмоткой из нихромовой проволоки.

Таблица 9

Внутренний диаметр, мм	Длина, мм	$T_{\max}$ °C	Мощность для достижения температур, вт		
			800° C	900° C	1000° C
20	250	900	400	750	—
20	600	1000	750	900	1600
30	300	900	700	1200	—
30	600	1000	1000	1600	2400
40	300	850	1000	1600	—
40	600	900	1200	1800	—
50	300	950	1100	1990	—
65	300	800	1400	—	—
65	600	850	1500	—	—
65	1000	950	2000	3600	—
80	600	850	2600	—	—

Таблица 10

Допустимая сила тока для нихромовой проволоки					
Диаметр d , мм	Максим. ток I , а	d	I	d	I
0,1	0,7	0,6	5,5	1,6	20
0,15	1,0	0,8	8,2	1,8	23
0,2	1,3	1,0	11	1,9	24
0,3	2,0	1,2	14	2,0	25
0,4	3,0	1,4	17	2,1	26,5
0,5	4,2	1,5	18,5	2,2	28

Остановимся на основных принципах конструирования трубчатых печей, так как именно такие печи чаще всего приходится изготовлять в лаборатории. Прежде всего встает вопрос о выборе материала трубы и обмотки. Для условий медленного нагрева до температуры 500—600° C можно использовать тугоплавкое стекло в качестве трубки, нихром или никелин в качестве обмотки и асбест в качестве изоляции. При температу-

рах до 800—900° С материалом для трубки служит фарфор или кварц; в качестве обмотки можно еще использовать нихром. Однако при таких температурах асбест, соприкасаясь с раскаленным нихромом, образует легкоплавкие соединения, что быстро приводит печь в негодность. Поэтому лучше в качестве изоляции использовать шамот, окись магния и т. д. Для более высоких температур (1000—1500° С) в качестве трубки уже необходимо использовать фарфор или керамику, обмотку производить проволокой из платины или сплавов (ВИ=595 и т. д.). В более высокотемпературных печах (до 2000° и 3000° С) нагреватели применяются из молибдена и вольфрама на жаропрочной керамике, причем нагрев производится в восстанавливающей среде или вакууме.

Для прочности обмотки, чтобы винты не сдвигались, проволоку наматывают по слегка влажному асбесту; вывод ее осуществляется через хомут из мягкого металла соответствующей тугоплавкости (из меди (500°—600° С), из железа (700°—900° С), из никеля (900°—1200° С) и т. д.). Внешняя изоляция изготавливается из листового или шнурового асбеста (наносится во влажном состоянии). При этом, чем больший будет слой изоляции, тем большая будет инерционность печи по отношению к температуре.

Для расчета толщины и длины проволоки можно использовать вышеприведенные таблицы. Причем, по заданной мощности и напряжению подбирается сопротивление проволоки

$$W = \frac{U^2}{R}.$$
 Зная сопротивление и ток, выбирают диаметр проволоки (табл. 9). Необходимо учитывать, что сопротивление возрастает с ростом температуры. Если проволока не уместается, на трубке ее либо заменяют более толстой, либо свертывают спиралью; если ни то, ни другое не удастся, проволоку укорачивают, а часть мощности гасят на реостатах.

Весьма важным фактором при конструировании печи является учет распределения температуры в ней. Чем меньше диаметр и больше ее длина трубы, тем более однородную температуру можно получить в центре печи. Для повышения однородности распределения температуры принимаются меры:

а) проволоку наматывают переменным шагом, реже к середине и чаще к концам;

б) изоляцию печи делают толще к концам и тоньше к середине;

в) в рабочее пространство печи вкладывают металлическую трубу;

г) крышки печи также снабжают обмоткой и накачивают током.

Кроме того, должна быть произведена тщательная герметизация всех щелей (особенно при вертикальной установке печи),

Тип печи	Мощность, вт	Температ. максимальн., t °C	Время разогре- ва, мин	Объем рабочего про- странства	Вес, кг
Муфельная № 1	800	800	60	70×115×180	12,3
» № 3	2000	800	60	120×200×30	29,6
Муфельная МП-0	1600	1000	90	85×137×210	29,0
» МП-1	1600	1000	90	85×135×235	30,0
» МП-2	2600	1000	90	95×115×300	40,0
Тигельная № 1	300	800	60	Φ60=100	1,8
» № 3	650	800	60	Φ78=128	4,0
» ТГ-1	2500	1000	65	Φ125=195	23,4
Трубчатая печь закалочная	1200	1000	90	Φ78=280	39,4
Трубчатая ПСС ³⁰ /200	800	1200	60	Φ30=200	5,0
» ПСС ⁴⁰ /600	1600	1200	90	Φ40=600	24,0
» ПСС ⁵⁰ /600	2000	1000	90	Φ50=600	24,0
» МП-СНсн/20	450	1150	45	Φ15=200	1,7

иначе конвекционные потоки могут вызвать значительные местные охлаждения.

В табл. 11 приведены данные по термостатам и печам, выпускаемых отечественной промышленностью.

Измерение и регулировка температуры в печах

Измерение температуры. Простейшим и наиболее распространенным прибором для измерения температуры является ртутный термометр. Ртутные термометры встречаются двух типов: палочковые и трубчатые. У термометров первого типа, которые предназначаются для точных работ, деления нанесены на внешней поверхности и цена деления достигает $0,01^{\circ}\text{C}$, а при отсчете с помощью оптической трубы даже до $0,0005^{\circ}\text{C}$. У термометров второго типа деления нанесены на внутреннюю шкалу и цена деления от $0,1^{\circ}\text{C}$ и больше. При заполнении пространства над ртутью азотом при давлении до 70 атм и применении специального стекла палочковые термометры могут измерять температуры до 750°C (при атмосферном давлении ртуть закипает при 357°C).

Однако недостаточно широкий диапазон температур, хрупкость и термонестойкость стекла ограничивают область применения стеклянных термометров.

Наиболее широкое применение в настоящее время в лабораторной практике имеют термоэлектрические термометры или термопары. Наиболее типичные термопары, выпускаемые нашей промышленностью, показаны в табл. 12. Из них чаще всего применяются термопары хромель — алюмель, медь — константан и платина — платинородий.

Т а б л и ц а 12

Пары металлов	E , мкв/град	T °C (max)
Платина — платинородий	6,4	1600
Медь — константан	41	500
Железо — константан	51	600
Медь — копель	47,5	350
Хромель — копель	69,7	600
Хромель — алюмель	41	900
Железо — копель	57,5	600

Для обеспечения точности показаний к термопаре предъявляется ряд требований: 1) желательно, чтобы зависимость э. д. с. от температуры была линейной, в противном случае необходимо снимать точный график этой зависимости и пользоваться им или соответствующими таблицами; 2) проволоки

термопары должны быть однородны по толщине и составу, иначе возможны местные токи, которые могут исказить результаты; 3) холодный спай должен находиться все время при одинаковой температуре, иначе каждый раз необходимо вычислять поправку на температуру холодного спая.

Фабричные платино-платинородиевые и другие термопары обычно выпускаются в массивном металлическом кожухе, внутри которого находится проволока термопары, помещенная в две фарфоровые трубки. Для удобства лабораторных измерений термопара обычно извлекается из кожуха. Однако при этом остается открытым горячий спай, а сами трубки, изолирующие ветви термопары друг от друга, весьма неудобны для дальнейших операций с ней. В связи с этим можно рекомендовать следующий способ монтажа термопары. Одна из жил ее помещается в кварцевый капилляр, а вся термопара вставляется в кварцевый колпачок, причем при температурах до 600°C кварц можно заменить тугоплавким стеклом, а при температурах до 450° — обычным стеклом № 23.

Для правильного измерения температуры с помощью термопары следует помнить, что термопара измеряет усредненную температуру в объеме, а поэтому придерживаться определенных правил работы. Для измерения температуры газообразных, жидких и сыпучих тел термопару необходимо помещать не менее, чем на одну треть или четверть своей длины в данную среду, так как высокая теплопроводность частей термопары, находящейся при более низкой температуре, исказит результаты.

В случае твердых тел дело обстоит сложнее. Здесь уже недостаточно одного касания горячего слоя поверхности тела, а необходим тепловой контакт на указанной выше длине термопары. Для этого при измерении температуры, например, металлической плиты или стержня, в них просверливается для термопары отверстие, а в случае невозможности такой операции термопара приваривается к поверхности тела в двух точках.

Для измерения температуры изоляторов их обертывают металлической фольгой, к которой приваривается термопара.

Как и термометры, термопары можно калибровать либо по реперным точкам, то есть точкам изменения агрегатного состояния вещества (табл. 13), либо по образцовому термометру. Обычно пользуются комбинированным способом: до 350°C калибруют термопару по образцовому ртутному термометру, а выше — по температурам плавления солей и металлов.

При градуировке термопар в расплавленных металлах следует следить, чтобы поверхность последнего не окислялась. Чтобы избежать этого, на поверхность металла обычно насыпается слой графита, а спай термопары защищается кварцевым колпачком.

Другим весьма точным прибором для измерения является

Т а б л и ц а 13

Вещество	Изменение агрегатного состояния	Температура
Вода	Плавление	0° С
Вода	Кипение	100° С
Нафталин	Кипение	217,9° С
Олово	Затвердевание	231,9° С
Бензофенон	Кипение	305,9° С
Кадмий	Затвердевание	320,9° С
Свинец	Затвердевание	327,4° С
Цинк	Затвердевание	419,5° С
Сера	Кипение	444,6° С
Сурьма	Затвердевание	630,5° С
Сода	Затвердевание	851,0° С
Серебро	Затвердевание	960,5° С
Золото	Затвердевание	1063° С

термометр сопротивления, принцип действия которого основан на изменении сопротивления при изменении температуры вещества. Однако они не стабильны в работе и не получили в настоящее время распространения в лабораторной практике.

В заключение отметим, что существуют оптические методы измерения температуры, основанные на сравнительной оценке цвета накаливаемого тела. В табл. 14 дана приблизительная температура, соответствующая данному виду свечения. Более подробно на оптических методах измерения температуры мы останавливаться не будем.

Т а б л и ц а 14

Температура	Цвет свечения
500° С	Едва видимое темно-вишневое
600° С	Вишневое
700° С	Темно-красное
800° С	Ярко-красное
900° С	Красно-оранжевое
1000° С	Оранжевое
1100° С	Желто-оранжевое
1300° С	Начало белого свечения
Выше 1400° С	Белое

Регулировка температуры. Простейшим способом регулировки температуры в электрических нагревательных системах является подбор определенной силы тока с помощью реостата. Понятно, что это весьма несовершенный, трудоемкий и ненадежный метод. Поэтому используется целый ряд способов автоматической регулировки температуры. Не останавливаясь на всех

возможных принципах, рассмотрим лишь наиболее часто встречающийся в лабораторной практике.

Биметаллическое реле состоит из двух пластин с различным коэффициентом линейного расширения. При нагреве или охлаждении происходит больший или меньший изгиб пластинки, в результате чего соответственно замыкаются или размыкаются контакты, которые приводят в работу реле, регулирующее работу печи.

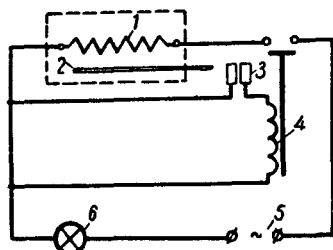


Рис. 63. Схема включения биметаллического реле:

1 — нагреватель; 2 — стержень; 3 — константы; 4 — реле; 5 — источник тока; 6 — сигнальная лампочка.

Подобным образом работают регуляторы, где в качестве датчика изменения температуры стоит металлический или графитовый стержень 2, который при нагреве, удлиняясь, замыкает или размыкает контакты 3 реле (рис. 63). Для установки этих регуляторов на заданную температуру наружу выводится ручка, поворотом которой изменяется расстояние между контактами 3 и стержнем 2. Обычно

такие регуляторы снабжены сигнальными лампами, свидетельствующими о замыкании или размыкании цепи.

§ 3. Пайка и точечная сварка металлов

В лабораторной практике часто применяется скрепление деталей путем спаивания их как «слабыми» (легкоплавкими), так и «крепкими» припоями. Паяние всегда применяется при монтаже радиосхем и часто при монтаже электрических. Ниже приведены практические советы относительно использования указанного приема.

Для получения надежно спаянных соединений требуется предварительная очистка подлежащего паянию шва и применение, так называемого, флюса. Назначение последнего — вытравить с поверхности всю грязь, а также защитить эту поверхность и припой от окисления.

Наилучший флюс для «слабого» припоя изготавливают из смеси двух частей хлористого цинка и одной части хлористого аммония (то есть нашатыря), растворяемых в минимальном количестве воды. При использовании такого флюса спаянное место тщательно промывается. В качестве флюсов очень удобно применять растворы некоторых смол в спирте (например, канифоли). Последний флюс является исключительно хорошим для паяния небольших латунных и медных деталей.

Для успешного паяния имеют важное значение три фактора — чистота поверхности, качество флюса и достаточное коли-

чество теплоты, подводимой к месту спая. Некоторые виды спаев можно делать исключительно на пламени горелки, другие при помощи паяльника. Лучшие результаты получаются при комбинировании этих двух способов, особенно когда соединению подлежат крупные детали. Общая температура спаиваемых деталей 125—150°С поддерживается при помощи пламени горелки, более высокая температура, необходимая для протекания припоя, достигается местным нагревом при помощи паяльника. При спаивании деталей различной конфигурации применяются паяльники различных размеров (мощности) и форм.

Наиболее распространенными слабыми припоями для лабораторных работ являются оловянисто-свинцовые.

При монтаже радиоаппаратуры для пайки деталей применяется припой «серебристый сплав»: 1 часть олова, семь частей свинца. Для монтажных работ, лужения деталей, спайки металлических листов применяются третник и половинник (Пос-35 и Пос-50, табл. 15). Для самых низких температур пайки применяются сплавы: висмута — 2 части, олова — 1 часть, кадмия — 1 часть (температура плавления сплава — 105—110°С) или висмута — 15 частей, олова — 4 части, свинца — 8 частей, кадмия — 3 части (температура плавления 56°С).

При составлении сплавов сначала расплавляют (под флюсом) металл с более высокой температурой плавления, а потом добавляют металл с более низкой температурой плавления.

В качестве крепкого припоя для паяния легированных сталей, чугуна, сплавов алюминия, вольфрама и молибдена чаще применяется серебряный припой. Поверхности, подлежащие соединению серебряным припоем, предварительно покрывают жидкой пастой, состоящей из 5—10 частей буры, 1 части борной кислоты и небольшого количества воды. Бурю и борную кислоту можно применять в порошкообразном виде. Можно применять и одну бурю в сухом виде. Флюс для нержавеющей стали изготовляют из 1 части буры и 1 части борной кислоты, смо-

Таблица 15

Припой	Назначение
ПОС-35/35%	Для паяния цинковых и свинцовых изделий
ПОС-50/50%	Для паяния латуни, белой жести, электрических деталей
ПОС-50/64%	Для паяния самых легкоплавких сплавов

ченных раствором насыщенного хлористого цинка. В табл. 16 приведены рецепты твердых припоев.

Особый случай представляет пайка алюминия. Наилучшим сплавом для его пайки является 15% цинка, 12% алюминия, 73% олова. Места спайки должны быть зачищены до блеска. Еще лучше при залуживании поверхности алюминия применять шабровку. В качестве флюса обычно используется чистый парафин.

Т а б л и ц а 16

Состав сплава			Температура плавления, °С
Медь, частей	Цинк, частей	Серебро, частей	
30	25	45	720
40	35	25	765
45	55	—	835
51	49	—	850
54	46	—	875
50	42	8	880

Другим, часто применяемым в лаборатории методом соединения металлических изделий является точечная сварка при помощи электрического тока. Обычно агрегат получает электроэнергию через трансформатор в 1—2 квт. Вторичная обмотка сварочного трансформатора представляет собой несколько витков толстой медной проволоки 12—15 мм². Сварка осуществляется теплом, выделяющимся в течение долей секунды в месте контакта между свариваемыми поверхностями. Степень нагрева регулируется реостатом и продолжительностью включения тока. Электроды приводятся в контакт с изделием определенным давлением.

Лучше всего свариваются металлы с одинаковой (или близкой) температурой плавления и одинаковой теплопроводностью.

§ 4. Различные составы, применяемые в физической лаборатории. Приемы лабораторной практики

Клей и замазки

В физической лаборатории экспериментатору часто приходится склеивать различные детали из самых разнообразных материалов (металл — стекло, металл — дерево и т. п.). Иногда от склеенного шва требуется прочность, иногда кислотоустойчивость, иногда и то и другое вместе. Иногда склейка носит временный характер с тем, чтобы впоследствии детали можно было рассоединять. Приведем ряд рецептов различных клеев и замазок (кроме общепринятых, общеизвестных, например, клей БФ или резиновый), хорошо себя зарекомендовавших на практике.

Китайская замазка. Употребляется для склеивания мрамора, фарфора, стекла. Ее состав: 54 части гашеной извести, 6 частей растертых алюминиевых квасцов, 40 частей казеинового клея.

Целлулоидный клей — раствор целлулоида в ацетоне (любой густоты). Для приготовления клея часто используется фотопленка отмытая от эмульсии. Этот клей хорошо склеивает органические стекла. Органическое стекло так же хорошо склеивается клеем из стружки органического стекла, разведенной на дихлорэтаноле. Этот клей несколько лучше, так как дихлорэтан несколько лучше растворяет склеиваемые поверхности, что увеличивает прочность шва.

Водоупорный клей. Водоупорный и кислотоупорный лак для деревянных и других изделий. Изготавливается из 12 частей керосина, в которых растворяется 1 часть каучука, после полного растворения каучука в керосине (несколько дней) добавляют 2 части асфальта. Клей применяется в разогретом виде.

Кислотоупорная замазка — наносится в горячем виде на очищенные места. Состав: серы — 96 г, поваренной соли — 2 г, канифоли — 2 г, наполнитель — мелкоистолченное стекло, которое добавляется в подогретую смесь до нужной густоты.

Смолистая замазка — служит для склеивания эбонитовых, стеклянных сосудов. Готовят в металлической посуде на слабом огне горелки. Состав: канифоли — 40 г, резинового клея — 5 г. Хранится неограниченное время.

Часто в физической лаборатории употребляется универсальная замазка (1 часть венецианского скипидара и 5 частей пчелиного воска) — применяется для склеивания трубок, пластинок, закрепления зеркал, призм и т. п. Приготавливается небольшими порциями, так как окисляется быстро.

Для этих же целей часто применяется замазка воск — канифоль (1 часть воска, 1 часть канифоли). Эта замазка применяется в вакуумной технике (упругость паров такая же, как и у пидеина). Хорошим составом для заделки печей в вакуумных установках является шеллаковый клей (лак) — раствор шеллака в чистом спирите. Раствор можно приготовить нужной густоты. При нагревании полимизируется.

Шеллаковая замазка — смесь 20—30%-ного древесного дегтя с шеллаком. Имеет упругость паров несколько больше, чем у пидеина. На этот состав не действует вода, сероуглерод, бензин, бензол, скипидар, слабо действуют кислоты.

Смесь шеллака с бутилфталатом имеет очень низкое давление паров и еще более чем шеллаковая замазка и пидеин пригодна при работе с высоким вакуумом.

Для получения хорошо отражающей шкалы или циферблата прибора часто используется эмаль. Способ приготовления эмали: белый воск расплавляют на небольшом огне и добавляют

в него чистые свинцовые белила, тщательно размешивая смесь. Эмаль хорошо пристает к чистой, слегка подогретой поверхности. В некоторых случаях можно использовать холодную эмаль — тщательно размешенные 250 г хлоркальция в 100 г воды.

Другие полезные советы

При обслуживании физической лаборатории от работников требуется знание большого числа различных приемов в работе (а иногда просто изобретательность). В ряде случаев выполнение той или иной работы тормозится, например, отсутствием нужного количества аккумуляторов или какого-либо материала, который без большого ущерба мог бы быть заменен другим. На протяжении изложения первого раздела мы неоднократно останавливались на различных рекомендациях. Остановимся еще на некоторых.

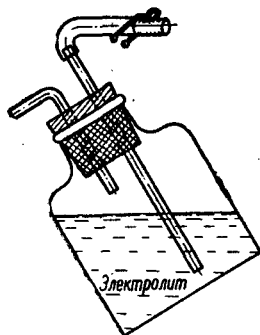


Рис. 64. Устройство для заливки электролитов.

Восстановление аккумуляторов, у которых испорчены положительные пластинки, можно провести за счет уменьшения их емкости. Для этого вместо испорченных положительных вставляются отрицательные из других аккумуляторов. При дальнейшей работе с таким реставрированным аккумулятором емкость его несколько возрастает. Если пластины не сильно засульфитировались, то сульфит удалить можно, используя следующий прием. Аккумулятор промывают 25%-ным раствором пищевой соды и ставят под зарядку, используя в качестве электролита 20—30%-ный раствор поваренной соли. Операцию повторяют дважды или трижды, увеличивая концентрацию соды до 40%. Для заливки аккумулятора электролитом удобно пользоваться резиновой грушей или устройством, принцип работы которого ясен из рис. 64. При работе с кислотными аккумуляторами полезно иметь под рукой крепкий раствор соды или 10%-ный раствор нашатырного спирта. При попадании кислоты на одежду или тело такие растворы быстро ее нейтрализуют.

Состав чернил для писания на стекле: 2 части фуксина (или анилина, или ультрамарина УДН), 10 частей глицерина, 50 частей спирта и 5 частей сахара. Эти чернила могут быть также использованы для пишущих устройств с андуляторными перьями (не засыхают, не засоряют выводного канала пера).

Пересохшая резина восстанавливает свои свойства после 1—2-часового пребывания в чистом керосине. При ремонте

электроприборов вместо слюды или асбеста можно применять глину (например, при ремонте паяльников, печей и т. п.).

Эбонит, органическое стекло и другие легкоплавкие изоляторы быстрее и легче режутся раскаленной (например, никелиновой) проволокой. Такая электрическая пила может заменить обычную при работе с деревом.

Сварить ветви термопары, порвавшиеся в результате длительного употребления или изготовляемой вновь, можно следующим способом. Размельченный графит насыпается в металлическую коробку. Один контакт электрической цепи присоединяется к одной из ветвей термопары, скрученных вместе, а другой — к металлической коробочке с графитом. Затем скрученный конец термопары опускают в графит на глубину 0,5—1 см и постепенно вводят напряжение с помощью ЛАТРа или потенциометра. При этом подбирается такой ток, чтобы образовался дуговой разряд между графитом и термопарой, затем производится сварка концов. Этим методом можно сваривать термопары толщиной от 0,5 до 1,8 мм из платины, меди, железа, константана, хромеля, алюминия и других материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Иоффе. Техника физического эксперимента. ОНТИ, М., 1933.
2. С. Ф. Веселовский. Стеклодувное дело. Госхимиздат, М., 1950.
3. К. В. Чмутов. Техника физикохимического исследования. Госхимиздат, М., 1954.
4. Методы измерения температуры. Сб. статей. Т. II. ИЛ, 1954.
5. Дж. Стронг. Техника физического эксперимента.
6. К. П. Яковлев. Физический практикум. Т. III. Гостехиздат, М., 1955.
7. В. С. Веселовский, И. В. Шмаиенков. Нагревательные приборы в лабораторной практике. Гостехиздат, М., 1951.
8. Освальд, Лютер и др. Физико-химические измерения. ОНТИ, М., 1935.
9. Д. Ж. Роуден. Предохранительные покрытия металлами. ОНТИ, М., 1935.
10. Э. Ангерер. Техника физического эксперимента. Физматгиз, М., 1962.
11. Н. С. Шорников. Электронные приборы для контроля и автоматического регулирования температуры. «Энергия», М., 1964.
12. Н. Г. Алексеев, В. А. Прохоров, В. К. Чмутов. Электронные приборы и схемы в физико-химическом исследовании. Госхимиздат, М., 1961.
13. П. И. Воскресенский. Техника лабораторных работ. «Химия», М., 1964.
14. Конструкционные материалы. Т. I—III. «Советская Энциклопедия» 1962—1965.
15. К. Лион. Приборы для научных исследований. «Машиностроение», М., 1964.
16. В. Д. Кинджери. Измерения при высоких температурах. ГИНТЛ, М., 1963.

Глава 5

ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

§ 1. Свойства вакуума

Вакуумом в строгом смысле слова называют пространство, лишенное частиц вещества. В технике вакуумом называют пространство, в котором газ находится под давлением ниже атмосферного.

Если длина свободного пробега молекулы газа меньше расстояния между стенками сосуда $\lambda \ll d$, говорят о низком вакууме в этом сосуде. Частным случаем низкого вакуума будет газ, находящийся при атмосферном давлении. Если длина свободного пробега молекулы газа будет больше линейных размеров сосуда $\lambda \gg d$, такое состояние газа называют высоким вакуумом.

В случае низкого вакуума стенки сосуда с данным газом обычно покрыты плотным слоем адсорбировавшихся на них молекул этого газа. Поэтому соударения, которые происходят вследствие хаотического движения молекул со стенками сосуда, можно рассматривать как упругие.

В случае высокого вакуума стенки сосуда далеко не полностью адсорбируют на себе молекулы, а потому чаще всего соударения будут происходить между молекулами или атомами вещества стенок.

В результате теплового движения молекул вещества, помещенного в вакуум, часть молекул может покидать границы вещества и испаряться в окружающее пространство. В случае низкого вакуума скорость такого испарения невелика, ибо в результате ничтожной длины свободного пробега молекулы газа молекула вещества будет сталкиваться с молекулами газа, что затруднит ее вылет из вещества и весьма вероятно возвращение вылетевшей молекулы вещества обратно. В случае высокого вакуума весьма мала вероятность соударения молекулы вещества с молекулами газа, а потому вещества в высоком вакууме испаряются очень быстро.

В условиях низкого вакуума теплопроводность газа не зависит от давления, ибо по мере роста давления увеличивается не только число носителей тепла, но и растут потери тепла на взаимодействие между молекулами. В условиях высокого вакуума

ввиду малой вероятности потерь тепла на взаимодействие между молекулами теплопроводность газа прямо пропорциональна величине остаточного давления.

§ 2. Получение высокого вакуума

Вакуумная установка

Механизмы, приспособления и приборы, необходимые для получения, сохранения и измерения вакуума, все вместе составляют вакуумную установку. Рассмотрим типичную схему вакуумной установки (рис. 65).

Откачка воздуха из рабочего пространства (колбы) производится форвакуумным и вакуумным насосами. Измерение ва-

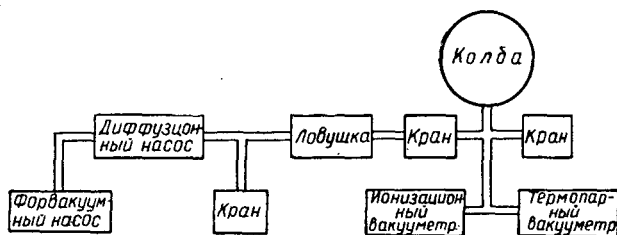


Рис. 65. Блок-схема вакуумной установки.

куума производится обычно термопарным и ионизационным манометрами. Для ликвидации попадания паров масла перед исходным патрубком высоковакуумного насоса ставится ловушка. Для перекрытия отдельных частей установки и впуска воздуха во всю установку предусматривается наличие ряда кранов, зажимов и вентиляей.

Вакуумная техника в настоящее время обеспечивает получение давлений порядка $10^{-3} \div 10^{-12}$ мм рт. ст. (максимальное разрежение, полученное в настоящее время, составляет 10^{-14} мм рт. ст.). Поэтому понятно, что одним каким-либо способом невозможно перекрыть весь указанный диапазон давлений. Отсюда и наличие разнообразных приборов и установок для получения вакуума, начиная от грубых воздушных насосов и кончая ловушками и поглотителями-геттерами. В настоящее время имеется два основных способа получения вакуума: при помощи вакуумных насосов, а также ловушек и поглотителей.

Вакуумные насосы, их конструкции и принцип действия

Все вакуумные насосы разделяются на два больших класса: форвакуумные насосы, дающие разрежение $10^{-2}—10^{-3}$ мм рт. ст., и высоковакуумные насосы — $10^{-1} \div 10^{-7}$ мм рт. ст.¹

¹ Системы, обеспечивающие получение вакуума выше 10^{-8} мм рт. ст., называются сверхвакуумными и рассматриваться не будут.

Для определения основных параметров вакуумных насосов рассмотрим кривую откачки формоввакуумного насоса, то есть зависимость изменения давления от времени действия насоса (рис. 66). Из кривой видно, что сначала давление плавно уменьшается, а затем остается постоянным. Величина давления, соответствующая насыщению, называется предельной для данного насоса. Причиной наличия предельного давления, или предельного вакуума, является невозможность избежать конструктивных недостатков (пары, масла, наличие «вредного» пространства, выделение газа со стенок материала, из которого сконструирована установка). Сам насос является поставщиком некоторого количества газа: невозможно осуществить абсолютно герметическое соединение отдельных частей насоса и соединение его с установкой. Таким образом, в процессе

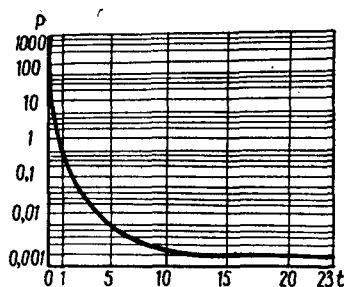


Рис. 66. График скорости откачки насоса.

работы насоса в конце концов наступает такое состояние, при котором количество газа, откачиваемого насосом, равно количеству газа, поступающего в него.

Другим параметром вакуумного насоса является начальное давление, то есть то давление, с которого начинает работу насос. Для форвакуумных насосов это давление совпадает с атмосферным, для высоковакуумных пароструйных насосов оно значительно ниже. Начальное давление по своей величине равно противодавлению со стороны выбрасывающего отверстия; иначе его называют предварительным разряжением, с которого начинает работать насос. Третьим основным параметром насоса является скорость откачки. Под скоростью откачки понимают количество газа в литрах, удаляемое в единицу времени насосом из откачиваемого пространства при данном давлении p ; обозначается S .

Формовакуумные насосы дают возможность получить разрежение 10^{-2} — 10^{-3} , чего бывает иногда недостаточно для целого ряда работ (испарение в вакууме, напыление некоторых металлов, выращивание кристаллов, исследование фотоэффекта, работы выхода электронной эмиссии и т. п.). Для этих работ пользуются давлением 10^{-4} — 10^{-6} мм рт. ст. Для достижения таких разрежений применяются пароструйные насосы, начальное давление которых должно быть значительно ниже атмосферного. Поэтому выходной патрубок пароструйного насоса должен быть соединен с выходным патрубком формовакуумного насоса, который к моменту пуска пароструйного насоса должен создать в системе давление ниже критического.

В зависимости от величины давления, создаваемого у входа в пароструйный насос, имеет место различный механизм действия струи рабочей жидкости. При относительно высоких давлениях $10-10^{-1}$ мм рт. ст. основную роль при захвате газа струей пара играет внутреннее трение и трение газа о внешний слой струи (так называемое, эжекторное действие струи). При давлениях порядка 10^{-2} мм рт. ст. и ниже основную роль начинает играть диффузия; такие насосы называются диффузионными.

Принцип действия диффузионного насоса рассмотрим на примере работы стеклянного ртутного диффузионного насоса (рис. 67). Ртуть поддерживается при температуре кипения (нагреватель включается после того, как уже достигнуто критическое давление). Пар, поступая по паропроводу 3, попадает в сопло 4, где достигает значительной скорости. Через сопло пар попадает в холодильник, омываемый холодной водой, в результате чего конденсируется и через изогнутую трубку поступает обратно в испаритель. Таким образом, осуществляется циркуляция рабочей жидкости и непрерывное действие насоса. Откачиваемый воздух через выпускной патрубок 8 попадает в сферу действия струи. Ввиду того, что газ движется в направлении, перпендикулярном направлению движения струи, статическое давление в этом направлении ничтожно, а поэтому происходит весьма интенсивная диффузия газа в струю пара. Отсюда газ при прохождении мимо выходного отверстия, где струя расходится в радиальных направлениях и, следовательно, имеет меньшую скорость, выбрасывается наружу. Необходимым условием при этом является достижения у выходного отверстия давления ниже критического, иначе струя пара с откачиваемым газом не «пробьет» этого пространства и будет заворачивать обратно в вакуумную установку.

Недостатком стеклянных ртутных насосов является, во-первых, то, что они стеклянные, а следовательно, неустойчивые к механическим и термическим воздействиям, и, во-вторых, то, что они ртутные. Ртуть имеет давление насыщающих паров уже при комнатной температуре 10^{-3} мм рт. ст., и, следовательно, для достижения более высокого вакуума требуется вымораживающая ловушка. Кроме того, ртуть, проникая через вакуумную установку в окружающее пространство, оказывает вредное действие на организм. Поэтому в настоящее время везде, где это возможно, используются металлические паромасляные насосы с давлением паров рабочей жидкости порядка $10^{-6}-10^{-7}$ мм рт. ст.

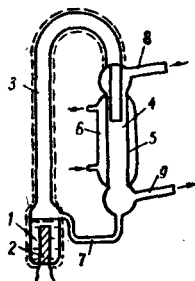


Рис. 67. Схема ртутного диффузионного насоса.

Рассмотрим работу и конструкцию паромасляного насоса на примере насоса ЦВЛ-100, схема его приведена на рис. 68. Насос ЦВЛ-100 состоит из корпуса, паропровода и электронагревателя. Корпус насоса представляет собой латунный цилиндр с припаянным к нему фланцем 4 и корпусом бунстера 7. Нижняя часть корпуса с днищем является кипятильником и нагревается

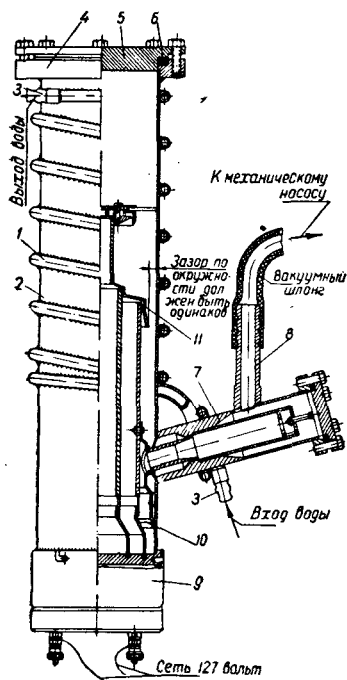


Рис. 68. Схема масляного диффузионного насоса ЦВЛ-100.

с помощью электронагревателя 9. В корпусе бунстера 7 установлен эжекторный узел, который задерживает легкие фракции масла и служит третьим соплом насоса. На корпусе насоса припаян медный змеевик 2 для водяного охлаждения с двумя штуцерами 3 для ввода и выхода проточной воды. Стальной паропровод 11 имеет две ступени сопел и устанавливается на днище корпуса насоса в специальные кольцевые канавки. Для создания кольцевого масляного уплотнения имеется специальный стакан 10.

Электронагреватель 9 состоит из корпуса, керамической плитки, никромовой спирали и двух клемм. Соединение с вакуумной установкой осуществляется патрубком 8 и фланцем 4. Крышка фланца 5, закрывающая корпус насоса при транспортировке, прижата к фланцу через резиновую прокладку 6. Находясь при температуре кипения, пары масла проходят через три ступени сопел (для более полного ис-

пользования рабочего действия паров масла). Сопла здесь сделаны в виде козырьков, так что масляные пары выбрасываются почти перпендикулярно оси насоса, которая совпадает с осью движения откачиваемого газа. После этого газ вместе с паром попадает в бунстер, где установлен эжекторный узел для давлений порядка 10^{-1} мм рт. ст. и более: из бунстера газ поступает через выходной клапан в механический насос.

Пуск и работа. Прежде чем включить подогреватель, то есть пустить в ход пароструйный насос, необходимо убедиться, что давление в откачиваемой системе ниже критического (для большинства масляных насосов оно составляет 10^{-1} мм рт. ст.), и включить охлаждение, то есть водяной кран. Ввиду того, что перед началом работы высоковакуумного насоса происходит

интенсивное испарение масла и растворенного в нем воздуха, давление в системе вначале несколько возрастает, а затем через 20—30 мин начинает резко падать, то есть включается в работу высоковакуумный насос. Остановка насоса производится путем выключения нагревателя, и через некоторое время, как только рабочая жидкость (масло) приобретает температуру, равную 50°—60° С, вакуумный насос выключается.

Ловушки и поглотители

Как мы указывали, попадание паров рабочей жидкости в систему ухудшает разрежение в ней. Поэтому для *нейтрализации* паров рабочей жидкости применяются специальные вымораживающие ловушки, которые не только конденсируют пары рабочей жидкости, но и удаляют пары некоторых газов, причем гораздо быстрее, чем это делают паромасляные насосы. Поэтому ловушки и могут рассматриваться как самостоятельное средство получения вакуума.

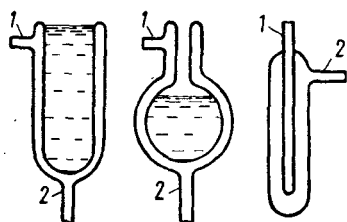


Рис. 69. Стекланные ловушки:
1, 2 — трубка для подсоединения к вакуумной магистрали.

По своей конструкции холодные ловушки представляют собой сосуды с двойными стенками (рис. 69), куда наливается охлаждающая смесь. В качестве последней употребляется смесь углекислоты с ацетоном, жидкий воздух, жидкий азот. Для иллюстрации эффективности действия вымораживающих ловушек приводим табл. 17. Таблица показывает, до какого значения можно снизить с помощью ловушек давление насыщенных паров воды и ртути, с которыми часто имеет дело вакуумная техника.

Т а б л и ц а 17

Температура, °С	Давление насыщенного пара, мм Нг	
	водяной пар	ртутный пар
100	760	—
20	17,5	$1,2 \times 10^{-3}$
0	4,6	2×10^{-4}
— 80	4×10^{-4}	10^{-10}
— 183	10^{-19}	10^{-27}

Кроме охлаждающих ловушек, применяются специальные вещества — твердые поглотители (геттеры), способные весьма

интенсивно адсорбировать оставшиеся в системе пары и газы, благодаря чему можно получить вакуум порядка 10^{-8} — 10^{-9} мм рт. ст. В качестве таких поглотителей используются прежде всего барий и его соединения, а также фосфор, магний и целый ряд других веществ. Следует иметь в виду, что вещества, ранее поглотившие газы, могут начать выделять их, в особенности при нагревании; поэтому при помещении в вакуум свежих порций веществ, способных поглощать газы, надо их прокалить (под вакуумом) в течение нескольких часов или даже нескольких суток.

§ 3. Измерение вакуума

Приборы, служащие для измерения давления, называются манометрами, приборы же для измерения весьма низких давлений иногда называются вакууметрами.

Простейшим манометром для измерения вакуума является ртутный стеклянный *U*-образный манометр, представляющий собой *U*-образно изогнутую трубку, запаянную с одного конца. В запаянный конец под вакуумом налита ртуть. Другой открытый конец присоединяется к вакуумной установке. Разность уровней в одном и другом коленах манометра в миллиметрах дает непосредственно давление в миллиметрах ртутного столба. Таким манометром можно измерять давления от 760 до 1 мм рт. ст. Для измерения более низких давлений в манометр вместо ртути заливают масло, имеющее в 15 раз меньшую плотность и, соответственно, дающее в 15 раз большую точность отсчета. Для измерения еще более низких давлений имеется целый ряд разнообразных систем манометров, но мы остановимся только на двух из них, получивших в настоящее время наибольшее распространение.

Термопарный манометр

Термопарный манометр служит для измерения давления в пределах 10^{-1} — 10^{-3} мм рт. ст. Он состоит из двух частей: манометрической лампы и измерительного устройства.

Манометрическая лампа (рис. 70) представляет собой стеклянный баллон с трубкой для присоединения к вакуумной системе. В баллоне на двух выводах смонтирован подогреватель, к двум другим вводам припаяна термопара, спай которой присоединен к нагревателю. Подогреватель нагревается током, регулируемым реостатом, ток измеряется амперметром. Спай термопары при нагреве является источником т. э. д. с. Чем выше температура спаев, тем выше т. э. д. с. развивается термопарой. Температура спаев зависит, во-первых, от температуры нагревателя (последняя с помощью тока определенной величины обычно поддерживается постоянной); во-вторых, от теплоотда-

чи в окружающую среду; последняя же, как известно, при высоком вакууме пропорциональна величине давления в системе. Чем меньше теплоотдача, тем выше температура спая. Таким образом, по показаниям милливольтметра можно судить о вакууме в системе, используя соответствующий градуировочный график, прилагаемый к каждой лампе.

Порядок работы с термопарным манометром. При достижении вакуума порядка 10^{-1} мм рт. ст., что определяется по звуку насоса или ртутному манометру, включается цепь нагревателя, устанавливается ток накала, необходимый для данной лампы, и производится расчет т. э. д. с. в милливольтках, а по графику находится соответствующее значение давления. Верхний предел измерения давления 10^{-4} обусловлен тем, что, начиная с указанного разрежения, теплопроводность газа практически не зависит от давления, ибо переносчиков тепла настолько мало, что потеря тепла обуславливается теплопроводностью и излучением самых проволочек лампы.

Ионизационный манометр

Для измерения давлений порядка 10^{-3} — 10^{-7} мм рт. ст. применяется ионизационный манометр. Последний состоит из манометрической лампы и системы питания и измерения.

Манометрическая лампа по конструкции похожа на обычную электродную лампу, имеющую три электрода: катод, сетку и коллектор с отрицательным по отношению к катоду потенциалом (рис. 71). Испускаемые раскаленным катодом электроны попадают под действием электрического поля на сетку, создавая сеточный ток. Если потенциал сетки выше потенциала ионизации газа, то при столкновении электронов, идущих на сетку, с атомами газа будет происходить ионизация. Образующиеся при этом положительные ионы под действием поля отрицательно заряженного коллектора устремляются к нему и, отдавая последнему свой заряд, создают в цепи ток, измеряемый соответствующим прибором. Таким образом, имеем наличие электронного тока в цепи сетки и ионного тока в цепи коллектора.

Пусть электронный ток будет I_e ; ионный I_i ; как показывает опыт, при достаточно низких давлениях имеет место соотно-

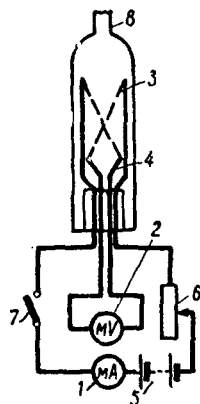


Рис. 70. Схема включения манометрической лампы термопарного вакуупора:

1 — миллиамперметр для измерения тока нагревания; 2 — милливольтметр для измерения э.д.с. термопары; 3 — подогреватель; 4 — термокара; 5 — батарея питания подогревателя; 6 — реостат; 7 — выключатель; 8 — ввод в вакуумную систему.

$$I_i = k I_e p, \quad (*)$$

где k — const, то есть ионный ток пропорционален электронному току.

Таким образом,

$$p = \frac{1}{k} \frac{I_i}{I_e}.$$

Но в процессе измерения электронный ток обычно поддерживается постоянным, тогда соотношение (*) примет вид

$$p = k_2 I_i,$$

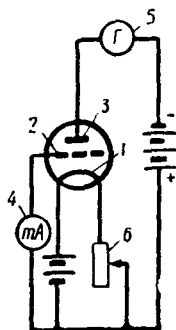
где $k_2 = \frac{1}{k I_e}$ определяется при градуировке манометра.

Итак, для измерения давления достаточно значение ионного тока умножить на коэффициент пропорциональности k_2 . Шкала приборов обычно бывает уже проградуирована в миллиметрах ртутного столба.

Отметим некоторые основные особенности ионизационного манометра. Сетка и катод имеют два выхода, назначение которых состоит в том, чтобы дать возможность пропускать через сетку ток для ее обезгаживания и прокаливания. Постоянная k_2 зависит от схемы включения, и чем меньше k_2 , тем чувствительнее прибор. В этом отношении наиболее

Рис. 71. Схема включения манометрической лампы ионизационного вакуумметра:

1 — катод; 2 — сетка; 3 — коллектор ионов; 4 — измеритель электронного ионного тока; 6 — реостат для поддержания постоянного электронного тока.



выгодной является схема, в которой катодом служит цилиндр, а анодом сетка, помещенная внутри него, причем расстояние между сеткой и коллектором является достаточно большим. Такая схема обеспечивает достаточно большой путь прохождения электронов. Если последние не попадут на сетку, то, пройдя пространство между сеткой и коллектором, завернут обратно (коллектор заряжен отрицательно), а не попав и тут на сетку, направятся обратно в поле катода и т. д. Всем этим обеспечивается большая вероятность столкновения электронов с атомами газа, а следовательно, большая вероятность ионизации.

Существенный недостаток работы ионизационного манометра выход из строя включенной манометрической лампы при внезапном повышении давления в установке выше 10^{-3} мм рт. ст. В этом случае в лампе возникает разряд между катодом и анодом, переплавляющий катод. Поэтому при работе с маномет-

ром необходимо тщательно следить за поведением давления, и при достижении 10^{-3} мм рт. ст. накал лампы немедленно нужно выключить.

Метод грубой оценки вакуума по свечению электрического разряда в газе

Так как характер электрического разряда в газе меняется в зависимости от давления, по виду разряда можно приблизительно оценить вакуум в системе. Для осуществления разряда к системе припаивается разрядник, электроды которого соединяются с катушкой Румкорфа. При включении последней по мере откачки наблюдается изменение формы и цвета разряда (табл. 18).

Т а б л и ц а 18

Давление, мм Hg	Вид явления в разрядной трубке
100—50	Между электродами фиолетовая нить, постепенно расширяющаяся («шнур»)
760	Свечения нет
1—0,1	Свечение стягивается к электродам трубки
50—10	Свечение по всей трубке
0,1—0,01	Свечение только у электродов
10 ⁻²	Начинает флюоресцировать стекло
—10 ⁻³	Свечение прекращается. Флюоресценция стекла постепенно исчезает.
При 10 ⁻⁴	Исчезает всякое свечение и флюоресценция стекла.
Выше 10 ⁻⁴	«Черный вакуум».

Несмотря на свою приближенность, указанный метод имеет весьма широкое распространение, позволяя наблюдать за процессом откачки, и во время сигнализирует о появлении течи в установке.

§ 4. Основные приемы при работе с вакуумными установками

Вакуумные соединения и шлифы

Важнейшим условием при налаживании вакуумных установок является обеспечение герметичности в местах соединения и стыков отдельных частей.

Для вакуумного соединения двух стеклянных или металлических трубок или комбинированного соединения (например, отвода вакуумного насоса и стеклянного трубопровода) приме-

няется специальный вакуумный толстостенный резиновый шланг. Соединение показано на рис. 72.

Для облегчения надевания резины на стеклянную или металлическую трубку последнюю необходимо смочить глицерином или спиртом: высыхая, спирт дает прочное соединение. Особо прочные соединения получаются в системе резина —

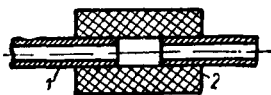


Рис. 72. Соединение трубок при помощи резинового шланга;

1 — трубка; 2 — резиновый шланг.

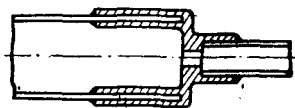


Рис. 73. Патрубок для соединения металл—стекло.

стекло; при демонтаже этого соединения часто приходится либо бить стеклянную трубку, либо обрезать резиновую.

Однако следует помнить, что при значительном разряжении резина может выделять газы, и поэтому ее свободная поверхность должна быть как можно меньше. Для уменьшения газации растворения свободной серы и удаления с резины талька резину кипятят в 5%-ном растворе щелочи КОН или NaOH. Если резиновые трубки с течением времени становятся пористыми, их можно протереть касторовым маслом, что на время устраняет дефект — трубка станет эластичной.

Для непосредственного соединения металла со стеклом, помимо непосредственного спая, которые выполняются опытными стеклодувами, можно рекомендовать следующий способ. По размеру данной стеклянной трубки изготавливается специальный металлический патрубок, имеющий две трубки: наружную с большим диаметром, чем стеклянная трубка (рис. 73) и внутреннюю с меньшим диаметром. В промежуток между ними вставляется стеклянная трубка и в месте соединения заливается плицеином; металл и стекло предварительно нагреваются.

При соединении металлических трубок довольно большого диаметра или при соединении металлических трубок разных диаметров применяются фланцевые соединения с резиновыми или металлическими прокладками. Прокладки при этом могут помещаться как в специальные закрытые пазы (рис. 74, а), так и вокруг выступов соединения (рис. 74, б).

Сами фланцы, навинченные или наваренные на трубку, стягиваются болтами. Затягивать болты следует в определенном порядке (по паре противоположных болтов) и строго равномерно, так как перекося фланцев создаст возможность течи. Если соединение работает при температуре выше 150—200°С,

применяются свинцовые прокладки. При затягивании болтов на свинец действует большое давление, в результате чего он растекается по пазу и образует удовлетворительное вакуумное

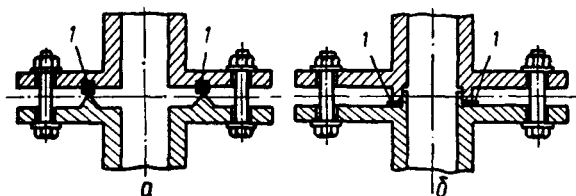


Рис. 74. Уплотнение фланцев при помощи прокладки:
1 — резиновая прокладка.

уплотнение. Прокладки из алюминия выдерживают еще большие температуры, чем свинец, однако требуют большего давления при раздавливании.

Уплотнения

В вакуумной технике часто бывает необходимо герметически соединить стеклянный колпак с металлической или стеклянной плитой. Для этого применяется специальная высоковакуумная замазка — рамзай. Рамзай готовится из смеси вазелина и чистого каучука. Присоединяемые поверхности предварительно тщательно протираются корундовым порошком. После удаления остатков абразива притертые поверхности промывают бензином и высушивают. Затем на одну из протертых поверхностей, лучше более подвижную, тонким слоем наносится рамзай, и поверхности приводятся в соприкосновение. При осторожном поворачивании вокруг общей оси необходимо добиться, чтобы поверхность плавно скользила по поверхности. Такие уплотнения обеспечивают вакуум до 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.

Хорошие результаты дает также резиновая прокладка, предварительно промытая в спирте или бензине, помещенная между стеклянным колпаком и металлической плитой. При откачке воздуха атмосферное давление с достаточной силой прижимает края стенок колпака к резине (рис. 75), в результате чего обеспечивается достаточная герметичность для получения вакуума порядка 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст. Наша промышленность выпускает колпаки уже снабженные резиновыми манжетами.

При отсутствии резиновой прокладки для обеспечения хорошей герметичности металла со стеклом колпак снаружи по линии соприкосновения заливается замазкой, состоящей из 50% пчелиного воска и 50% канифоли; последняя наносится в горячем состоянии специальной капельницей при одновременной откачке воздуха из-под колпака. Указанный прием приво-

дит к всасыванию замазки во все щели, где она застывает (рис. 76). В качестве замазки хорошо использовать выпускаемый нашей промышленностью пицеин, который так же, как и замазка воск — канифоль, легко плавится и быстро застывает, давая возможность получить вакуум 10^{-6} мм рт. ст. Для при-

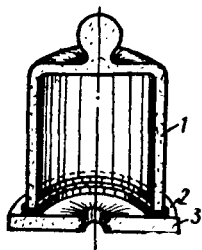


Рис. 75. Уплотнение металл—стекло при помощи резиновой прокладки:
1 — стеклянный колпак; 2 — резиновое кольцо; 3 — металлическая плитка.

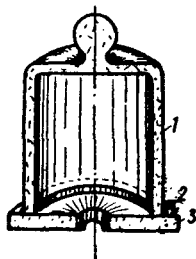


Рис. 76. Уплотнение при помощи замазки:
1 — стекло; 2 — металл; 3 — пицеин.

клеивания окошек для наблюдения в металлических колпаках используют пицеин или клей БФ. В последнем случае можно склеиваемые части не нагревать.

Краны и вентили

Весьма ответственными частями вакуумных установок являются подвижные части — краны и вентили. Краны и вентили незаменимы в тех случаях, когда необходимо быстро и многократно рассоединять различные участки вакуумной системы для впуска в систему воздуха или других газов.

При конструировании подвижных деталей следует учитывать такие требования: они должны обеспечивать достаточную герметичность, если они находятся на участках магистрали трубопровода от насоса до откачиваемого объема, не должны мешать слишком резко сечения трубопровода.

Чтобы удовлетворить в какой-то мере последнее требование, стеклянные краны делают достаточно больших размеров 5—7 см в длину и 3—4 см в диаметре. Для обеспечения легкого вращения подвижной части и достаточной герметичности края смазываются рамзаем. При этом предварительно пробка и муфта крана протираются бензином и высушиваются, затем пробка нагревается над электроплитой или над пламенем горелки до 40—80° С. После этого пробку смазывают весьма тонкими полосками рамзая так, как показано на рис. 77. После этого пробку осторожно вставляют в муфту и несколько раз проворачивают. Если при этом образуется совершенно прозрач-

ная поверхность без полос и подтеков, то кран смазан хорошо и герметичность соединения обеспечена.

Для пуска воздуха в систему и для других целей в лаборатории кафедры физики Киевского политехнического института был разработан металлический вентиль (рис. 78). Из металлического бруска (латунь, медь, сталь) вытачивается круглый стержень 1 диаметром 12—16 мм, длиной 100—120 мм. В центре его сверлятся два канала 2 диаметром от 1 до 3 мм в зависимости от того, в какой магистрали (форвакуумной или высоковакуумной) ставится этот кран. Примерно посередине стержня вырезается полукруглый паз 3, к которому подходят концы каналов. Сверху на кран надевается вакуумная резина 4, на которую в свою очередь надевается муфта 5 с роликом 6. С помощью направляющего болта, крепящегося в муфте 7, ролик может быть прижат к пазу. В том случае, когда ролик только соприкасается с поверхностью резины (резина не вжата в паз), между резиной и пазом существует свободное про-

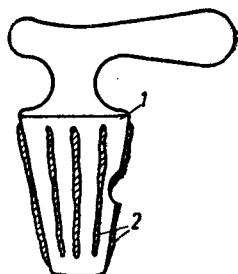


Рис. 77. Смазка крана:
1 — тело крана (стекло);
2 — рамзай.

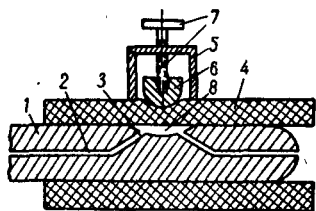


Рис. 78. Металлический кран для вакуумных установок.

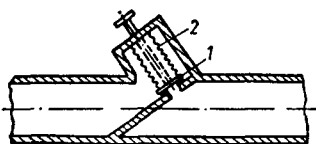


Рис. 79. Вентиль:
1 — шайба с уплотняющим материалом; 2 — гофрированная трубка.

странство 8, и воздух беспрепятственно проходит из одного канала в другой. Это положение соответствует открытому крану. Если ролик прижат к резине (с помощью направляющего болта), то резина входит в углубление паза и закрывает доступ воздуха от одного конца к другому. Кран закрыт.

Как показали испытания, такой кран прекрасно обеспечивает вакуум порядка 10^{-5} мм рт. ст. Присоединение такого крана к установке осуществляется либо путем его припайки, либо ввинчиванием с резиновой прокладкой. Если вакуумная магистраль стеклянная, обычным соединением является металл — стекло.

Для отключения высоковакуумной магистрали от низковакуумной с той целью, чтобы в установку можно было бы пус-

тить воздух, не ожидая охлаждения высоковакуумного насоса, применяются металлические краны (вентили). Основной частью вентиля (рис. 79) служит металлическая шайба с резиновой прокладкой. Весьма существенным при этом является обеспечение герметизации перемещающего механизма, который не может быть уплотнен с помощью замазки, ибо находится в постоянном движении. Выход из положения найден весьма остроумным способом, сочетающим в себе и легкость перемещения и герметичность конструкции. Стержень, несущий на себе прижимающую шайбу, помещается в гофрированную трубку из меди или латуни, один конец которой припаивается или приваривается к шайбе, а другой к корпусу установки. Благодаря гибкости такой трубки движение можно было бы осуществить самым разнообразным способом — путем сжатия и растяжения гофрированной трубки (рис. 79).

Основные правила работы с вакуумными установками

Правил работы с вакуумными установками очень много. Ввиду ограниченности объема остановимся только на некоторых главных правилах, без которых не может обойтись ни один экспериментатор, начинающий работать с вакуумом.

Получение высокого вакуума представляет собой ответственный этап любого эксперимента, а наладка установки является кропотливым трудоемким процессом; поэтому при работе с вакуумными установками во избежание ее порчи следует соблюдать ряд предосторожностей. Так, при пуске перед включением мотора следует провернуть маховик насоса 2—3 раза, что обеспечит хорошую смазку и уменьшит трение металлических частей, следовательно, уменьшит нагрев насоса. Подогрев масла вреден, ибо при этом происходит испарение масла и растворенных в нем веществ (например, воды), что приводит к порче внутренних стенок установки. Поэтому не следует допускать перегрева насоса в процессе работы его свыше 50° С. Наибольший перегрев наступает при давлениях порядка 100 мм рт. ст., поэтому ни в коем случае нельзя оставлять включенным насос, если не закрыты краны, соединяющие вакуумную систему с атмосферой.

Кроме того, абсолютно недопустимо, чтобы на установке находились посторонние предметы, угрожающие ее чистоте и целости. Понятно, что все детали, помещаемые в откачиваемое пространство, должны быть тщательно промыты и протерты, иначе наличие грязи будет источником посторонних газов, а попадание ее в насос может привести к порче. С этой точки зрения полезно оставлять вакуумную установку после работы под вакуумом.

В том случае, если в начале работы установки вакуум дол-

го не повышается и есть гарантия в том, что установка не имеет течей и насос исправен, следует провести ряд «полосканий» установки. Этот прием заключается в следующем: к выпускному крану присоединяется баллончик объемом 2—3 см³ с краником и, не выключая форвакуумного насоса, открывают доступ порции воздуха в вакуумную систему. Многократным повторением этого приема достигают того, что адсорбированные на стенках сосуда молекулы смываются потоком впускенного воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Королев. Основы вакуумной техники. Гостехиздат, М., 1957.
2. Дж. Стронг. Техника физического эксперимента.
3. Р. Янкель. Получение и измерение вакуума. Гостехиздат, М., 1930.
4. В. А. Ланис, Л. Е. Левина. Практические основы вакуумных испытаний, Гостехиздат, М., 1955.
5. А. Григоров, П.Т.Э. № 6, 1959.
6. Современная вакуумная техника. Сб. статей. Под ред. Черепина, ИЛ, 1963.
7. С. Демман. Научные основы вакуумной техники. Изд-во «Мир», М., 1964.
8. А. Шампе. Физика и техника электровакуумных приборов. Госэнергоиздат, М.—Л., 1963.
9. В. Л. Ланис и Л. Е. Левина. Техника вакуумных испытаний. Госэнергоиздат. М.—Л., 1963.
10. Дж. Ярвуд. Техника высокого вакуума. Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
11. Я. Грашковский. Технология высокого вакуума. ИЛ, М., 1957.
12. Физический энциклопедический словарь. Т. I. «Советская энциклопедия», М., 1962.
13. Вакуумное оборудование и вакуумная техника. Под ред. А. Тутру и Р. Уокерлинга. ИЛ, М., 1951.
14. А. А. Кузьмин. Лабораторный сверхвысоковакуумный агрегат с прямонакальными твердофазными испарителями титана. ПТЭ. № 3, 1963, стр. 126.
15. Л. Паты. Измерение сверхвысокого вакуума. ПТЭ. № 6, 1959., стр. 5.
16. М. И. Меньшиков. Развитие техники высокого вакуума. ПТЭ. № 4, 1959, стр. 3.
17. П. И. Мартинсон, К. Н. Мызников. Получение ультравысокого вакуума сорбцией газов и пленками. ПТЭ. № 4, 1961, стр. 71.
18. М. В. Тихомиров, Ю. Я. Шарвин. Получение ультравысокого вакуума с помощью обычных откачивающих устройств. ПТЭ. № 1, 1962, стр. 137.

Глава 6

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

В современной лабораторной практике методы поверхностных покрытий занимают особое место в силу того, что они широко применяются как вспомогательные методы при изучении целого ряда вопросов современной физики (осуществление наружных контактов при исследовании электрических свойств материалов, получение реплик — копии рельефа данной поверхности, при изучении поверхностных свойств, защитные полупрозрачные слои и т. п.), а также имеют самостоятельное значение (при изучении свойств тонких слоев, при получении зеркальных отражающих поверхностей и т. п.). Поэтому особые приемы их осуществления имеют смысл описать в отдельной главе¹.

§ 1. Впекание

Метод впекания легче и чаще всего применяется для нанесения тонкой пленки металла на стекло или фарфор. Он, впрочем, пригоден для получения тонких пленок лишь для благородных металлов, которые при сильном нагревании восстанавливаются из своих соединений.

Стекло или фарфор, которые подлежат покрытию, надо намазать тонким слоем раствора какой-либо соли соответствующего металла в масле. При нагревании масло выгорает, а соль восстанавливается, оставляя тонкий слой металлического осадка. Если стекло нагреть до размягчения, этот осадок превращается в сплошную пленку, прочно приставшую к стеклу. Пленки, нанесенные впеканием на стекло или фарфор, можно путем гальванопластики омеднить и потом паять, что дает возможность создать прочное соединение между металлом и фарфором, пригодное для вакуумных работ.

§ 2. Способы химического покрытия металлом

Существует два типичных способа химического покрытия металлом (серебром): способ Брешира и способ с применением

¹ См. также гл. 4, § 1.

сегнетовой соли. Остановимся лишь на втором, так как он наиболее распространен.

Очистка (подготовка поверхности перед покрытием)

Особое внимание при осуществлении любого поверхностного покрытия должно быть уделено очистке поверхности, так как наличие органических или неорганических веществ резко ослабляет силы адсорбции, удерживающие наносимое вещество. Более того, изменяющиеся загрязнения могут взаимодействовать с наносимым веществом и таким образом привести к изменению его состава и структуры.

Поверхность подготавливается таким образом: а) протирается чернильной резинкой (удаление микрозагрязнений); б) промывается в мыльной воде, затем тщательно прополаскивается в дистиллированной; в) протирается тампоном, смоченным эмульсией мелкого мела; г) поверхность протравливается крепкой азотной кислотой (для удаления органических остатков); в) обрабатывается раствором хлористого олова и тщательно прополаскивается.

Рабочие ванны и мензурки также должны быть тщательно промыты.

Способ серебрения с сегментовой солью

Этот способ неоднократно применялся в лаборатории техники физического эксперимента кафедры физики Киевского политехнического института и хорошо себя оправдал.

Для серебрения с сегнетовой солью применяется два раствора.

Раствор А готовят так: 5 г азотнокислого серебра растворяют в 300 см³ воды и добавляют в него аммиак так, чтобы раствор с выделившейся окисью серебра был еще достаточно прозрачен. В том случае, если раствор сделался совершенно прозрачным, его обратным титрованием слабым раствором азотнокислого серебра доводят до окраски соломенного цвета. Затем раствор фильтруют и разбавляют до 500 см³.

Раствор В готовят так: 1 г азотнокислого серебра растворяют в 500 см³ воды. Затем раствор доводят до кипения и добавляют в него заранее приготовленный раствор из 0,83 г сегнетовой соли в 1 л воды. После этого продолжают кипячение до тех пор, пока не выпадает серый осадок. Раствор фильтруют в горячем состоянии и разбавляют до 500 см³. Для серебрения зеркала растворы А и В надо смешать в одинаковых объемах и сразу вылить в ванну для серебрения. Серебрение рекомендуется проводить при 20° С.

Указанным способом можно получить зеркало с любым про-

центом отражения, так как серебро оседает достаточно медленно, и можно прозрачность пленки контролировать по вспомогательному стеклу, помещенному в ту же ванну. Растворы *А* и *В* могут храниться в темноте более месяца, оставаясь пригодными для работы. Что касается подготовки поверхности к химическому покрытию, то она должна быть максимально чистой. Наиболее простым и вполне надежным способом, кроме указанного, является тщательное промывание покрываемых поверхностей в дистиллированной воде мыльной губкой до тех пор, пока вода не будет смачивать равномерно всю поверхность.

§ 3. Гальваническое осаждение металла

Для получения достаточно толстого слоя металла на каком-либо проводящем ток веществе или покрытия одного металла слоем другого, либо для утолщения слоя, нанесенного впеканием, катодным распылением и тому подобное применяется метод гальванического осаждения металла.

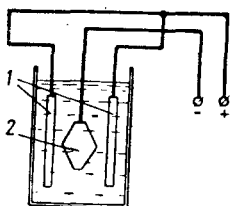


Рис. 80. Схема включения ванны для электролитического покрытия.

1 — электроды; 2 — покрываемый образец.

Перед осаждением металла поверхность обезжиривают бензином или венской известью (можно применять и 10%-ный раствор щелочи) и затем промывают дистиллированной водой.

Простейшим и наиболее часто применяемым способом гальванического покрытия является гальваническое осаждение меди.

Медные ванны: 100 г CuSO_4 растворяются в 1 л воды, плотность тока

2 а/дм². Ванна подкисляется до полного растворения меди.

Никелевые ванны: 1. $\text{NiSO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 55 г и борная кислота 40 г растворяются в 1 л воды. 2. NiSO_4 40 г, лимоннокислый никель 35 г и лимоннокислый натрий 35 г растворяются в 1 л воды. Плотность тока для ванны 0,5 а/дм².

Особенно важное значение имеет установка правильного режима для плотности тока. Нарушение его приведет к пористости, рыхлости слоя, к быстрому его окислению. Практически, чтобы установить нужный режим, нужно опустить предмет в ванну и добиваться такого тока, чтобы пузырьки газа, выделяющиеся на образце, только слегка покрывали поверхность и выделялись не особенно бурно.

Разумеется, необходимым условием осуществления покрытия является соблюдение полярности: знак минус на покрываемом образце, плюс на электродах из металла, которыми осуществляют покрытие (рис. 80).

§ 4. Катодное распыление

Во всех тех случаях, когда нежелательно соприкосновение поверхности, на которую надо нанести тонкий слой металла, с химическими реактивами или когда надо осуществить частичное покрытие поверхности и в подобных случаях, применяется метод катодного распыления металла.

Для осуществления метода катодного распыления пригодна любая вакуумная установка с отрезком трубопровода от низковакуумной (форвакуумной) магистрали, ведущей к металлической или стеклянной плите. На рис. 81 изображена типовая установка для распыления, которая состоит из стеклянного колпака 1 с отверстием наверху для ввода катода и стеклянной или металлической плиты 2 в качестве дна. Стеклянный цилиндр 3 помогает сконцентрировать разряд в нужном объеме. Катод 4, выполненный из металла, подлежащего распылению, укреплен сверху колпака. Анодом может служить металлическая плитка или металлический столик 5, на котором лежит образец. Распыление идет в тлеющем разряде, получаемом от постоянного напряжения (между катодом и анодом) порядка 1000—2000 в. В качестве источника высокого напряжения применяются: индукционная катушка, мотор-генератор, чаще ток берут из высоковольтного трансформатора с последующим выпрямлением с помощью кенотрона.

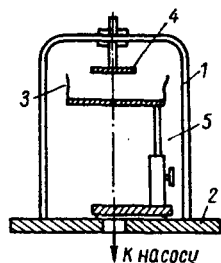


Рис. 81. Типовая схема установки для катодного распыления.

Механизм катодного распыления

Причины катодного распыления металла до сих пор еще окончательно не выяснены. Имеется ряд гипотез о механизме катодного распыления. Наиболее вероятны такие: если приложить между анодом и катодом достаточно большую разность потенциалов (1+20 кВ), то при достижении определенного разряда электроны под действием поля, испытывая относительно слабое противодействие со стороны молекул окружающего газа, устремятся на анод. Приобретая на пути к аноду достаточную скорость, часть электронов ионизирует молекулы газа (частично также и возбуждает — отсюда свечение газа). Положительные ионы кислорода и азота под действием поля летят к катоду и, ударяясь о него, нагревают отдельные участки (происходит так называемый локальный нагрев), откуда в результате термоэмиссии вылетают атомы вещества катода и летят во все стороны. Однако против этой гипотезы имеются возражения.

Для осуществления термоэмиссии необходим значительный

нагрев вещества в то время, как нагрев катода не превышает обычно 300—400° С. Кроме того, если бы причиной распыления была температура, то наиболее быстро распылялись бы более легкоплавкие металлы: олово, свинец, висмут, алюминий; и гораздо медленнее распылялись бы серебро, золото, платина. В действительности происходит почти обратное: серебро, золото и платина распыляются очень быстро, в то время как алюминий почти не распыляется.

Поэтому более вероятна вторая гипотеза, объясняющая вырывание атомов из катода не в результате термического испарения. Можно себе представить, что энергия летящего на катод иона передается распыляющемуся веществу непосредственно в виде энергетического кванта. В пользу последнего предположения говорит зависимость скорости испарения от постоянной решетки: чем больше постоянная решетка, тем быстрее испарение.

Техника катодного распыления

Подготовка поверхности. Для обеспечения достаточно чистой поверхности, а следовательно, и плотного закрепления на ней слоя распыляемого металла необходима тщательная обработка ее перед напылением. Здесь уже недостаточно последовательной обработки поверхности в мыльной воде, щелочи, а затем бензине или спирте, как это делается для химических покрытий, так как после такой обработки на поверхности остается тончайший мономолекулярный слой инородных веществ. Проверить это можно,дохнув на поверхность: дыхание оставляет пленку в виде тонкого серого налета (адсорбированная влага на загрязнениях). Для удаления такого слоя рекомендуется дальнейшая обработка поверхности потоком ионов. Ионы притягивают к себе полярные молекулы воды, спирта или бензина и тем самым полностью очищают поверхность. Для операции обработки поверхности ионами существует много способов.

1. Использование ионизированных молекул под колпаком установки. Для этого непосредственно перед распылением нужно поменять знаки напряжения на столике и на распыляемом электроде (рис. 81), то есть столик временно будет служить катодом, распыляемый электрод — анодом. Операция протекает 5—10 мин.

2. Бомбардировка обрабатываемой поверхности ионами, которые имеются в достаточном количестве в любом пламени, например, в пламени спиртовки или горелки.

Режим и правила распыления. После подготовки поверхности образец помещают под колпак вакуумной установки, предварительно закрепив в качестве катода металл, подлежащий распылению, и начинают откачку воздуха. Интересно отметить, что распыление возможно при самых разнообразных условиях: в атмосфере воздуха, кислорода, азота, водорода, аргона (но не

гелия, который препятствует распылению); при разряжениях от 1 до 10^{-3} мм рт. ст; при различных расстояниях между катодом и анодом от 5 до 0,5 см и, наконец, при различных напряжениях от 1 до 20 кв. Из всех этих условий для каждого конкретного случая необходимо найти оптимальные.

Во-первых, отметим, что газом, в котором ведется распыление, чаще всего является воздух. Затем заметим, что, измеряя ионный ток (для этого в цепи катода обычно ставится миллиамперметр), можем судить о давлении в системе, так как с изменением давления изменяется количество молекул газа в объеме, а следовательно, изменяется вероятность ионизации. Кроме того, ионный ток зависит от расстояния между анодом и катодом. Расстояние же выбирают таким образом, чтобы предмет, подлежащий покрытию, находился в первом фарадеевом темном пространстве, так как именно здесь находится максимальное количество ионизированных молекул (следовательно, и скорость распыляемых атомов здесь наименьшая). Таким образом, величина напряжения и величина ионного тока определяют режим напыления. Скорость распыления можно регулировать, изменяя величину ионного тока: чем больше ток, тем больше скорость напыления. Однако превышать определенную величину анодного тока не рекомендуется. Каждому давлению должна соответствовать определенная разность потенциалов, обеспечивающая оптимальные условия распыления. Скорость распыления, как мы указывали, является различной для различных металлов.

Таблица 19

Материал	Время распыления
Sb, Bi, Cd, Pb, Au, Pt, Ag, Zn Co, Cu, Ir, Fe, Ni, Se, Te Ta, W	Непрозрачное покрытие за 1 час Непрозрачное покрытие за 2 часа Непрозрачное покрытие за несколько часов
Al, Be, C, Mg, Si	Очень низкая скорость распыления

В табл. 19 дана сравнительная скорость распыления некоторых веществ (получаемое покрытие одинаковой толщины).

Что касается техники проведения самого распыления, то необходимо указать, что оптимальный вакуум в системе можно определить по цвету тлеющего разряда. Темно-красный густой цвет свечения, сконцентрированный в отдельных местах, говорит о плохом вакууме, при котором распыляемый металл будет сильно окисляться, а поверхность, подлежащая напылению, нагревается до большей температуры. Следует добиваться такого вакуума, в котором при максимальном ионном токе, допусти-

мом для данной установки, цвет разряда был бы бледно-розовый или бледно-фиолетовый. Свечение при этом должно охватывать равномерно всю область под колпаком установки. Недопустим также перегрев как поверхности образца, так и самого катода (в случае использования легкоплавких металлов, например висмута, последний начинает плавиться). Перегрев же поверхности напыляемого образца может привести либо к расплавлению, либо к растрескиванию поверхности, что обычно является недопустимым. Поэтому само напыление следует продолжать 5—10 мин, а в некоторых случаях и 3 мин, и в течение 10—15 мин проводить охлаждение. (В случае установки с водяным охлаждением катода распыление производится без перегрева).

§ 5. Испарение в вакууме

Кроме катодного распыления, для нанесения тонких пленок, в тех случаях, когда невозможно химическое покрытие, применяется испарение металла в вакууме. Преимуществом этого метода является отсутствие необ-

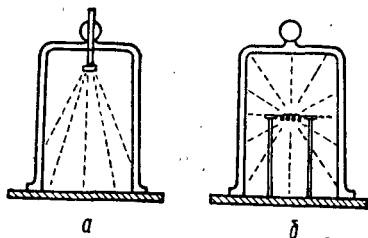


Рис. 82. Зоны действия распыленного материала:

a — зона действия при катодном распылении; *б* — зона действия при испарении (указана пунктиром).

ходимости применения высокого напряжения, а также возможность распыления металла во все стороны от распылителя (рис. 82).

Недостатком, ограничивающим возможности более широкого применения испарения металла в вакууме, является необходимость достижения более высокого вакуума (10^{-4} — 10^{-6} мм рт. ст.), что связано с конструктивным усложнением вакуумной установки.

Принцип испарения заключается в том, что при достижении определенного разрежения, начиная от 10^{-2} мм рт. ст. и определенной температуры, начинается интенсивное испускание молекулярных пучков испаряемого металла, которые конденсируются на холодной поверхности. Техника распыления также в большей степени зависит от структуры распыляемого вещества¹.

Техника распыления ковких металлов

Особенностью распыления ковких металлов является то, что они, будучи подготовленными в виде проволочных «гусариков», могут быть подвешены непосредственно на спираль испарителя

¹ Для получения особо чистых пленок используется испарение в сверхвысоком вакууме 10^{-9} — 10^{-10} мм рт. ст.

(рис. 83 и 84), закрепленную в специальном держателе. Такое устройство помещается под колпак высоковакуумной установки. К спирали подводится напряжение (10—20 в) такое, чтобы ток нагревал последнюю до бела. В этом случае висящие кусочки проволоочки испаряемого материала («гусарики») начинают плавиться и благодаря свойству смачивать вольфрам или другой тугоплавкий материал, из которого сделана спираль, не падают вниз на подложку, а остаются на впадинах спирали до полного испарения. Спираль обычно изготавливается из проволоки диаметром от 0,2 до 0,8 мм в зависимости от необходимой мощ-

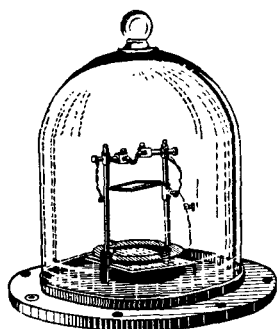


Рис. 83. Вид держателя и колпака установки для вакуумиспарения.

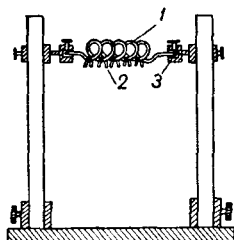


Рис. 84. Держатель для испарителей в вакууме:
1 — круглая спираль; 2 —
треугольная; 3 — прямо-
угольная.

ности нагревателя. При напылении небольших поверхностей (от 100 см²) она может изготавливаться в виде вытянутой в одном направлении спирали диаметром в 4—6 мм с шагом в 3—4 мм, на которую подвешивается 10—15 «гусариков». («Гусарики» изготавливаются из проволоки $\varnothing$ 0,08+0,2 мм, длиной 4—8 мм).

Особое внимание следует обратить на технику закрепления «гусариков». Ввиду малого их размера и упругости спиральки закрепление руками или пинцетом представляет некоторые затруднения (трудно взять «гусарик» руками, трудно повесить пинцетом один «гусарик» так, чтобы не сбросить другой и т. д.). Поэтому для закрепления спирали из бумаги скручивают трубочку, оканчивающуюся узким листочком диаметром 2—4 мм, и, смочив ее водой, касаются «гусарика», который легко пристает к бумаге и в силу неупругости последней не передает сотрясений спиральке. После того, как «гусарики» подвешены и держатель установлен под колпаком вакуумной установки, производят откачку установки до давления 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст.; после этого, постепенно увеличивая напряжение на спирали, разогревают ее до нужной температуры.

Так как металл при нагреве начинает испускать пары растворенных в нем газов, то обычно вакуум сначала падает. Поэтому следует, слабо нагрев спираль (темно-красное каление), подождать, пока давление перестанет падать и повысится опять до первоначального или близкого к нему значения. Затем, еще немного повысив напряжение, опять откачать, и так продолжать до тех пор, пока при плавлении испаряемого вещества давление не будет меняться. При появлении налета металла на образцах и стенке колпака, свидетельствующем о начале распыления, можно регулировать количество распыленного металла как визуально (количество распыленных «гусариков»), так и по времени распыления при заданной мощности нагревания. Однако более надежным способом является предварительная градуировка толщины слоя в зависимости от расстояния покрываемой поверхности до распылителя и количества испаряемого вещества. Осуществив распыление, следует снять напряжение со спирали-испарителя, после чего можно приступить к выключению вакуумной установки.

Распыление хрупких металлов и полупроводников

Распыление хрупких металлов и полупроводников, которые невозможно приготовить в виде проволочек (например, сурьма, селен), производится несколько иным способом, а именно: приготавливается специальный нагреватель, в который кладут крупинки данного вещества. В качестве испарителя можно взять горизонтальную спираль диаметром 2—3 мм с шагом 0,3—0,6, изготовленную из вольфрама. В нее осторожно пинцетом помещается предназначенное для распыления вещество, а затем спираль закрепляется в держатель, изображенный на рис. 84. Дальнейшие действия подобны тем, которые проводятся с ковкими металлами. При изготовлении спирали следует учесть, что ее шаг должен быть меньше размера крупинки, иначе последние могут легко высыпаться. Как правило, такая спираль из вольфрама пригодна лишь на один раз, так как после употребления она становится хрупкой и быстро ломается.

Для многократного употребления — в случае незначительных порций распыляемого вещества применяется конусообразная спираль (рис. 85). Она скручивается из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5—0,9 мм путем навивания на специальный конус с основанием 2—3 мм или на острие большого гвоздя. Для большей долговечности и стойкости по отношению к окислителям спираль смазывается глиноземом (Al_2O_3) и прокаливается в вакууме, после чего данный нагреватель готов к употреблению. Распыляемый материал помещается внутри конуса, а спираль зажимается в держатель, изображенный на рис. 84. Дальнейшая техника испарения подобна описанной ранее.

Для распыления веществ, не смачивающих вольфрам, применяются лодочки из тантала (рис. 86). Тантал предварительно прокатывается на вальцах до толщины 0,1—0,5 мм.

Техника распыления порошкообразных веществ и веществ, вступающих в реакцию с металлом нагревателя

Для веществ, имеющих высокую температуру плавления, (200—400° С), распыление производят из стеклянных или кварцевых пробирок, обмотанных вольфрамовой проволокой. Один

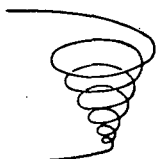


Рис. 85. Конусообразная спираль для испарения в вакууме.

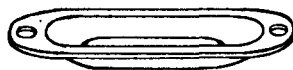


Рис. 86. Лодочки из тантала.

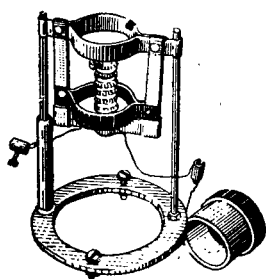


Рис. 87. Испаритель и держатель для порошкообразных материалов.

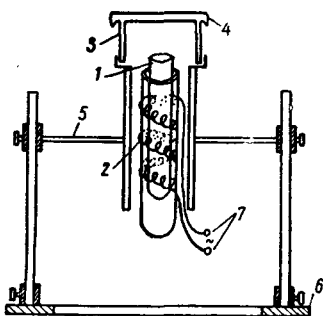


Рис. 88. Схема испарителя с держателем для испарения порошков:

1 — пробирка с веществом; 2 — спираль нагревателя;

из видов испарителей изображен на рис. 87. Схема такого испарителя приведена на рис. 88.

Для удобства пользования в данном случае обматывается не сама пробирка, а внешний сосуд, в который она вставляется; тем самым достигается легкая взаимозаменяемость пробирок. Существенную роль в данном случае играет контрольное стекло 3 в виде полого цилиндра, по степени потускнения которого из-за осевшего на нем испаряемого вещества можно судить о ходе напыления. Кроме того, стеклянный цилиндр обеспечивает известную направленность атомарных пучков, преграждая интенсивное распыление по всему объему, конденсируя вещество на своих стенках, откуда потом его можно соскоблить.

Испаритель такого вида сконструирован и хорошо себя показал в лаборатории техника физического эксперимента кафедры физики Киевского политехнического института.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Стронг. Техника физического эксперимента.
2. Дж. Роудон. Предохранительные покрытия металлами. ОНТИ М., 1935.
3. Справочник гальваностега. Гостехиздат, М., 1956.
4. Г. А. Рудыкин. Техника измерения размеров в машиностроении. Машгиз, М., 1949.
5. С. Метфессель. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. Госэнергоиздат, М., 1963.
6. А. Д. Григорьев. Установка для получения пленок методом испарения в вакууме. ПТЭ. № 3, 1962.
7. Н. В. Плешивцев. Техника катодного распыления. ПТЭ. № 5, 1964, стр. 5.
8. Ю. А. Дурасова, Е. Н. Рыбак. Установка для измерения толщины тонких пленок. ПТЭ. № 1, 1963.
9. С. Н. Шульман. Контроль параметров полупроводниковых пленок в процессе накопления. ПТЭ. № 1, 1963.
10. Н. А. Биньковский, О. Ф. Немец, В. Н. Степаненко. Получение свободных пленок методом вакуумного испарения. ПТЭ, № 5, 1961.
11. Г. М. Кукавадзе, В. Н. Иванов, В. Р. Журавлев. Получение слоев некоторых тугоплавких материалов в вакууме. ПТЭ. № 1, 1961.
12. Г. А. Воробьев, В. А. Кострыгин, Л. Т. Мурашко. Методика получения тонких слоев диэлектриков. ПТЭ. № 5, 1961.
13. А. П. Румянцев. Расчет толщины пленок получаемых испарением в вакууме. ПТЭ. № 5, 1959, стр. 102.

Глава 7

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

§ 1. Теоретический обзор

Физика полупроводников—новая область науки, получившая развитие в последние 20—25 лет. Электротехника знала лишь металлы с удельной проводимостью 10^{-5} — 10^{-6} $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и изоляторы с сопротивлением 10^{10} — 10^{15} $\text{ом} \cdot \text{см}$. Все материалы с проводимостью, лежащей в диапазоне 10^5 — 10^{10} $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, не изучались физикой; теперь они относятся к классу полупроводников.

Однако классификация материалов на изоляторы, полупроводники и металлы произведена не по этому формальному признаку (порядок проводимости). Вопрос несколько сложнее. По представлениям современной физики, каждый атом какого-либо тела состоит из центрального ядра, окруженного электронным облаком, распределенным по ряду квантовых (энергетических) уровней, причем каждый уровень не может содержать более двух электронов с противоположными спинами (принцип Паули). Название «энергетические уровни» отчасти связано с тем, что «разрешенные» значения энергии удобно представлять в виде энергетической диаграммы, на которой каждое значение энергии изображается горизонтальной линией.

Когда газ уплотняется, образуя твердое или жидкое тело, все тело действует как одна электронная система, и идентичные энергетические уровни отдельных атомов в результате взаимодействия атомов между собой расщепляются в энергетические зоны, характеризуемые, однако, несколькими иными энергиями. Так же, как и для одной молекулы, квантовые уровни тела, образованные таким путем, подчинены принципу Паули. Известно, что только валентные электроны могут участвовать в переносе заряда и, следовательно, определяют электропроводность тела. Электрон не может перейти с одного энергетического уровня на другой, если тот не свободен. Однако вне этой заполненной зоны внутри тела находится еще свободная зона (зона проводимости), которая содержит столько же квантовых уровней, сколь-

ко и заполненная. Область энергии между границами этих зон носит название запрещенной зоны (рис. 89).

Можно представить три типичных случая.

1. Зона проводимости (P) налагается на заполненную зону (H), и электроны могут свободно перемещаться—случай металла.

2. Запрещенная зона Z настолько широка, что ни электрическим, ни тепловым воздействием нельзя электрон перевести из зоны H в зону P (рис. 89) без разрушения тела — случай идеального изолятора.

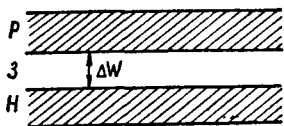


Рис. 89. Зонная диаграмма для твердого тела:

P — зона проводимости;
 Z — запрещенная зона; H —
 заполненная зона (нормальная, валентная).

3. При полностью или частично заполненной зоне H (рис. 89) ширина зоны Z невелика, и электроны любым из факторов (электрический, тепловой и т. п.) могут быть переведены из зоны H в зону P — случай электронных полупроводников.

Классификация по этим типовым случаям зависит, следовательно, от ширины запрещенной зоны.

Остановимся подробнее на процессе образования электронов проводимости в полупроводниках. Для конкретности рассуждений рассмотрим кремний, являющийся типичным полупроводником.

Атом кремния (четвертая группа таблицы Менделеева) имеет четыре валентных электрона. В решетке кремния (о кристаллических решетках смотри подробнее в гл. 9, §1) расположение атомов таково, что каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь между двумя соседними атомами обусловлена парой электронов. Таким образом, все валентные электроны участвуют в образовании связей и не являются участниками электропроводности. При повышении же температуры слабосвязанные валентные электроны уходят в зону проводимости (под действием тепловых колебаний) и становятся электронами проводимости.

Нетрудно догадаться, что с ростом температуры от абсолютного нуля концентрация электронов в зоне проводимости будет расти (при абсолютном нуле полупроводник — идеальный изолятор). Рост электропроводности в полупроводниках в отличие от металла, где концентрация электронов проводимости почти не зависит от температуры, идет по экспоненциальному закону и может быть описан формулой

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W_1}{2kT}}, \quad (1,7)$$

где ΔW_1 в первом приближении — энергия активации, то есть энергия, необходимая для того, чтобы электрон из заполненной

зоны перебросить в зону проводимости. Формула (1,7) может быть легко представлена графически: прологарифмируем обе части (1,7)

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta W_1}{2kT} \quad \text{или} \quad \lg \sigma = \lg \sigma_0 - 0,43 \frac{\Delta W_1}{2kT}.$$

Нанося по оси абсцисс (рис. 90) $\frac{10^3}{T}$, а по оси ординат $\ln \sigma$, должны получить прямую линию, наклон которой к оси абсцисс ($\text{tg } \varphi$) определит энергию ΔW_1

$$\text{tg } \varphi = \frac{1}{0,4} \Delta W_1 = \frac{0,43 \cdot 10^{-3} \cdot 12000}{2} \Delta W_1.$$

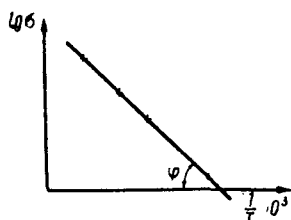


Рис. 90. График температурной зависимости собственного полупроводника.

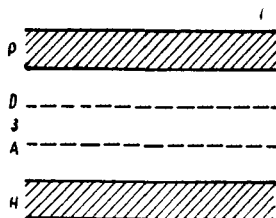


Рис. 91. Зонная диаграмма для полупроводника с примесями: D — дойорные уровни; A — акцепторные уровни.

Кроме процесса переноса заряда с помощью электронов проводимости, возможен и другой механизм электропроводности. Он обусловлен тем, что всякий разрыв валентной связи приводит к появлению вакантного места с отсутствующей связью — «дырки». Легко видеть, что возникновение дырок в кристалле создает дополнительную возможность для переноса тока. (Наглядной моделью может служить полупустой вагон трамвая, где пассажиры пересаживаются ближе к выходу, а пустые, свободные места движутся в противоположном направлении).

Движение пустого места (дырки) эквивалентно движению положительного заряда. Рассмотренный процесс получил название дырочной проводимости.

Если бы внутренняя структура полупроводника соответствовала схеме (рис. 89), то работа была бы такой, что проводимость по порядку величины не превышала бы $10^{-10} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. На самом деле проводимость полупроводника часто бывает значительно выше — до $1 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Такое отступление связано с наличием примесей в полупроводнике, что вполне объясняется изложенными выше представлениями о строении полупроводников.

Разберем для примера влияние примесей мышьяка и бора на образование различных типов носителей в кремнии. Если место четырехвалентного атома кремния в узле кристаллической решетки займет пятивалентный атом мышьяка, то освободившийся электрон образует донаторный (донорный) уровень, который и обуславливает добавочную проводимость. При замещении атома кремния атомом трехвалентного бора будет иметь место недостача одного электрона, что приведет к образованию акцепторного уровня или, другими словами, дырочной проводимости. Энергетическая схема изображена на рис. 91.

Ясно, что электрону перейти в зону P с уровня D легче, чем из зоны N (увеличивается электронная проводимость). Так же легко может произойти переход электрона из зоны N на уровень A (увеличивается дырочная проводимость).

Следует отметить, что при низких температурах доминирующую роль играет примесная проводимость (проводимость, обусловленная примесями, под которыми в общем случае подразумевается любой дефект в решетке кристалла полупроводника), а собственная проводимость, то есть проводимость, обязанная перебросу электронов из зоны N в зону P , начинает проявляться и играет решающую роль при высоких температурах.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: Исследовать температурный ход удельной проводимости полупроводников.

Основные этапы работы:

1. Заготовка подложки образца.
2. Взвешивание подложки образца.
3. Нанесение слоя полупроводника методом испарения в вакууме.
4. Определение веса слоя (вторичное взвешивание).
5. Нанесение рабочих контактов (методом катодного распыления или испарения в вакууме).
6. Получение экспериментальных данных.

Заготовка подложки. Из стеклянной пластинки вырезывается прямоугольник $(2,5 \times 1,1)$ см² и шлифовкой подгоняется по трафарету.

Взвешивание. Взвешивание подложки и вторичное взвешивание подложки со слоем полупроводника проводится (гл. 6, § 6) для определения толщины нанесенного слоя.

Нанесение слоя полупроводника. Навеска исследуемого полупроводника помещается в пробирку-испаритель, закрепленную в специальный держатель. Над испарителем закрепляется подготовленная соответственным образом подложка образца. После получения вакуума порядка 10^{-3} мм рт. ст. включается накал спирали пробирки-испарителя.

Нанесение рабочих контактов. Производится методом катодного распыления металла в вакууме. Сам образец (со слоем полупроводника) помещается в держатель, имеющий специальную форму верхней крышки.

Экспериментальные данные можно получить на установке, принципиальная схема которой приводится на рис. 92.

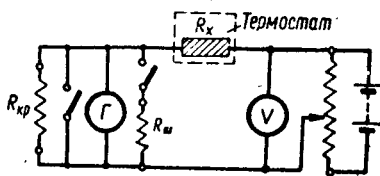


Рис. 92. Принципиальная упрощенная схема для измерения температурной зависимости сопротивления полупроводников:

$R_{кр}$ — критическое сопротивление; $R_{ш}$ — сопротивление шунта; R_x — исследуемое сопротивление.

Приемы по технике эксперимента были описаны в разделе первом настоящего практикума.

§ 3. Обработка результатов

Оформляя данное исследование, необходимо составить такие таблицы и графики:

- I. Таблица определения толщины слоя.
- II. Запись режима работы вакуумных установок.
- III. Таблица измерений параметров образца (зависимость величины давления от времени откачки).
- IV. Таблица измерений проводимости образца в зависимости от температуры.

V. График зависимости $\lg \sigma$ от $\frac{1}{T} \cdot 10^3$.

VI. Рассчитать энергию активизации.

VII. Произвести оценку погрешности эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Шрауф. Электричество и магнетизм. ГИТТЛ, 1950.
2. С. Г. Калашников. Электричество, ГИТТЛ, 1956.
3. А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников.
4. Б. И. Королев. Основы вакуумной техники. Госэнергоиздат, 1955.
5. Д. Ж. Стронг. Техника физического эксперимента.
6. У. Данлеп. Введение в физику полупроводников. ИЛ, 1959.
7. Р. Смит. Полупроводники. ИЛ., М., 1962.

Глава 8

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

§ 1. Теоретический обзор

Огромное многообразие материальных тел окружающей нас природы можно классифицировать на аморфные и кристаллические тела. Кристаллические тела в отличие от аморфных изотропных тел анизотропны. Анизотропность кристаллов, то есть зависимость их свойств от направления, является их характерной чертой, хотя эта анизотропность у различных кристаллов и в отношении различных свойств выражается неодинаково (например, пропускание в данном направлении электрического тока, света; механическая прочность и тому подобное). Можем говорить об особых кристаллографических направлениях, в которых физические свойства оказываются постоянными. Отдельный кристалл, в пределах которого кристаллографические направления сохраняются, называется монокристаллом.

Обычно кристаллические твердые тела являются собранием множества сросшихся между собой кристалликов.

Такие конгломераты называются поликристаллами.

С молекулярной точки зрения описанные выше и другие свойства кристаллов могут быть понятны, если допустить правильное (определенное) пространственное расположение частиц, из которых состоит кристалл. Имея ввиду правильное расположение частиц при построении кристалла, можно говорить об элементарной ячейке кристаллической решетки, о ее постоянной (расстоянии между соседними атомами), узлах и т. д. Геометрия кристаллической пространственной решетки может быть различна. По типу симметрии различают семь систем (сингоний) кристаллических решеток. На рис. 93 приведен пример гексагональной системы ($a=b \neq c$; $\alpha=\beta=90^\circ$; $\gamma=120^\circ$).

В зависимости от того, что представляют собой узлы кристаллической решетки, то есть; из каких частиц (атомов, молекул ионов) они состоят, различают решетки:

- 1) атомные (узлы решетки — атомы, например, Al, Mg);
- 2) ионные (узлы решетки — ионы, например, NaCl);
- 3) металлические (узлы — положительные ионы);

4) молекулярные (узлы — молекулы, например, нафталин, сахар).

Тип решетки будет зависеть от характера взаимодействия между элементарными частицами, из которых строится решетка; под влиянием определенного взаимодействия частицы будут располагаться в упорядоченную систему.

Рассмотрим простейший тип кристаллической решетки — ионный. Кристаллы этого типа строятся из положительных и от-

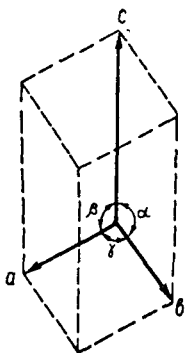


Рис. 93. Элементарная ячейка кристалла гексагональной системы.

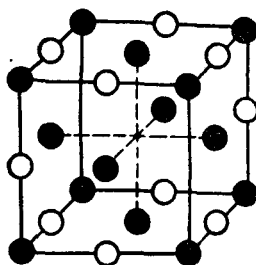


Рис. 94. Модель элементарной ячейки кристалла.

рицательных ионов. Примером ионного кристалла может служить кристалл поваренной соли NaCl, состоящей из положительных ионов натрия и отрицательных ионов хлора ($\text{Na}^+[0]$), ($\text{Cl}^-[0]$). На рис. 94 представлена модель кристалла NaCl. Как видно из рисунка, каждый ион Na^+ в кристаллической решетке NaCl окружен шестью ионами Cl^- и наоборот. Таким образом, в ионном кристалле (и вообще в кристалле) не имеется и следа таких группировок частиц, которые могут быть названы молекулами, если только весь кристалл в целом не считать гигантской молекулой, что, конечно, не имеет смысла.

Отметим также, что в ионных кристаллах одинаковой структуры силы взаимодействия между ионами противоположного знака тем больше, чем больше их валентность и чем меньше сумма их радиусов. Чем значительнее силы взаимодействия, связывающие ионы в кристаллической решетке, тем выше твердость и температура плавления и тем выше растворимость кристалла.

Множество физических свойств твердых тел обусловлено различными нарушениями идеальности кристаллической структуры (дефекты решетки). Для современной техники весьма важной проблемой является использование тех или иных электрических, фотоэлектрических и оптических свойств твердого тела. Существенной задачей является умение сообщить образцу те или иные

свойства, поэтому одним из основных звеньев современной физики твердого тела является раздел, в котором занимаются изучением нарушения кристаллической решетки.

Идеальный ионный щелочно-галогидный кристалл (например, NaCl , KCl , LiF) из-за простоты своего строения представляет наиболее подходящий объект для изучения дефектов решетки. Преимуществом щелочно-галогидных кристаллов является также сравнительная легкость их получения в виде монокри-

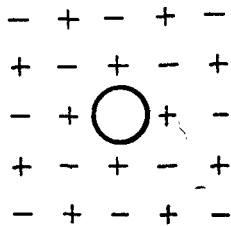


Рис. 95. Модель F -центра.

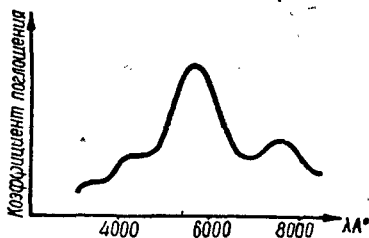


Рис. 96. График зависимости коэффициента поглощения от длины волны.

сталлов большого размера и достаточной чистоты. В этих кристаллах находим проявление большого разнообразия физических и химических свойств, зависящих от нарушений. Одним из возможных нарушений периодичности решетки может быть отсутствие галогидного иона (вакансия) в узле решетки. Если такой реальный кристалл выдержать в парах щелочного металла при соответствующей температуре, то он приобретет окраску (например, KCl окрашивается в синий цвет, NaCl — желтый), претерпевает некоторое изменение и внутреннее строение кристалла. В результате целого ряда экспериментальных и теоретических работ выяснилось, что окраска кристаллов обусловлена определенными образованиями внутри кристалла, так называемыми центрами окраски, которые были названы F -центрами (Farbzentern). С точки зрения современной физики F -центр представляет собой комбинацию вакансии галогидного иона и электрона: F -центр — электрон, заместивший ион галоида в узле решетки (рис. 95), так как вакансия галоида представляет собой потенциальную яму для электрона, то есть электрон будет обладать там значительно меньшей энергией, чем в других состояниях. При соответствующих условиях потенциальная яма захватывает электрон.

Способы получения кристаллов с F -центрами или другими комплексами, то есть способы окраски щелочно-галогидных кристаллов, делятся на субстративный (состоит в облучении кристалла рентгеновскими лучами, γ -лучами или пучком быстрых

электронов) и аддитивный методы (выдерживание кристалла в парах щелочного металла).

Опишем подробнее разновидности аддитивного метода — метод окраски Арцибашева. В один конец кристалла вводится металлический игольчатый катод, анодом может служить металлическая пластинка. Если к кристаллу при достаточно высокой температуре приложить напряжение, F -центры появляются у игольчатого катода и мигрируют по направлению к аноду. При этом на аноде выделяется галоидный газ. Если обесцветить кристалл (поменять местами катод и анод), а затем окрасить его вновь, то скорость миграции центров окраски будет другой. Можно установить зависимость между подвижностью центров окраски и номером измерения. Окрашенные щелочно-галоидные кристаллы приобретают новые свойства, так, например, окрашенный кристалл обнаруживает фотопроводимость.

Окрашенность кристалла означает, что он обладает полосой поглощения света (полоса поглощения — интервал в спектре, обладающий данными частотами $\nu \pm \Delta\nu$). Если через кристалл пропустить свет, то часть его, составляющая определенный спектральный участок, будет поглощена (рис. 96). Энергия поглощенных квантов расходуется на возбуждение F -центров и на их ионизацию. В результате последней в кристалле образуются электроны проводимости. Полоса поглощения, соответствующая F -центрам, имеет определенную форму и интенсивность в зависимости от концентрации их в данном кристалле. Было показано, что если кристалл в максимуме полосы содержит n_f центров поглощения в 1 см^3 , дающих колоколообразный пик типа F -полосы, то связь между коэффициентом поглощения k_m в центре полосы, концентрацией центров и полушириной полосы W в энергетических единицах дается формулой

$$n_f f = \frac{18m}{\pi e^2 h} \cdot \frac{n'}{(n' + 2)^2} k_m W. \quad (1,8)$$

Если подставить в формулу (1,8) значение констант, получим

$$n_f f = 1,06 \cdot 10^{16} k_m W \quad (2,8)$$

(f для $\text{KCl} = 0,81$, для $\text{NaCl} = 0,7$).

Изменив полуширину полосы W и воспользовавшись формулой (2, 8), можно определить концентрацию центров поглощения n_f . Изучение свойств окрашенных щелочно-галоидных кристаллов дает возможность проникнуть в глубь электронных явлений, происходящих в кристаллической решетке, и, кроме того, разрешает по новому подойти к вопросу конструирования дозиметров, контролирующих интенсивность различных излучений.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: 1. Измерить подвижность центров окраски в процессе окраски щелочно-галоидных кристаллов KCl или $NaCl$.

2. Исследовать зависимость $k=f(\lambda)$ (зависимость коэффициента поглощения от длины волны). Смори гл. III, § 2.

Основные этапы.

1. Отрегулировать тепловой режим печи.

2. Подготовить образец к окраске (шлифовка, полировка).

3. Измерить подвижность центров окраски и установить зависимость подвижности от номера измерения.

4. Заморозить центры окраски (при комнатной температуре).

5. Снять половину окраски кристалла (на кристалле до замораживания).

6. Подготовить кристалл к измерению $I=f(\lambda)$ (раскалывание, шлифовка, полировка).

7. Исследовать на монохроматоре $I=f(\lambda)$ окрашенного и неокрашенного кристалла.

8. Рассчитать концентрацию центров.

1. Тепловой режим печи для окраски устанавливается соответственно для KCl — $^{\circ}C=600$ и для $NaCl$ — $^{\circ}C=500$ C.

2. Подготовка образца к окраске, то есть дальнейшее исследование после окраски, ведется путем грубой шлифовки граней (размер кристалла должен быть не меньше $0,5 \times 0,7 \times 1$ см³) и последующей полировки их сукном или шелком до полной прозрачности кристалла.

3. Измерение подвижности центров окраски ведется в процессе окраски кристалла. Окрашивать кристалл можно методом Арцибашева.

В качестве катода можно использовать платиновую пластинку, в качестве анода — железную. Разность потенциалов между катодом и анодом 100—200 в (ток постоянный).

Рассчитать подвижность центров окраски можно по формуле

$$V = bE, \quad (3,8)$$

где V — скорость движения центров окраски, измеренная визуальным методом (путь центров окраски между двумя спроектированными на кристалл нитями за время, отсчитываемое на секундомере);

b — подвижность центров окраски;

E — напряженность электрического поля между катодом и анодом.

Опыт проделать несколько раз, периодически снимая окраску с кристалла.

4, 5, 6. Заморозить центры окраски. Для этого вынимают кристалл из печи. На одном из исследуемых кристаллов снять

половину окраски, или, другими словами, окрасить его до половины длины, после чего необходимо осторожно отделить окрашенную часть от неокрашенной. Этот этап работы является подготовительным для дальнейшего проведения опыта.

7. Исследование зависимости $I=f(\lambda)$ окрашенного и неокрашенного кристаллов соответственно производится на монохроматоре. Кристалл помещается в специальном держателе у входной щели и освещается мощным источником света. Градуировочный график монохроматора прилагается к его описанию.

8. Расчет концентрации центров окраски производится согласно измерению полуширины полосы и формулы (2, 8). Полуширина полосы рассчитывается так: из максимума кривой $k=f(\lambda)$ опускается перпендикуляр на ось абсцисс и половина его высоты пересекается перпендикулярной линией. Отрезок этой линии AB и является полушириной F -полосы (рис. 97).

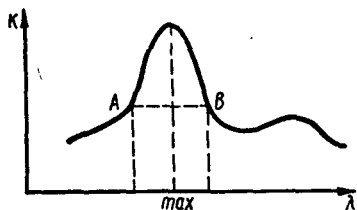


Рис. 97. К расчету концентрации центров окраски.

§ 3. Обработка результатов

1. Рассчитать подвижность центров окраски и построить графики зависимости величины подвижности от номера измерения.

2. Построить график $k=f(\lambda)$ для исследуемого кристалла. Если $I=I_0e^{-k\lambda}$, то $k=\frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I}$, где I — интенсивность падающего света, d — путь, пройденный светом в кристалле, k — коэффициент поглощения (абсорбции), то есть на оси координат откладываем $\ln \frac{I_0}{I}$, на оси абсцисс длину волны, при которой измерено это отношение $\frac{I_0}{I}$.

3. По измерения $k=f(\lambda)$ по полуширине F -полосы рассчитать концентрацию F -центров.

4. Оценить погрешность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Штрауф. Молекулярная физика. ГИТТЛ, 1950.
2. Н. Мотт и Р. Герни. Электронные процессы в ионных кристаллах. ИЛ, 1953.
3. С. Я. Плотицер и Е. А. Нестеровская. Новые исследования центров поглощения в окрашенных щелочно-галогидных кристаллах. Изд-во Одесского лединститута, 1959.
4. Р. Бьюб. Фотопроводимость твердых тел. ИЛ, 1962.

Глава 9

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

§ 1. Вводная часть

Диэлектрическая проницаемость, или диэлектрическая постоянная, имеет большое значение при изучении свойств изоляционных материалов. Не последнюю роль диэлектрическая постоянная играет при изучении свойств полупроводников. Изучая свойства полярных кристаллов, необходимо уметь рассчитывать энергию дефекта кристаллической решетки. Любой теоретический расчет энергии дефекта решетки всегда связан с теорией диэлектрической постоянной.

Однако на данном этапе развития теории часто бывает невозможным рассчитать величину диэлектрической постоянной, и поэтому в случае необходимости пользуются другим способом — экспериментального определения ее.

В данном лабораторном задании мы разберем некоторые методы экспериментального измерения диэлектрической проницаемости.

Согласно классической теории электричества, макроскопическое (среднее) электрическое поле внутри диэлектрика — это среднее поле E внутри данной узкой полости, расположенной параллельно вектору поляризации $P = \frac{\sum e_i r_i}{V}$, где P — средний дипольный момент, e_i — заряд, r_i — радиус-вектор диполя, тогда как поле смещения D определяется как поле внутри дискообразной полости, расположенной перпендикулярно к вектору поляризации (рис. 98). Разность $D - E$ определяется полем $4\pi P$ связанных зарядов плотности P . Поляризация или диэлектрическая постоянная $\epsilon = \frac{D}{E}$ обычно определяется путем измерения емкости

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (1,9)$$

Самый распространенный метод измерения основан на сравнении емкости C конденсатора, заполненного исследуемым веществом, с ем-

костью C^1 пустого конденсатора. Отношение $\frac{C}{C^1}$ равно диэлектрической постоянной

$$\varepsilon = \frac{C}{C^1}. \quad (2,9)$$

Определение величины емкости в принципе можно осуществить при помощи резонансного контура (рис. 99). При введении

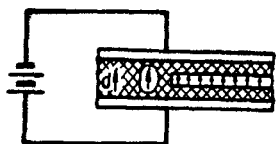


Рис. 98. Схема поляризации диэлектрика.

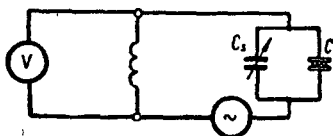


Рис. 99. Схема резонансного контура:

V — вольтметр; C_s — эталонный переменный конденсатор; $\sim$ — генератор колебаний.

образца в конденсатор C переменную емкость C_s изменяют так, чтобы сохранить неизменной резонансную частоту.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C_s + C)}}. \quad (3,9)$$

Отсюда можно найти C^1 и C , а следовательно, и ε .

На указанном принципе построен прибор Q -метр, на котором и можно провести измерение емкости.

Другой предлагаемый метод заключается в следующем: если емкость конденсатора имеет правильную геометрическую форму, измеряют емкость любым способом (методом баллистического гальванометра или стационарным мостом УМ), а затем рассчитывают емкость этого конденсатора теоретически, предполагая отсутствие диэлектрика, то из полученных данных нетрудно рассчитать и ε .

Этот метод менее точен, но более доступен и не требует сложной аппаратуры.

Отметим еще, что величина, определяемая формулой (2, 9), есть отношение диэлектрических проницаемостей данного вещества ε и воздуха ε^1 . Как видно, эта величина является безразмерной. Абсолютное значение диэлектрической постоянной зависит от того, какую величину приписать ε^1 . В CGSE полагают $\varepsilon^1 = 1,000594$ и считают величиной безразмерной.

В табл. 20 приведены значения ε для некоторых веществ.

Таблица 20

Материал	ϵ в CGSE
Вакуум	1
Воздух при 0° С и 760	1,000594
Эбонит	2,7—2,9
Стекло	5—10 (в зависи- мости от сорта)
Этиловый спирт	27
Вода	81

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: Измерить ϵ у стекла (или слюды): а) на резонансном контуре; б) методом сравнения емкости конденсатора в присутствии диэлектрика и без него.

Основные этапы работы.

1. Подготовить исследуемый диэлектрик.
2. Измерение ϵ диэлектрика на резонансном контуре.
3. Нанесение на диэлектрик слоя металла (изготовление конденсатора).
4. Измерение баллистической постоянной гальванометра, знакомство с работой моста, измеряющего малые емкости.
5. Измерение геометрических размеров изготовленного конденсатора.
6. Измерение ϵ методом сравнения емкости конденсатора с диэлектриком между пластинами и без него.

1. Диэлектрик изготавливается из куска фотостекла или слюды (вырезывается круглый образец диаметром 60 мм). Обе плоскости пластинки образца изготавливаются матовыми (шлифуются крупным абразивом), что необходимо для плотного приставания металла при последующем его нанесении.

2. Измерение ϵ на резонансном контуре, которое проводится в принципе, как указано в § 1, проходит по специальной инструкции, последняя обычно прилагается в схеме резонансного контура.

3. Заготовленный образец диэлектрика химически обрабатывается, затем обрабатывается в пламени горелки (бомбардировка поверхности ионами, которых имеется достаточное количество в любом пламени). После чего на обе стороны пластинки наносится слой металла (изготовление обкладок конденсатора) сначала катодным напылением (серебро, затем медь). Таким образом, изготавливается «фундамент» для дальнейшего гальванического покрытия. После чего образец в специальном зажиме помещается в гальваническую ванну, где наносится рабочий слой металла (меди, никеля).

4. Измерение баллистической постоянной рабочего гальванометра проводится по схеме рис. 100.

5. Измерение геометрических размеров конденсатора производится штангенциркулем, микрометром; измерять желательно как можно с большей точностью, так как основная доля погрешности окончательного результата приходится на этот этап работы.

6. Экспериментальное измерение емкости производится методом баллистического гальванометра и мостовыми схемами

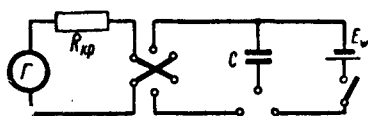


Рис. 100. Схема измерения баллистической постоянной гальванометра:

$R_{кр}$ — критическое сопротивление гальванометра; C — заданная емкость; E — нормальный элемент; $Г$ — баллистический гальванометр.

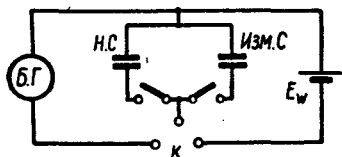


Рис. 101. Схема определения емкости при помощи баллистического гальванометра:

$Н.С$ — известная емкость; $E_{н}$ — нормальный элемент; $Б. Г.$ — баллистический гальванометр; $К$ — тройной ключ.

разных типов. Результаты измерения сравниваются. Для примера приведем схему с использованием баллистического гальванометра (рис. 101).

§ 3. Обработка результатов

ϵ по первому методу (a) рассчитываются по формулам, приведенным в описании схемы резонансного контура. По методу ($б$) ϵ рассчитывается, как было сказано, из формулы (2,9). Теоретическая емкость изготовленного конденсатора (емкость при отсутствии диэлектрика) рассчитывается по формуле плоского конденсатора.

При обработке результатов необходимо составить таблицы:

1. Таблица измерения емкости на резонансном контуре.
2. Таблица измерений емкости методом баллистического гальванометра.
3. Таблица измерений чувствительности баллистического гальванометра.

4. Таблица измерений геометрических размеров конденсатора.

Погрешность рассчитывается как для (a), так и для метода ($б$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Штрауф. Электричество и магнетизм.
2. С. Г. Калашников. Электричество.
3. Н. Мотт и Р. Герни. Электронные процессы в ионных кристаллах.

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОБРАЗЦОВ**§ 1. Вводная часть**

В металлах проводимость наблюдается при различных температурах (заполненная зона и зона проводимости перекрываются, см. § 1, гл. 7), проводимость же полупроводников в обычных условиях возникает только благодаря тепловому движению. Однако можно создать такие условия, которые обеспечивают повышение проводимости в полупроводнике и без повышения его температуры. Для этого достаточно перевести электрон из заполненной зоны в зону проводимости любым способом, то есть сообщить электрону энергию $\geq \Delta W$ (энергия активации).

Если будем сообщать нужную энергию путем излучения, то в большинстве тех случаев, когда квант падающего излучения будет равен или больше энергии активации ($h\nu \geq \Delta W$), мы сможем наблюдать увеличение электронов проводимости в зоне проводимости.

Фотопроводимость, или внутренний фотоэффект, возникает далеко не во всех полупроводниках, а в тех полупроводниках, где он возникает, полупроводники по-разному реагируют на различный спектральный состав излучения. И если одни полупроводниковые образцы чувствительны к ультрафиолетовой части спектра, другие к инфракрасной (указанное свойство зависит от целого ряда причин: частоты колебаний атомов в решетке, ширины запрещенной зоны данного полупроводника, а также от сорта примесных уровней), то становится ясным, что непременным условием появления фотопроводимости остается все же условие — поглощение полупроводником падающего на него излучения.

Первое по времени фотосопротивление было изготовлено из селена. Современная технология его изготовления не сложна (см. § 2 настоящей главы).

Селеновые фотосопротивления имеют спектральную чувствительность, представленную на рис. 102.

На рис. 103 изображена световая характеристика селенового фотосопротивления — зависимость фототока от светового пото-

ка. Эта характеристика имеет нелинейный ход и снята (как было указано в гл. 3, § 3) при определенном напряжении. Темновое сопротивление селеновых фотосопротивлений лежит в пределах

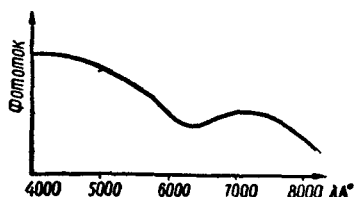


Рис. 102. График спектральной чувствительности селенового фотосопротивления.

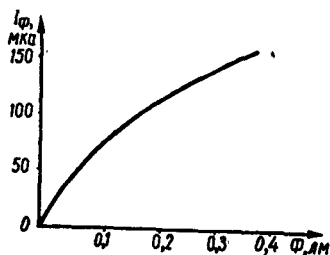


Рис. 103. График световой характеристики селенового фотосопротивления.

10^4 — 10^8 ом (зависит от технологии изготовления).

Частотная характеристика селенового фотосопротивления показана на рис. 104.

Как видно из рисунка, начиная со значений около 200 гц, величина тока резко снижается. В свое время, кроме селеновых фотосопротивлений, большой практический интерес вызывали серноталлиевые фотосопротивления.

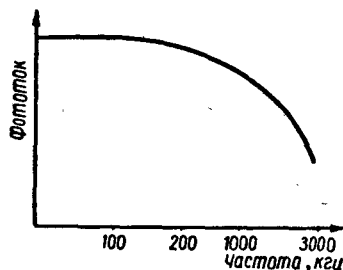


Рис. 104. График частотной характеристики селенового фотосопротивления.

В настоящее время широко используются фотосопротивления из сернистого свинца (табл. 7), сернистого висмута, сернистого и селенистого кадмия и другие.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: Исследовать характеристики селенового фотосопротивления.

Основные этапы работы.

1. Заготовка подложки фотосопротивления.
2. Нанесение токоподводящих контактов на подложку.
3. Нанесение слоя полупроводника (селен).
4. Термическая обработка образца фотосопротивления.
5. Снятие спектральной чувствительности фотосопротивления.
6. Снятие частотной характеристики фотосопротивления.

1. Заготовка подложки производится следующим образом: из стеклянной или слюдяной пластинки вырезается прямоуголь-

ник $(2 \times 3) \text{ см}^2$ и шлифовкой подгоняется по трафарету. Одна из сторон прямоугольника матируется.

2. Перед нанесением токоподводящих контактов подложка соответствующим образом химически обрабатывается (гл. 4, 6). Контакты на подложку наносятся испарением в вакууме или катодным распылением. Материалом для контакта может служить медь, серебро, платина. Контакты наносятся через трафарет и должны иметь форму, как указано на рис. 105.

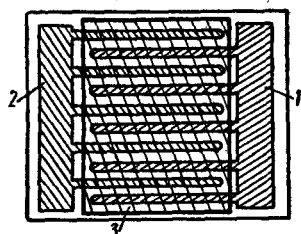


Рис. 105. Образец с наложенным трафаретом:

1, 2 — металлические; 3 — слой фотосопротивления из полупроводника.

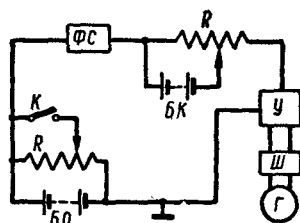


Рис. 106. Схема для снятия спектральной характеристики фотосопротивления:

ФС — фотосопротивление; ОБ — основная батарея; БК — батарея конденсаторов; R_1 , R_2 — потенциометры; У — усилитель; Г — гальванометр тока.

3. Слой селена наносится в вакууме 10^{-4} — $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ методом испарения (гл. 6). Толщина слоя $20 \div 30 \text{ мк.}$

4. Термическая обработка проводится в термостате при температуре $180^\circ \pm 1^\circ$ в течение 20 мин с медленным охлаждением.

5. Снятие спектральной характеристики проводится на монохроматоре (гл. 3, § 2). Фотосопротивление в специальном держателе помещается перед выходной щелью монохроматора. Фотосопротивление включается в электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 106.

6. Снятие частотной характеристики, то есть зависимости величины фототока от частоты модулированного света, можно провести на схеме, изображенной на рис. 107. Схема состоит из трех блоков: измерительный блок, модулятор, питание мотора модулятора (рис. 108).

Принцип действия схемы (рис. 107) заключается в следующем: луч света от лампочки накаливания 1, модулированный посредством вращения механического диска с прямоугольными вырезами 2, падает на исследуемое фотосопротивление 4. Получаемый сигнал снимается с нагрузочного сопротивления R_n и измеряется катодным милливольтметром 6. Для визуального контроля и наблюдения формы сигнала параллельно катодному

вольтметру включен осциллограф 5. При этом измеряется напряжение U на нагрузочном сопротивлении R_n , откуда при данной частоте модулятора имеем

$$I_\phi = \frac{U}{R_n},$$

где I_ϕ — величина фототока;
 U — напряжение на нагрузке R_n .

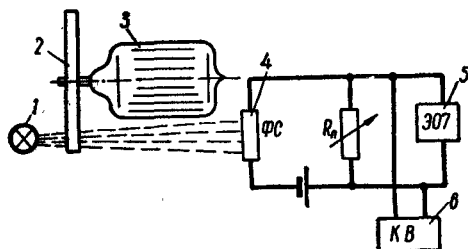


Рис. 107. Блок-схема для снятия частотной характеристики фотосопротивления.

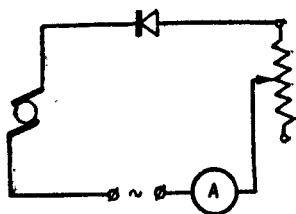


Рис. 108. Схема питания микромодулятора.

Частота модуляции регулируется при помощи изменения числа оборотов мотора постоянного тока 3.

§ 3. Обработка результатов

При оформлении результатов исследования необходимо составить таблицы и построить графики:

1. Таблица измерений спектральной чувствительности фотосопротивления.

2. График зависимости $I_\phi = f(\lambda)$, где I_ϕ фототок, λ — длина волны.

3. Таблица измерений частотной характеристики.

4. График зависимости

$$I_\phi = f(\omega),$$

где ω — частота модулятора, гц.

Примечание. Характеристические данные усилителя постоянного тока и градуировочные графики монохроматфа (графики перевода делений шкалы лимба в длины волн и таблица, учитывающая интенсивность спектральной линии) приложены к описаниям усилителя и монохроматфа.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников.
2. М. С. Соми́нский. Полупроводники. Физматгиз, 1961.
3. П. Герлих. Фотоэлементы. Гостехиздат, 1948.
4. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Физматгиз, 1963.
5. Р. Бьюб. Фотопроводимость твердых тел.
6. Р. Смит. Полупроводники.

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

§ 1. Вводная часть

При изучении механизма электропроводности металлов для наибольшей плодотворности такого изучения всегда стремятся выяснить процессы воздействия внешних сил на движущиеся электрические заряды. Воздействуя на заряды (электроны) магнитным полем, можно получить полезные сведения о механизме прохождения электрического тока через металлы и о строении металлов вообще.

Впервые изменение сопротивления металла в магнитном поле было обнаружено В. Томсоном в 1856 г. на железе. Позднее Гольдгаммер нашел, что это явление, хотя и в меньшей степени, характерно для всех металлов.

Каждый металл, кроме ферромагнитных, помещенный в поперечное магнитное поле, увеличивает свое сопротивление электрическому току.

С точки зрения классической теории (Друде, Лоренц) этот эффект представляется вполне понятным: длина свободного пути электрона или, иначе, число столкновений является величиной, определяющей сопротивление металла (если металл, по которому течет ток, поместить в магнитном поле, то благодаря поддеомоторному воздействию магнитного поля, пути электрона должны «искривляться», то есть электроны чаще будут сталкиваться с атомами, и длина их свободного пробега уменьшится. Следовательно, сопротивление должно возрасти.

Современное состояние техники электрических измерений дает возможность измерить изменение сопротивления на всех металлах с точностью до нескольких десятых процента.

Расчеты, сделанные Дж. Дж. Томсоном на основании классической теории, дали выражение

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{12} \frac{2l \cdot e}{m^2} \cdot H^2, \quad (1, 11)$$

что удовлетворительно совпадает с экспериментальной зависи-

мостью, полученной при исследованиях в полях до 30 000 гс

$$\frac{\Delta r}{r} = \alpha H^2, \quad (2,11)$$

где α — константа.

На рис. 109 приведена кривая зависимости $\frac{\Delta r}{r}$ (относительное изменение сопротивления) от поля для висмута при комнатной температуре.

Таким образом, вопрос казался удовлетворительно решенным как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения,

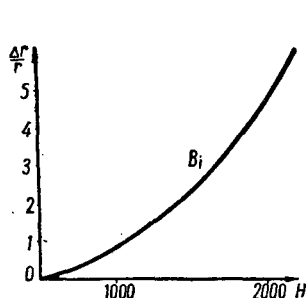


Рис. 109. Кривая зависимости изменения сопротивления в магнитном поле.

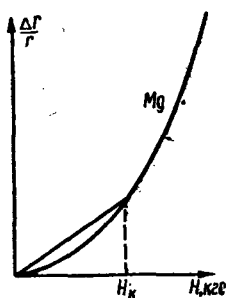


Рис. 110. Зависимость $\frac{\Delta r}{r}$ от H для Mg.

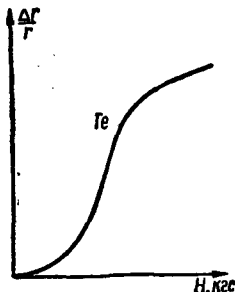


Рис. 111. Зависимость $\frac{\Delta r}{r}$ от H для Te.

пока исследования П. Л. Капицы (1928 г.) по влиянию сильных магнитных полей (до 360 000 000 а/м) на сопротивление металлов привели к существенно новым результатам, показавшим наличие пробелов в классической теории.

Оказалось, что квадратичная зависимость имеет место в металле до определенного значения поля (H_K), после чего она переходит в линейную зависимость (рис. 110), то есть относительное сопротивление растет линейно с ростом напряженности магнитного поля, а в некоторых металлах (теллур, графит, германий) наблюдается (после линейного участка) насыщение (рис. 111).

Классическая теория металлов не в состоянии объяснить поведение металла в сильных магнитных полях. Дальнейшие теоретические разработки этого вопроса Зоммерфельдом, Франком, Пейерлсон также не привели к исчерпывающим объяснениям указанных фактов.

Дальнейшая теоретическая разработка вопроса может вестись уже только на основе квантовой механики.

Особенно велико изменение сопротивления в магнитном поле у висмута. Это изменение сопротивления уже в полях порядка

1 000 000 а/м (рис. 109) составляет несколько процентов первоначальной величины, и, как известно, этим обстоятельством пользуются для измерения напряженности магнитного поля. Для этого употребляются так называемые висмутовые спирали (рис. 112), которые представляют собой комплектно смонтированную в виде спирали висмутовую проволоку, сопротивление которой может



Рис. 112. Внешний вид стандартной висмутовой спирали.

быть измерено даже техническим мостом Уитстона. При помещении такой спирали в измеряемое магнитное поле наблюдают возникающее увеличение сопротивления. Предварительно, конечно, спираль должна быть проградуирована по известному полю.

В заключение следует сказать, что как температура, так и степень чистоты металла влияют на ход зависимости $\frac{\Delta r}{r} = f(H)$, точнее на величину α в формуле (2,11).

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: Исследование проводимости висмута в магнитном поле в зависимости от напряженности поля.

Основные этапы работы.

1. Подготовка подложки образца.
2. Нанесение на подложку слоя висмута методом катодного распыления или испарения в вакууме.
3. Определение баллистической постоянной гальванометра.
4. Градуировка электромагнита (зависимость H от I) методом пробной катушки и флюксметром.
5. Измерение.

1. Для подготовки подложки образца из стеклянной пластинки стеклорезом вырезается прямоугольник размером $2,5 \times 1,2 \text{ см}^2$ и шлифовкой подгоняется по трафарету. Рабочая поверхность изготавливается матовой.

2. Слой висмута на подложку наносится несколькими способами:

1) катодное распыление. Катодом служит висмутовый электрод. Распыление продолжается при определенном, зависящем от подаваемого напряжения режиме (25—30 мин.);

2) возгонка в вакууме. Навеска висмута 20—30 мг помещается в вольфрамовую спираль, которая закрепляется в специальном держателе. Под спиралью помещается подложка образ-

ца, предварительно соответствующим образом обработанная. Держатель помещается под колпаком вакуумной установки. Накал спирали осуществляется из сети постоянного или переменного тока через реостат или трансформатор соответственно. Накал спирали включается при разряде порядка 10^{-3} мм рт. ст. (напыление проводить 20—25 мин).

3. Определение баллистической постоянной можно провести на электрической схеме, приведенной на рис. 100 (гл. 9).

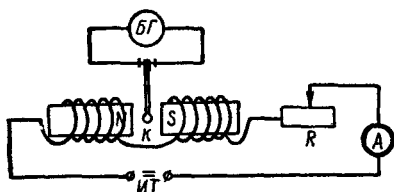


Рис. 113. Схема градуировки электромагнита:

Б — баллистический гальванометр; К — пробная катушка; R — реостат; А — амперметр цепи электромагнита; ИТ — источник постоянного тока.

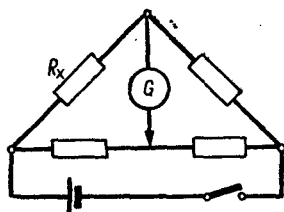


Рис. 114. Схема моста Уитстона:

R_x — исследуемый образец, включенный в одно из плеч моста.

4, 5. Градуировка электромагнита и измерения. Пробная катушка (2,5 ом, 10 витков) помещается в магнитное поле (межполюсное пространство). Концы катушки присоединяются к баллистическому гальванометру с измеренной постоянной (рис. 113). При выдергивании катушки из межполюсного пространства замечается максимальный отброс гальванометра. Напряженность (точнее индукция B) рассчитывается при данной силе тока в цепи электромагнита по формуле

$$B \cdot S = \frac{C_b \cdot r \cdot a}{\omega},$$

где C_b — баллистическая постоянная;

r — сопротивление цепи катушки;

a — число делений на шкале гальванометра;

ω — число витков катушки.

После измерения H при 10—12 значениях силы тока (до 10 а) и построения градуировочного графика в межполюсное пространство магнита помещается держатель с образцом висмута. R_x включается в одно из плеч мостика Уитстона (рис. 114). Меняя силу тока в цепи электромагнита, сопротивление образца висмута при определенной напряженности (согласно графика) магнитного поля все время измеряется при изменении силы тока в цепи электромагнита. Точнее говоря, исследуется зависимость относительного изменения сопротивления от напряженности магнитного поля $\frac{\Delta r}{r} = f(H)$.

§ 3. Обработка результатов

Как подготовительная, так и основные работы и ее этапы фиксируются в лабораторном журнале. В журнал должны быть занесены краткие теоретические сведения.

При оформлении результатов исследования необходимо составить таблицы и построить графики:

1. Таблицы измерения баллистической постоянной.
2. Таблица и график зависимости H (величина напряженности магнитного поля) от величины тока в цепи электромагнита.
3. Таблица и график относительного изменения сопротивления от напряженности магнитного поля H , где $\frac{\Delta r}{r} = \frac{r_1 - r_0}{r_0}$ (r_0 — сопротивление металла без магнитного поля, r_1 — сопротивление в магнитном поле).

Приводится оценка погрешности результатов исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Г. Дорфман, И. Н. Киконн. Физика металлов. ОНТИ, 1935.
2. Энциклопедия металлофизики, Т. I. ОНТИ, 1937.
3. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. Курс физики. Т. II. ГИТТЛ, 1951.
4. Г. Буш, У. Винклер. Определение характеристических параметров полупроводников. ИЛ, 1959.
5. А. И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников. Физматгиз, М.—Л., 1962.

Глава 12

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ХОЛЛА У МЕТАЛЛА ИЛИ ПОЛУПРОВОДНИКА

§ 1. Вводная часть

В 1879 г. американский физик Холл обнаружил явление, предсказанное Томсоном еще в 1851 г., которое заключается в следующем. Если через однородную металлическую или полупроводниковую пластинку пропустить ток слева направо вдоль

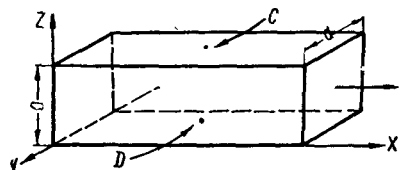


Рис. 115. Схема возникновения
э. д. с. Холла.

оси x (рис. 115), то линии тока будут представлять собой прямые линии, параллельные ребру пластинки, идущему вдоль оси x , и между симметрично расположенными точками C и D не будет существовать никакой разности потенциалов. Если затем пла-

стинку поместить в магнитное поле так, чтобы последнее было направлено вдоль оси y , то есть было перпендикулярно к линиям тока, то между точками C и D возникнет разность потенциалов, величина которой пропорциональна как величине тока I , так и напряженности магнитного поля H и обратно пропорциональна толщине пластинки d

$$V_C - V_D = R \frac{IH}{d}. \quad (1,12)$$

Это явление, получившее название *эффекта Холла*, может быть объяснено следующим образом. Если ток обусловлен переносом зарядов e , то в магнитном поле H на них действует сила Лоренца, отклоняющая их в направлении, перпендикулярном к направлению тока. В результате этого заряды будут накапливаться у края пластинки C или D (в зависимости от знака заряда) до тех пор, пока действие магнитной силы не будет уравновешено электрическим полем зарядов.

По формуле Лоренца сила, действующая на заряд, равна

$$f_e = evH \sin \alpha \quad (2,12)$$

(в нашем случае $\alpha = \frac{\pi}{2}$), где v — средняя скорость направленного движения зарядов. Напряженность электрического поля, вызванного появлением разности потенциалов, будет,

$$E = \frac{V_C - V_D}{a}, \quad (3,12)$$

где a — ширина пластинки (рис. 115). Отсюда электрическая сила, действующая на заряд,

$$f_n = e \cdot \frac{V_C - V_D}{a}. \quad (4,12)$$

Стационарное состояние наступит при равенстве сил $f_n = f_e$

$$e \cdot \frac{V_C - V_D}{a} = evH. \quad (5,12)$$

Силу тока можно выразить так:

$$I = S \cdot n \cdot ev, \quad (6,12)$$

где $S = (a \cdot d)$ — сечение пластинки. Откуда, узнав v и подставив в предыдущую формулу, получим

$$V_C - V_D = \frac{1}{en} \cdot \frac{I \cdot H}{d}. \quad (7,12)$$

Таким образом, в соответствии с эмпирической формулой (1,12) величина $V_C - V_D$ пропорциональна IH и обратно пропорциональна d (толщина пластины). Постоянная R оказывается равной

$$R = \frac{1}{ne}. \quad (8,12)$$

Более точная квантовая теория, учитывающая участие в токе электронов, обладающих различными скоростями, дает для постоянной Холла выражение

$$R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne}. \quad (9,12)$$

Таким образом, измеряя R (постоянная Холла), можно определить концентрацию носителей электричества n , а по знаку разности потенциалов, возникающей между C и D — тип носителей тока в исследуемом материале.

Из формулы (9,12) следует, что знак постоянной R должен зависеть от знака e заряда носителя электричества. Положи-

тельный знак постоянной указывает, что потенциал точки C (рис. 115) выше потенциала точки D .

Электропроводность металла обусловлена наличием свободных электронов — для металлов постоянная R должна быть отрицательной.

У полупроводников это будет зависеть от типа носителей. Для дырочного полупроводника постоянная Холла имеет поло-

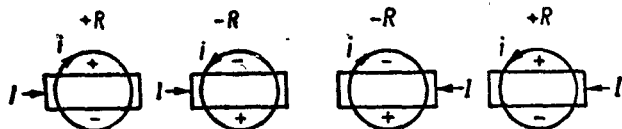


Рис. 116. Иллюстрация правила определения знаков постоянной Холла:

I — ток через образец; i — ток в витках обмотки электромагнита.

жительное значение, а для электронного — отрицательное. На рис. 116 иллюстрировано правило определения знаков.

Следует иметь в виду, что с помощью формулы (9,12) можно определять концентрацию носителей у материала с одним знаком носителей. Для полупроводниковых материалов с проводимостью смешанного типа постоянная Холла определяется выражением

$$R = \frac{3\pi}{8e} \frac{n(-)u^2(-) - n(+)u^2(+)}{(n(+)u(+) + n(-)u(-))^2}. \quad (10,12)$$

Для полупроводника же с собственной проводимостью, когда $n(+) = n(-) = n$,

$$R = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{ne} \frac{u(-)^2 - u(+)^2}{u(-) + u(+)}, \quad (11,12)$$

где $u(+)$ и $u(-)$ — соответственно подвижности дырок и электронов. (Под подвижностью носителей тока понимают величину, численно равную скорости перемещения электрона или дырки под действием электрического поля напряженности в 1 в/см. Из

определения подвижности $u = \frac{v}{E}$ следует, что размерность u есть см²/сек · в). С помощью эффекта Холла можно также установить и величину подвижности носителя тока, если, кроме измерения R , измерить, например, величину электропроводности данного образца $\sigma = n \cdot e \cdot u$

$$R = \frac{3\pi}{8en},$$

тогда

$$\sigma R = \frac{3\pi}{8} u \quad \text{или} \quad u = \frac{8}{3\pi} \sigma R. \quad (12,12)$$

В теории твердого тела подвижность носителей тока играет фундаментальную роль, так как она отражает характер взаимодействия носителей тока с частицами, образующими кристаллическую решетку, и тем самым дает основные сведения о механизме рассеяния носителей в данном типе кристаллической решетки. И так как измерение постоянной Холла является одним из немногих, практически доступных способов определения подвижности носителей, экспериментальное значение этой величины огромно.

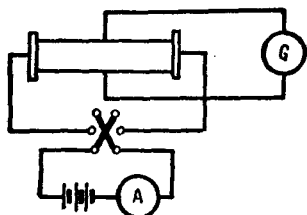


Рис. 117. Принципиальная схема для определения постоянной Холла:

G — гальванометр; A — амперметр.

На рис. 117 приведена принципиальная схема измерения эффекта Холла.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: Определение постоянной Холла у металла или полупроводника.

Основные этапы работы.

1. Подготовка и взвешивание подложки образца.
2. Нанесение на подложку слоя исследуемого материала (висмут, германий, теллур) методом испарения в вакууме или методом катодного напыления (если материал хорошо распыляется этим методом).
3. Определение веса слоя (вторичное взвешивание).
4. Измерение чувствительности зеркального (рабочего) гальванометра.
5. Получение экспериментальных данных.

1. Из фотостекла вырезается прямоугольник $(2,2 \times 1,1)$ см², края которого сошлифовываются по трафарету. Подготовка подложки образца к нанесению исследуемого материала проводится следующим образом: образец промывают в мыльной воде или слабом растворе щелочи, затем ополаскивают в дистиллированной воде и после этого протирают ватой, смоченной спиртом. Образец взвешивается на аналитических весах с точностью до десятичных долей грамма.

2. Нанесение слоя исследуемого материала на подложку методом испарения в вакууме производится таким образом: навеска материала помещается в вольфрамовую спираль или пробирку-испаритель (в зависимости от рода материала), которая закрепляется в специальном держателе. Держатель, на котором помещена подложка, помещается под колпак вакуумной установки. После получения разряжения порядка 10^{-3} — 10^{-4} мм рт. ст. включается ток, разогревающий спираль. Нанесение слоя исследуемого материала методом катодного распыления прово-

дится на специальной установке, где катодом служит исследуемый материал (гл. 6, § 4 и 5).

3. Определение веса нанесенного материала проводится вторичным взвешиванием на аналитических весах с точностью до десятичных долей грамма. Вторичное взвешивание необходимо

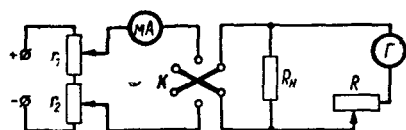


Рис. 118. Схема для определения чувствительности гальванометра:

r_1, r_2 — реостаты; A — миллиамперметр; K — переключатель направления тока; R — магазин сопротивлений; R_n — сопротивление 10 ом.

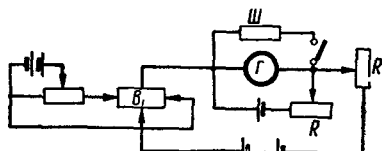


Рис. 119. Рабочая схема для измерения э. д. с. Холла:

R — реостаты; B — висмутовый образец.

для определения косвенным путем толщины нанесенного слоя висмута (гл. 6, § 6).

4. Измерение чувствительности зеркального гальванометра проводится по схеме на рис. 118.

Постоянная по току C_i может быть определена из формулы

$$C_i = \frac{2IR_n l}{R(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

где I — ток;

l — расстояние от шкалы до гальванометра;

α_1, α_2 — отклонение зайчика;

R — полное критическое сопротивление гальванометра.

С ходом измерения чувствительности и правилами пользования гальванометром можно познакомиться по описанию гальванометра типа М-21 (гл. 11, § 1).

5. Измерение постоянной Холла (R) проводится по схеме рис. 119.

Висмутовый образец помещается в поперечное магнитное поле (поле перпендикулярно плоскости рисунка). В магнитной цепи (на схеме не указана) использован электромагнит, позволяющий получить напряженность поля порядка $6 \times 10^6 - 10 \times 10^6$ а/м.

§ 3. Обработка результатов

Расчет постоянной Холла производится по формуле

$$R = 10^{11} \cdot S_v \frac{nd}{IH} \text{ см}^3/\kappa,$$

где S_v — чувствительность гальванометра по напряжению;

n — число делений на шкале гальванометра;

d — толщина образца, см;

I — основной ток, а;

H — напряженность магнитного поля, а/м.

В процессе работы необходимо составить таблицы:

1. Таблица по определению толщины слоя образца.

2. Таблица данных по измерению чувствительности рабочего гальванометра при различных положениях переключателя шунта.

3. Таблица измерений постоянной Холла.

Теоретические сведения по этапам работы заносятся в лабораторный журнал, оценивается погрешность эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников.
2. Я. Г. Дорфман, И. К. Кикоин. Физика металлов.
3. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. Курс физики.
4. У. Данлеп. Введение в физику полупроводников.
5. Р. Смит. Полупроводники.
6. Полупроводники в науке и технике. Под ред. А. Ф. Иоффе. Т. I. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1957.

Глава 13

ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

§ 1. Введение

В 1797 г. Вольта открыл явление, заключающееся в следующем. Если привести в соприкосновение два различных металла, то между ними возникает разность потенциалов. Вольта установил *ряд металлов*, в котором каждый предыдущий металл при соприкосновении с одним из последующих электризуется положительно: Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd.

Далее Вольта установил, что если несколько различных металлов *A, B, C, D* присоединить друг к другу последовательно, то на концах этого ряда возникнет разность потенциалов, зависящая только от природы крайних металлов *A* и *D*.

Указанная разность потенциалов, возникшая в результате соприкосновения двух разнородных проводников, называется *контактной разностью потенциалов*.

Разберем, в силу каких причин возникает контактная разность потенциалов. Для этого рассмотрим, чем отличаются с точки зрения электронной теории друг от друга различные металлы.

При обычных температурах электроны, несмотря на то что они совершают тепловое движение, не вырываются из металла. Чтобы извлечь электрон из металла наружу, необходимо затратить определенную работу *A*. Эта работа называется *работой выхода*. Работу выхода принято выражать произведением заряда *e* на разность потенциалов *V*, подобранную так, чтобы

$$eV = A. \quad (1,13)$$

При соприкосновении двух металлов электроны, совершая беспорядочное тепловое движение, будут переходить из одного металла в другой. Для того чтобы представить себе процесс перехода свободных электронов из металла в металл при различных работах выхода, соответствующих каждому металлу, воспользуемся графическим способом изображения энергетических соотношений.

Положим условно потенциальную энергию свободного электрона, находящегося вне металла, равной нулю; тогда потен-

альная энергия электрона внутри металла, обусловленная взаимодействием электрона с положительными зарядами кристаллической решетки, отрицательна. Электрон внутри металла находится в потенциальной яме (рис. 120). Глубина потенциальной ямы определяется работой выхода. При соприкосновении двух металлов A и B с различными работами выхода eV_A и eV_B бу-

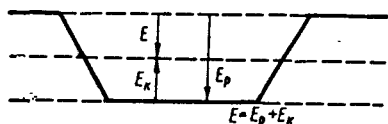


Рис. 120. Потенциальная яма для электрона в металле.

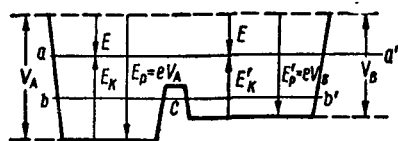


Рис. 121. Потенциальные ямы для электронов в соприкосновении металлов.

дем иметь две потенциальные ямы (рис. 121), причем между ними в области пограничного слоя имеется потенциальный барьер C , в пределах которого пусть остается отрицательной потенциальная энергия. Заметим, что если $|V_A| > |V_B|$, то потенциальная яма, соответствующая металлу A , глубже. Электроны, полная энергия которых изображается прямой bb' , проходящей ниже барьера c , не смогут перейти из одного металла в другой; те же электроны, у которых полная энергия изображена прямой aa' , лежащей выше потенциального барьера, могут свободно перейти из металла в металл, но не смогут покинуть совсем металл, если их полная энергия останется отрицательной.

Из рис. 121 для полной энергии мы сможем записать

$$E = -eV_A + E_k = -eV_B + E'_k, \quad (2,13)$$

и так как $|V_A| > |V_B|$, то следует $E_k > E'_k$, то есть, что электроны, обладающие относительно меньшей кинетической энергией, способны переходить из металла B в металл A ; для перехода из металла A в металл B нужен относительно большой запас кинетической энергии. При обычных температурах таких электронов мало.

Таким образом, видим, что имеется возможность преимущественного перехода из металла B в металл A . Излишние электроны в металле A создают добавочное электрическое поле, что поведет к «засыпанию» потенциальной ямы, то есть ее глубина начнет убывать, пока не наступит равновесие

$$V'_{AB} = V_B - V_A, \quad (3,13)$$

то есть между металлами возникнет разность потенциалов, препятствующая дальнейшему переходу электронов. Если восполь-

зоваться соотношением (1,13), то можно записать

$$V_{AB}' = \frac{A_B - A_A}{e}. \quad (4,13)$$

Однако различие работ выхода является не единственной причиной, обуславливающей появление разности потенциалов между металлами *A* и *B*.

Если предположить, что концентрация свободных электронов в металлах различна, то там, где она больше, будет больше вы-

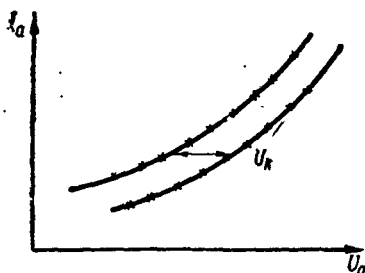


Рис. 122. График зависимости анодного тока от анодного напряжения для двух электродов.



Рис. 123. График зависимости анодного тока от анодного напряжения при различных геометриях электродов.

ходить электронов. Соответствующие теоретические выкладки приведут к уравнению

$$V_{AB}' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}, \quad (5,13)$$

где T — абсолютная температура;
 n_A , n_B — концентрации электронов в соответствующих металлах.

Существующие методы измерения контактной разности потенциалов весьма многочисленны, но по существу все они сводятся к разнообразным видоизменениям четырех основных методов: ионизационного, конденсаторного, фотоэлектрического и термоэлектрического.

Измерение контактной разности потенциалов представляет большую трудность. Иногда бывают несравнимы результаты одного и того же метода на одних и тех же материалах. Все это происходит от того, что на величину контактной разности потенциалов сильно влияет чистота материала и особенно физико-химическое состояние поверхности исследуемых материалов.

Остановимся на одном из термоэлектрических методов — методе смещения характеристик. Он основан на снятии характеристики для электронной лампы в области влияния простран-

венного заряда поочередно для двух анодов из различных исследуемых материалов. При одинаковой геометрии электродов получим параллельное смещение характеристик (рис. 122) относительно друг друга на величину разности работ выхода, то есть практически для металла относительно металла на величину контактной разности потенциалов. В случае различия геометрии электродов теоретический расчет показывает, что можно, сняв обе характеристики в случае их непараллельности, определить контактную разность потенциалов приближенно как величину смещения характеристик для нулевого значения тока (рис. 123). Метод хорошо оправдал себя при определении работ выхода хорошо возгоняемых металлов: натрия, бария, серебра, цинка, магния и т. д. Применяя при этом чисто вольфрамовый катод, можно легко избежать загрязнения распыляемым металлом.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы: Измерить термоэлектронным методом смещения характеристик контактную разность потенциалов двух металлов.

Основные этапы работы.

1. Заготовка электродов:

а) сварка цилиндрических анодов;

б) нанесение гальваническим методом или методом возгонки рабочего слоя металла.

2. Монтаж приспособления проводится под колпаком вакуумной установки.

3. Получение высокого вакуума (не ниже 10^{-5} мм Hg).

4. Снятие зависимости анодного тока от анодного напряжения на двух анодах (последовательно).

1. а) Из куска черной тонкой жести вырезается прямоугольник заданных размеров. Заготавливаются ножки из железной проволоки заданной конфигурации. На аппарате контактной или конденсаторной сварки (гл. 3, § 4) проводится сварка цилиндров и привариваются ножки.

б) На цилиндры методом гальванического осаждения или методом возгонки осаждается металл (например, Cu, Zp или Ag, соответственно, — гл. 6).

Приспособление монтируется под вакуумным колпаком в специальном держателе по схеме, указанной на рис. 124.

2. Для удовлетворительной работы рабочей части схемы необходимы условия: чистота поверхности анода и катода, разрежение не ниже 10^{-5} мм Hg. Указанное разрежение достигается на вакуумной установке со специальным приспособлением (рис. 125 и гл. 6).

§ 3. Обработка результатов

В результате исследования строится график зависимости величины анодного тока от анодного напряжения (для двух анодов) и по сдвигу кривых определяется контактная разность потенциалов.

При получении соответствующего напряжения в вакуумной установке следует проследить за скоростью откачки; для фиксации этого момента в лабораторном журнале строится график зависимости величины давления в установке от скорости откачки.

Оценивается погрешность измерений.

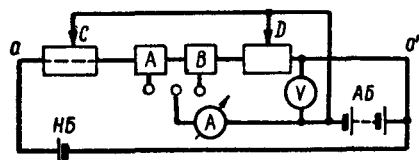


Рис. 124. Принципиальная схема монтажа электродов:

А, В — испытываемые аноды; Н, Б. — батарея накала вольфрамового катода aa' ; А, Б — анодная батарея; С, Д. — охранные кольца; А — микроамперметр; V — вольтметр.

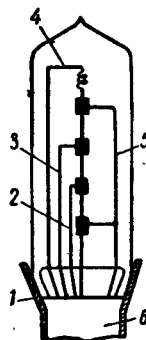


Рис. 125. Приспособление для монтажа измерительной схемы:

1 — стеклянный шлиф; 2, 3, 4, 5 — монтажные стержни; 6 — к вакуумнасосам.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. Курс физики.
2. Б. М. Царев. Контактная разность потенциалов. ГИТТЛ, 1949.
3. Л. Н. Добрецов. Электронная и ионная эмиссия. ГИТТЛ, М.—Л., 1952.
4. Физический энциклопедический словарь. Т. II. «Советская энциклопедия», 1962.

Глава 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

§ 1. Теория метода

Существенным параметром полупроводниковых приборов является диффузионная длина, то есть то расстояние, которое носители тока проходят без рекомбинации. Так как для приборов с p — n -переходом основную роль в переносе тока играют именно неосновные носители, то есть дырки в n -германии и электроны в p -германии, то имеет смысл говорить о диффузионной длине неосновных носителей тока. Будем обозначать через L_n диффузионную длину электронов в полупроводнике p -типа, а через L_p — диффузионную длину дырок в полупроводнике n -типа.

Диффузионная длина связана с важным параметром полупроводника, так называемым временем жизни неосновных носителей тока. Под временем жизни неосновного носителя тока подразумевается то время, которое он существует в свободном состоянии или за которое проходит расстояние, равное диффузионной длине. Связь между диффузионной длиной и временем жизни выражается формулами

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}; \quad (1,14)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \quad (2,14)$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов в p -материале;

D_p — коэффициент диффузии дырок в n -материале;

τ_n и τ_p — времена жизни электронов и дырок p - и n - слое соответственно.

Величины D_n и D_p для данного материала постоянны, для Ge равны

$$D_n \simeq 92 \text{ см}^2/\text{сек}, \quad D_p \simeq 44 \text{ см}^2/\text{сек}.$$

Обычно L_n и L_p выражаются в миллиметрах, а τ_n и τ_p в микросекундах. Поэтому, подставив численные значения D_n и D_p для германия, формулы (1,14) и (2,14) можно переписать в виде

$$L_n = 0.1 \sqrt{\tau_n}; \quad (3,14)$$

$$L_p = 0,07 \sqrt{\tau_p}. \quad (4,14)$$

Из (3,14) и (4,14) видно, что, измерив экспериментально один из параметров, второй можно легко подсчитать.

Однако еще не найден метод непосредственного измерения ни диффузионной длины, ни времени жизни. Для измерения диффузионной длины используются косвенные методы. Наиболее простым методом является метод, разработанный американским физиком Вальдесом. Метод заключается в освещении образца на различных расстояниях от контакта металл — полупроводник.

В этом случае оказывается, что задачу о диффузии и дрейфе носителей можно выразить через функции Ханкеля. Для случая, если расстояние r до контакта значительно больше величины L , то

$$j = \frac{C}{\sqrt{r}} \cdot e^{-\frac{r}{L}}, \quad (5,14)$$

где j — фототок, а C — постоянная. С достаточной степенью точности можно положить

$$j = Ce^{-\frac{r}{L}}.$$

И таким образом задача сводится к нахождению степени затухания фотосигнала с удалением от контакта. Построив график

$$\ln j = -\frac{r}{L} + \ln C, \quad (6,14)$$

где $C = j_0$ при $r = 0$, получим, что $L = -\operatorname{ctg} \alpha$, где α — угол наклона кривой к оси абсцисс.

Устройство прибора для измерения диффузионной длины можно рассмотреть на рис. 126.

От источника света 1 через систему линз 2 и диаграмму 3 пучок света падает на исследуемый образец 4. Перемещение образца осуществляется при помощи микрометрического винта 5. Образец, закрепленный в держателе 6, может перемещаться вдоль горизонтальной оси. Для удобства усиления и регистрации сигнала световой пучок модулируется с помощью механического модулятора прямоугольных импульсов 7 (гл. 14, § 2) с частотой 60—200 гц. Световой штрих размерами $5 \times 0,4 \text{ мм}^2$ должен давать освещенность до 10 000 лк. Ширина штриха может колебаться в пределах от 0,1 до 1 мм (рис. 126, б). Электрический контакт с измерительной схемой осуществляется точечным контактом, изготовленным из вольфрамовой проволоки 9 диаметром 0,1 мм, конец которой затачивается путем электрического травления

(рис. 126, б), второй контакт образца обычно делается прижимным.

В заключение остановимся на тех ограничениях и требованиях, которые предъявляются к материалам, параметры которых измеряются фотоэлектрическим методом. Прежде всего необходимо тщательно обрабатывать поверхность, так как данный метод применим лишь для измерения от $\tau = 10 \text{ мксек}$ и выше, а качество обработки поверхности влияет на суммарное время жизни. Наилучшие результаты получаются при травлении в специальном травителе, неплохие результаты получаются травлением в H_2O_2 . Кроме того, накладывается ряд ограничений на геометрические размеры светового штриха. Так, если W — ширина штриха, L — длина штриха, то должны выполняться соотношения $L \leq \frac{1}{5} r_1$, $L \geq 4r_2$, где r_1 и r_2 соответственно

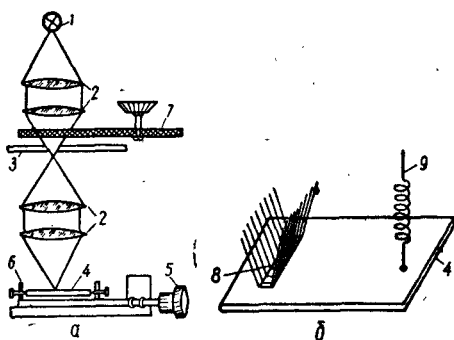


Рис. 126. Схема экспериментального устройства.

минимальное и максимальное расстояние, на которое передвигается световой штрих. Образец должен быть таких размеров, чтобы расстояние до границ образца было не менее, чем трехкратная диффузионная длина. Расстояние от одного контакта до другого должно составлять не менее 0,6 мм.

§ 2. Экспериментальная часть

Основные этапы работы.

1. Получение и обработка полупроводниковой заготовки.
2. Подготовка заготовки.
3. Подготовка точечных контактов.
4. Измерение.

1. Из куска полупроводника, пригодного для исследования данным методом, выпиливаются две прямоугольные пластинки размером $(3 \times 10) \text{ мм}^2$. Затем шлифовкой пластинки доводятся до толщины 0,6 мм, при этом соблюдается плоскопараллельность лицевых граней.

Заготовку можно также получить путем испарения полупроводника в вакууме ($10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$) на изоляционную подложку размером $(3 \times 10) \text{ мм}^2$. Испарение следует проводить до тех пор, пока толщина слоя станет не меньше 0,5 мм. Для контроля тол-

щины вакуумная установка должна быть заранее проградуирована (гл. 6).

2. Полученные заготовки протравливаются в H_2O_2 , промываются и сушатся в сушильном шкафу не менее часа. Протравливается только одна заготовка, вторая остается для контрольных измерений.

3. Точечный контакт изготавливается из никелевой проволоки диаметром 0,8—1 мм, к концу которой точечной сваркой приваривается завитая пружинкой вольфрамовая проволочка с оттянутым концом. Диаметр вольфрамовой проволоки 0,1 мм. Заострение конца проволоки производится электротравлением в 15%-ном растворе КОН. Вторым электродом служит медная пластинка. Величина напряжения источника питания 12 в. Травление производится до тех пор, пока не отпадет погруженный в электролит конец вольфрамовой проволоки. Качество заостренного конца проверяется под микроскопом при увеличении в 10—15 раз, при этом должен быть явно выражен заостренный конец. После изготовления точечный контакт тщательно промывается и сушится.

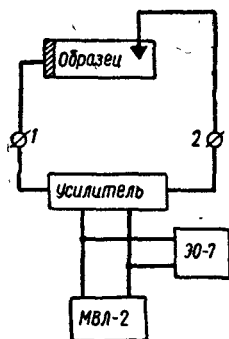


Рис. 127. Блок-схема измерительной установки.

4. Измерение производится на установке, блок-схема которой приведена на рис. 127. Усиление сигнала может быть достигнуто на любом широкополосном усилителе. В качестве индикатора сигнала служит катодный вольтметр (МВЛ-2) или, что еще удобнее, осциллограф (ЭО-7), позволяющий наблюдать как величину, так и форму сигнала. Последнее обстоятельство помогает отличить действительный сигнал от помех. Перед измерением рекомендуется проверить работу усилителя. Для этого к точкам 1, 2 вместо образца подсоединяется звуковой генератор (ГЗ-10), сигналы от которого наблюдаются на экране осциллографа. Учитывается форма сигнала и искажения. Измерение производится следующим образом. Включается осветитель и мотор модулятора. Затем, при помощи микрометрического винта (микровинта) световой штрих становится на уровне никелевого контакта и наблюдается вид фотосвета на экране осциллографа. На экране должны быть получены четко выраженные прямоугольные импульсы, частота которых меняется с изменением частоты вращения модулятора. Частота модулятора зависит от скорости вращения мотора постоянного тока, скорость же последнего регулируется величиной протекающего через него тока. Максимальной амплитуды фотосвета (максимальное отклонение на шкале катодного вольтметра) достигают вращением ручки микровинта (рис. 126), затем, вращая ручку в одну сто-

рону, снимают показания прибора (амплитуду фотосигнала) через каждые 20—30 мк. После первого измерения все повторяется при обратном вращении ручки микровинта. Те же измерения повторяются для образца с непротравленной поверхностью.

§ 3. Оформление результатов измерений

1. Построить график зависимости $\ln \frac{I}{I_0} = f(r)$ для обоих образцов.
2. Вычислить по построенному графику L по формуле $L = -\text{ctg } \alpha$.
3. По формуле $\tau = \frac{L^2}{D}$ вычислить время жизни обоих образцов.
4. Сравнить значение τ для обоих образцов, вычислить отношение $\frac{\tau_{\text{тр}}}{\tau_{\text{нетр}}} = k$.

ЛИТЕРАТУРА

1. У. Данлел. Введение в физику полупроводников.
2. А. Кобленц и Г. Оуэнс. Транзисторы, теория и применение. ИЛ, 1956
3. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.
4. Специальный практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам. Под ред. К. В. Шалимовой. Госэнергоиздат, М., 1962.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕРМАНИЕВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

§ 1. Теоретический обзор

Самым распространенным методом использования полупроводников является их применение в устройствах в качестве выпрямителей электрического тока.

Небольшие размеры, длительный срок службы и простота включения явились решающими факторами, благодаря которым кристаллические выпрямители почти полностью вытеснили все остальные виды выпрямителей (ламповые, ртутные, выпрямители с газовым разрядом и др.). При этом диапазон рабочих токов и напряжений полупроводниковых выпрямителей лежит в пределах от нескольких миллиамперов, вольт до тысячи ампер и десятков киловольт.

Наиболее ранними типами кристаллических выпрямителей явились меднозакисные и селеновые выпрямители, на смену которым пришли в настоящее время германиевые и кремниевые выпрямляющие устройства, превосходящие своих предшественников не только по величинам рабочих токов, но и по простоте изготовления и малости размеров. При этом германиевые и кремниевые выпрямители (диоды) могут быть сделаны таким образом, что они будут выдерживать до 1 000 000 и более переключений тока в секунду, что делает их незаменимыми в высокочастотных схемах.

Разберем принцип действия германиевого кристаллического выпрямителя, так как именно германиевые и кремниевые выпрямители являются наиболее перспективными в настоящее время.

Германиевые и кремниевые выпрямители изготавливаются из чистого германия и кремния. Путем диффузии донорных или акцепторных примесей достигается такое положение, что одна часть образца имеет проводимость электронную, другая — дырочную. Выпрямление происходит на границе этих областей. Полупроводник с электронной проводимостью часто называют *n*-полупроводником, полупроводник с дырочной проводимостью *p*-полупроводником. Границу между этими полупроводниками

называют электроннодырочным переходом или просто $p-n$ -переходом. Рассмотрим, какие физические явления разыгрываются на $p-n$ -переходе при протекании через него электрического тока, другими словами, рассмотрим механизм выпрямления на $p-n$ -переходе.

Введем предварительно понятие уровня Ферми или уровня химического потенциала μ , которое нам понадобится в дальнейших рассуждениях.

Величина химического потенциала в термодинамике определяется уравнением

$$\mu = \left(\frac{\partial F}{\partial N} \right)_{T=\text{const}}, \quad (1.15)$$

где F — свободная энергия системы;

N — число частиц.

Таким образом, химический потенциал или уровень Ферми определяется свободной энергией системы, приходящейся на одну частицу.

Причиной пользования уровнем Ферми в физике полупроводников является то обстоятельство, что при абсолютном нуле он определяет максимальную энергию электрона, и поэтому от него (от уровня химического потенциала) отсчитывается работа выхода электрона.

Несмотря на то что уровень Ферми в полупроводниках находится внутри запрещенной зоны, работу выхода электронов из свободной зоны (и дырок из заполненной зоны) отсчитывают от уровня Ферми. Причем можно показать, что для того чтобы оставшиеся носители находились в тепловом равновесии, необходимо работу выхода отсчитывать именно от уровня Ферми. Таким образом, неизменность положения уровня Ферми указывает на равновесное состояние полупроводника. Совпадение же уровней Ферми в двух или нескольких образцах показывает, что вся система находится в равновесном состоянии. Изменение же положения уровня Ферми внутри заполненной зоны указывает на изменение заполнения носителями примесных уровней. Так, например, у электронного полупроводника при низких температурах уровень μ расположен между дном свободной зоны и донорным уровнем; с увеличением температуры, то есть с переходом электронов с донорных уровней в зону проводимости, уровень Ферми понижается и достигает середины запретной зоны, когда все электроны перейдут в свободную зону.

При отсутствии тока внутри полупроводника уровень Ферми горизонтален. При протекании тока внутри полупроводника наблюдается наклон в сторону положительного потенциала. Таким образом, изгиб или наклон уровня μ свидетельствует о наличии неравновесных процессов внутри полупроводника. Причем так как уровень μ является показателем, до некоторой степени, чис-

ла частиц, то его соседство с заполненной зоной указывает на преобладание дырок в образце, а соседство с зоной проводимости — на преобладание электронов; расположение же уровня Ферми посредине зоны указывает на равное число электронов и дырок.

Итак, пусть мы имеем *p*- и *n*-германий (рис. 128); как указано на рисунке, между обеими областями имеется зазор. Энергетические диаграммы *p*-*n*-германия соответствуют правой и



Рис. 128. Энергетические диаграммы *p*- и *n*-германия до плотного соприкосновения.

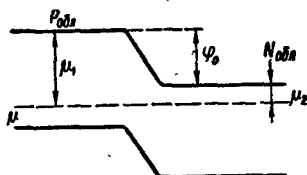


Рис. 129. Энергетическая диаграмма *p*- и *n*-германия после соприкосновения.

левой сторонам рисунка. Приведем *p*- и *n*-германий в плотное соприкосновение. Но так как после сближения областей образец остается в равновесном состоянии (при этом не наблюдается каких-либо локальных нагревов или заряженных областей), то уровни μ обеих частей должны совпадать (рис. 129).

Так как концентрация дырок в *p*-области (p_p) больше, чем концентрация дырок в *n*-области (p_n) и, соответственно, концентрация электронов в *p*-области больше, чем в *n*-области ($p_p > p_n$; $n_n > n_p$), то поток дырок в результате диффузии из *p*-области в *n*-область будет превышать обратный поток, аналогичное явление будет происходить и для электронов, то есть поток электронов из *n*-области в *p*-область будет превышать обратный.

В результате в *p*-области появится отрицательный заряд, а в *n*-области — положительный. Это будет происходить до тех пор, пока созданное этими зарядами контактное поле не уравновесит оба потока. Как показывает теория, величина контактной разности потенциалов, то есть потенциального барьера между *p*- и *n*-областями, равна

$$\Phi_0 = \mu_2 - \mu_1, \quad \Phi = kT \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2}, \quad (2,15)$$

где $n_i = \text{const}$ — концентрация носителя в собственном (чистом, беспримесном) полупроводнике.

Как видим из (2,15), величина потенциального барьера пропорциональна логарифму произведения концентраций носителей тока материалов контакта, то есть, чем ниже удельное сопро-

тивление составляющих переход областей, тем больше контактное сопротивление между ними или величина потенциального барьера (так как последний препятствует прохождению электронов в p -область и дырок в n -область). По мере удаления от контакта концентрация электронов быстро повышается. Объемный заряд создается ионизированными атомами примесей (отрицательный в p -области ионизированными акцепторами, положительно в n -области ионизированными донорами).

Приложим к полученному переходу напряжение V , «—» к p -области, «+» к n -области. Тогда высота потенциального барьера изменится, то есть увеличится на величину eV , при этом считаем, что все напряжение падает на контакте, ибо сопротивление контакта значительно больше сопротивления остальной толщи полупроводника. Повышение потенциального барьера можно объяснить, предполагая что при приложении «—» к p -области энергия электронов (все зонные схемы обычно чертятся именно для энергии электрона) увеличивается: электроны будут как бы в менее связанном состоянии. Следовательно, уровень μ вместе со всеми зонами поднимается. И, наоборот, при приложении «+» электроны будут находиться в более связанном состоянии — уровень энергии понизится.

Таким образом, величина потенциального барьера станет равной $\phi' = \phi_0 + eV$. Такое направление тока, вызывающее повышение потенциального барьера, а следовательно, увеличение сопротивления контакта, называют запорным направлением тока, или обратным. Наоборот, при приложении «—» на n -область имеем понижение потенциального барьера, то есть $\phi' = \phi_0 - eV$. Предельным случаем является $\phi_0 = eV$, когда контактное сопротивление отсутствует и все сводится лишь к сопротивлению толщи полупроводника. Такое направление тока носит название проходного направления или прямого.

Как показывает детальная теория, связь между током и напряжением определяется формулой

$$j = j_0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1), \quad (3,15)$$

где j — ток, текущий через p — n -переход;

V — приложенное напряжение;

j_0 — ток насыщения, то есть ток, соответствующий случаю, когда $|eV| > kT$, при обратном напряжении ($V < 0$) свыше нескольких десятков вольт, обратный ток $j = -j_0$.

Это особенно ясно видно из графика вольт-амперной зависимости $I = I(V)$ (рис. 130). Из этого же графика видим, что в прямом направлении ($V > 0$) ток резко растет с ростом напряжения. В запорном ($V < 0$) же ток сначала растет, а затем на-

ступает насыщение, то есть с изменением V ток не меняется (теоретически насыщение продолжается как угодно долго, то есть до $V=\infty$).

Однако реальные выпрямители для $V < 0$ дают изгиб вольт-амперной характеристики, который обусловлен, во-первых, нагревом образца, а следовательно, при $V < 0$ резко растет j с ростом температуры, а, во-вторых, при отсутствии нагрева наблюдается так называемый зиннеровский пробой, который объясняется тем, что с ростом напряжения возрастает вероятность переброса носителей из зоны в зону, причем имеет место лавинное возбуждение носителей.

Из формулы (3,15) видно, что ток выпрямителя резко зависит от температуры, возрастая примерно со скоростью 11% на 1°C . Поэтому из-за быстрого роста обратного тока германиевые выпрямители применимы до $50\text{--}60^\circ \text{C}$, кремниевые—до $90\text{--}100^\circ \text{C}$.

Рассмотрим более подробно процесс выпрямления тока. В состоянии теплового равновесия диффузионный и омический потоки электронов и дырок взаимно уравнивают друг друга. При приложении напряжения это равновесие нарушается. Если поле приложено в запиорном направлении, то увеличивается высота потенциального барьера и затрудняется переход путем диффузии электронов из n -области в p -область и, соответственно, дырок из p - в n -область. При этом концентрация дырок в n -области и электронов в p -области начинает убывать. Электроны же в приконтактном слое под действием поля затягиваются в глубь n -области. Область контакта обедняется носителями, следовательно, ее сопротивление резко возрастает. При дальнейшем увеличении напряжения обедненная носителями область не может увеличивать ток, ибо все наличие носителей в контактном слое уже используется для переноса тока.

При приложении напряжения в проходном направлении наблюдается обратная картина: потенциальный барьер понижается, и электроны из p -области получают возможность переходить в n -область и, наоборот, дырки из p -области в n -область; уравнивающие их диффузионные потоки также увеличиваются. Таким образом, концентрация носителей в области контакта резко возрастает, причем даже при $V > \phi$ поток носителей, как показывает теория, продолжает расти за счет затягиваемых полем в приконтактную область носителей из толщи полупроводника. В результате всего этого сопротивление контакта резко уменьшается и резко возрастает ток.

Как видим, зависимость тока от напряжения в p — n -переходе

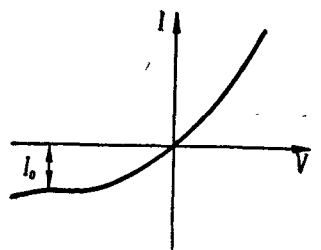


Рис. 130. Вольт-амперная характеристика p — n -перехода.

коренным образом отличается от обычного закона Ома, а обратный ток в $p-n$ -переходе в большей степени зависит от температуры, сильно возрастаая с ростом последней.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы:

1. Исследовать вольт-амперную зависимость германиевого выпрямителя.

2. Исследовать зависимость обратного тока германиевого выпрямителя от температуры.

Основные этапы работы.

1. Получение заготовок.

2. Обработка заготовок.

3. Нанесение контактов.

4. Получение $p-n$ -перехода путем выплавления или диффузии.

5. Обработка $p-n$ -перехода.

6. Измерение.

1. Заготовки германия размерами $1,5 \times 1,5 \times 0,35$ мм³ доводятся до толщины $0,3 \div 0,2$ мм путем шлифовки с помощью специального приспособления (при шлифовке следует соблюдать плоскопараллельность граней, что проверяется микрометром или индикатором путем измерения в двух-трех отдельных точках).

2. Отшлифованные заготовки необходимо протравить в H_2O_2 . Для этого надо налить в химический стакан 40—50 мл 30%-ной H_2O_2 и поставить на плитку до закипания. После чего опустить в стакан заготовки и поддерживать кипение в течение трех-четырех минут (по секундомеру). После окончания травления оставшуюся H_2O_2 выливают, а заготовки промывают 5—6 раз горячей водой, каждый раз интенсивно ее взбалтывая.

Промытые заготовки выкладываются на фильтровальную бумагу чистым пинцетом, после чего помещаются в сушильный шкаф, где сушатся при температуре $100-120^\circ C$ в течение 30—40 мин.

3. После сушки на образцы наносятся контакты: *выпрямляющий* и *омический*. Для этого на обе стороны заготовки наносятся диаметром 0,8 мм диски, выдавленные специальным приспособлением (рис. 141). Выпрямляющий контакт изготавливается из индиевой, а омический — из оловянной фольги и наносятся на образец, как указано на рис. 131.

4. После нанесения электродов заготовки на специальной графитовой или кварцевой кассете помещаются под колпак вакуумной или водородной печи, где они нагреваются до $500^\circ C$ (скорость подъема температуры не должна превышать 20° в минуту). При этом происходит сплавление индия в Ge. При до-

стижении температуры, равной 500°C , производится выдержка в течение 5—10 мин., во время которой происходит упорядочение фронта сплавления. После этого температуру необходимо медленно понижать ($10\text{--}20^{\circ}\text{град/мин}$ до $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$). В это время *n*-германий, растворивший в себе индий, рекристаллизуется и превращается в *p*-германий, чем обеспечивается *p*—*n*-переход. Медленное снижение температуры необходимо для плавной и равномерной рекристаллизации *p*-германия.

5. После охлаждения заготовок до $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$ они вторично протравливаются так же, как и раньше, а затем сушатся в шкафу 1,5—2 час.

6. Характеристики изготовленного диода исследуются на специальном стенде. Удовлетворительными считаются выпрямители с обратным током порядка до нескольких микроампер (до 10) и рабочим напряжением до загиба вольт-амперной характеристики (не менее 80 в). После этого производится измерение зависимости величины обратного тока от температуры (от комнатной до $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$). Следует обратить внимание на уменьшение рабочего напряжения с ростом температуры.

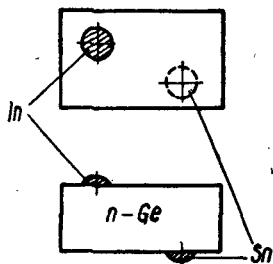


Рис. 131. Нанесение электродов на образец.

§ 3. Оформление результатов

При оформлении работы должен быть сделан ряд диаграмм и графиков:

1. Диаграмма вольт-амперной характеристики прямого и обратного тока (снимается визуально с экрана осциллографа).

2. Диаграмма семейства вольт-амперных характеристик обратного тока в зависимости от температуры через каждые 5°C .

3. График зависимости $I = I(t^{\circ})$ и сравнить его с экспонентой.

4. Вычислить средний прирост тока на 1° по формуле

$$K = \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot 100\%$$

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Калашников. Электричество. ГИТТЛ, 1956.
2. А. Ф. Иоффе Физика полупроводников.
3. З. В. Шокли. Теория электронных полупроводников. ИЛ, 1957.
4. Г. Хениш. Полупроводниковые выпрямители. Гостехиздат, 1948.
5. У. Данлэп. Введение в физику полупроводников.
6. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.
7. Р. Смит. Полупроводники.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМАНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

§ 1. Теоретический обзор

Бурно развивающаяся наука и техника обусловили огромную потребность в фотоэлектрических преобразователях лучистой энергии — фотоэлементах. Известно, что первые советские спутники и ракеты были оснащены солнечными батареями, изготовленными из полупроводниковых материалов.

Вентильные фотоэлементы, то есть кристаллические фотоэлементы с запорным слоем, играют в этом отношении исключительно важную роль. Не говоря уже об упрощении систем автоматики и телемеханики, вентильные фотоэлементы вытесняют все больше и больше вакуумные, превосходя последние по своей чувствительности, простоте эксплуатации и сроку службы, имея при этом значительно меньшие размеры. Вентильные фотоэлементы совершенно незаменимы в новых и новейших областях техники, кибернетики и расчетной техники.

Фотоэффект запирающего слоя был открыт в 1876 г. Адамсон и Дейем, однако в течение полувека это открытие не находило практического применения. Только с середины 20-х годов XX в. было начато использование вентильных фотоэлементов, меднозакисных и селеновых, на смену которым вскоре пришли сернистосеребряные, сернистоталлиевые и сернистосвинцовые. Однако наиболее перспективными в настоящее время являются германиевые и кремниевые фотоэлементы (гл. 3, § 3, табл. 7). Чувствительность германиевых фотоэлементов достигает 30 мА/лм и даже 10 А/лм. Кремниевые фотоэлементы обладают несколько меньшей чувствительностью, но зато дают максимальный к. п. д., достигающий в настоящее время 14%. Германиевые фотоэлементы превосходят кремниевые не только чувствительностью, но и частотной и линейной характеристикой зависимости фототока от освещенности (рис. 132, рис. 133). Кроме того, спектральное распределение чувствительности таких фотоэлементов приблизительно совпадает со спектральным распределением излучения лампочки накаливания, что представляет большое удобство при использовании германиевых фотоэлементов в народном хозяйстве.

Рассмотрим вкратце принцип действия и основные свойства германиевых фотоэлементов.

Для создания запирающего слоя в германии можно использовать как контакт электронного и дырочного полупроводников, так и контакт металл — полупроводник. В настоящей главе рассматривается последний. В этом случае точно также, как и в случае контакта электронного и дырочного германия, образуется

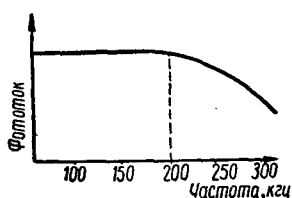


Рис. 132. Частотная характеристика для германиевого фотоэлемента.

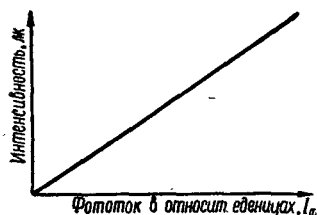


Рис. 133. Линейность характеристики зависимости фототока от освещенности для германиевых фотоэлементов.

контактная разность потенциалов между металлом и полупроводником, ибо работа выхода из металла и полупроводника различна.

Рассмотрим контакт металла и электронного полупроводника. Пусть при этом работа выхода из полупроводника $\phi_{п/п}$ меньше работы выхода из металла ϕ_m . Тогда электроны будут переходить из полупроводника в металл. Таким образом, приконтактный слой будет объединяться электронами, положительный заряд оставшихся ионов увеличится, а, значит, потенциальная энергия, изображаемая на зонной диаграмме, также увеличится в области контакта. Отсюда на диаграмме получим изгиб зон (рис. 134). Этот переход будет происходить до тех пор, пока возникшая при этом контактная разность потенциалов $U = \phi_{п/п} - \phi_m$ не уравновесит поток электронов. В результате возникает (с энергетической точки зрения) потенциальный барьер, через который электроны не могут проникать из металла в полупроводник. Возникновение потенциального барьера проявляется на практике, как некоторый запирающий слой, сопротивление которого много больше сопротивления остальной части образца. Однако в темноте, если мы замкнем цепь, тока не будет, ибо контактная разность потенциалов на одном контакте уравнивается разностью потенциалов противоположного знака на другом. Получается картина, аналогичная явлениям при наличии $p-n$ -перехода (гл. 15, § 1). Ряд ученых, например, Губанов, Шокли и другие считают, что при наличии металлического электрода на поверхности основного полупроводника всегда имеется слой противоположного типа проводимости. Они полагают, что обра-

зование запорного слоя происходит именно на контакте этих полупроводников.

При освещении контактной области светом, что возможно при наличии полупрозрачного металлического слоя или сетчатого электрода, возникают пары электрон — дырка. При этом, как показал В. Е. Лашкарев, под действием контактного поля они разделяются, и дырки идут в металл, а электроны в полупроводник. В результате приконтактная область обогащается

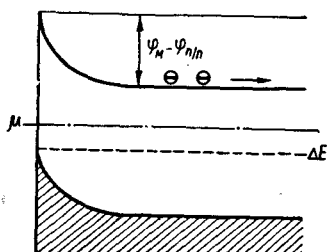


Рис. 134. Зонная диаграмма константы металл—полупроводник.

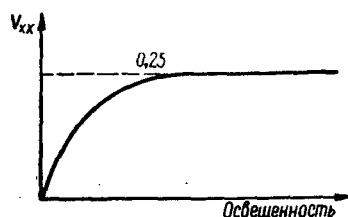


Рис. 135. Зависимость э. д. с. холостого хода от освещенности.

носителями, положительный заряд ионов будет компенсироваться, а потенциальный барьер понижается. Величина понижения барьера при малой интенсивности света зависит от последней.

В случае разомкнутой цепи поток носителей наблюдается до тех пор, пока возникающая в результате образовавшегося градиента концентрации разность потенциалов $V_{хх}$ не уравнивает его. Полученная разность потенциалов носит название фото-э. д. с. холостого хода. Она растет с ростом освещенности, достигая некоторого постоянного значения, зависящего от структуры и типа полупроводника (рис. 135). Такое поведение э. д. с. холостого хода понятно. Действительно, при малых освещенностях, когда понижение потенциального барьера невелико, э. д. с. $V_{хх}$ определяется этим изменением величины потенциального барьера. При значительных освещенностях, когда обусловленный изменением контактной разности потенциалов барьер совершенно сглаживается или даже меняет свой наклон, э. д. с. достигает максимального значения. Это значение определяется исключительно сопротивлением толщи материала, но не величиной потенциального барьера. Ввиду того, что возникает постоянный поток электронов с возникновением э. д. с. холостого хода, то последняя также остается без изменений.

В том случае, когда фотоэлемент замкнут накоротко, по цепи будет протекать некоторый ток, называемый током короткого замыкания — $I_{к.з.}$ Ток короткого замыкания может быть высчитан по формуле

$$I_{к.з} = \frac{V_{x.x}}{R_b},$$

где $V_{x.x}$ — э. д. с. холостого хода;

R_b — внутреннее сопротивление фотоэлемента.

Как показал опыт, зависимость тока короткого замыкания $I_{к.з}$ от освещенности (при небольших освещенностях) линейная, и поэтому фотоэлементы в режиме тока короткого замыкания могут быть использованы для фотометрических целей. (Нелинейный рост тока при достаточно больших освещенностях объясняется нелинейным уменьшением внутреннего сопротивления фотоэлемента с ростом освещенности). Действительно, при замыкании цепи дырки в металле и электроны в полупроводнике доходят до контактов и образуют постоянный поток носителей, который увеличивается прямо пропорционально освещенности (чем больше число носителей, тем больший ток течет во внешней цепи).

В общем случае фотоэлемент замыкается на некоторое внешнее сопротивление (рис. 136), на котором выделяется определенная мощность

$$N = I_{\phi} R_n,$$

R_n — нагрузочное сопротивление;

где

$$I_{\phi} = \frac{V_{x.x}}{R_b + R_n}.$$

Весьма существенно, с какой стороны освещается фотоэлемент. Фотоэлементы, освещаемые со стороны запорного слоя (через полупрозрачный электрод), получили название переднесеточных, а освещаемые с противоположной стороны — заднесеточных. Так как в случае заднесеточного фотоэлемента носители тока должны пройти через толщу полупроводника, то такие фотоэлементы желательно делать на расстоянии до запорного слоя (d) меньше диффузионной длины (L). Следовательно, материал для таких фотоэлементов необходимо выбирать с максимальной диффузионной длиной и минимальной толщиной. Понятно, что у переднесеточных фотоэлементов чувствительность, то есть ток, даваемый единицей освещенности (изменяется обычно в мкА/лм), больше, чем у заднесеточных. Кроме того, так как любой материал наиболее сильно поглощает тот спектральный состав излучения, к которому он наиболее чувствителен, то

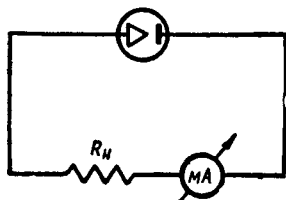


Рис. 136. Схема включения фотоэлемента на внешнее сопротивление. R_n — внешнее сопротивление (нагрузки).

спектральная чувствительность переднестеночных и заднестеночных фотоэлементов различна.

Важной характеристикой фотоэлемента, определяющей его возможную максимальную чувствительность, является величина квантового выхода β . Квантовый выход определяется числом пар носителей, освобождаемых одним поглощенным квантом света. Понятно, что $\beta \leq 1$, ибо поглощенный фотон может выбить либо одну пару, либо ни одной. Для большинства фотоэлементов (Si_2O , Se, Ag_2S) $\beta < 1$, но для Ge — $\beta = 1$. Этим и объясняется высокая чувствительность германиевых фотоэлементов.

Квантовый выход не следует путать с к. п. д. фотоэлемента. Если квантовый выход — это число носителей, освобождаемых одним поглощенным квантом, то к. п. д. — это отношение падающей лучистой энергии к полученной на выходе фотоэлемента электрической. Если $\beta = 1$, то это совершенно не значит, что к. п. д. равен 100%, так как не вся падающая энергия дает пары — часть ее (до 30%) отражается, часть поглощается неактивно, то есть без образования пар (в случае $\beta = 1$ неактивного поглощения не существует). Даже если пары все же образуются, то часть носителей рекомбинирует в толщине и на поверхности образца, не достигая электродов. Эти потери доходят до 30—35%. Для рекомбинирующих пар возможны потери при прохождении через толщу полупроводника и через шунтирующие прослойки, которые очень часто бывают в области $p-n$ -перехода; это так называемые потери по напряжению (до 30%). Имеется ряд других потерь, достигающих в сумме до 10—15%.

Наибольшая величина к. п. д. у Ge фотоэлемента составляет 1,5%. Максимальная величина к. п. д. получена у Si фотоэлемента и составляет в настоящее время 14%. Как показывают теоретические расчеты, максимальная величина к. п. д. преобразователя солнечной энергии может достигать 44%.

Из вышесказанного ясно, что параметры данного экземпляра будут зависеть от технологии его изготовления. Для уменьшения потерь на отражение рабочая поверхность фотоэлемента очень часто покрывается специальными лаками, просветляющими пленками. Для уменьшения неактивного поглощения, зависящего от структуры материала, выбирается соответствующий полупроводник с максимальным квантовым выходом. Объемная рекомбинация уменьшается путем подбора геометрических размеров образца (глубина залегания запорного слоя должна быть меньше диффузионной длины). Особое внимание следует обратить на уменьшение скорости поверхностной рекомбинации, определяющей число рекомбинирующих на поверхности пар в единицу времени. Потери на нее могут составлять до 30—35% всех потерь, в то время как объемная рекомбинация составляет 4—5%. Уменьшение скорости поверхностной рекомбинации достигается тщательной обработкой рабочей поверхности фотоэлемента.

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы:

1. Исследовать характеристику э. д. с. холостого хода германиевого фотоэлемента в зависимости от освещенности.
2. Измерить чувствительность германиевого фотоэлемента в режиме короткого замыкания.
3. Исследовать характеристику тока короткого замыкания в зависимости от освещенности.

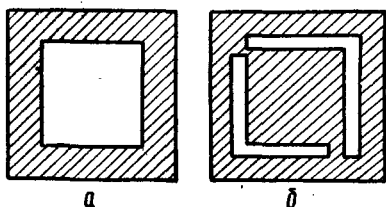


Рис. 137. Нанесение электродов на образец:

а — обратная сторона образца (серебряный слой); б — лицевая сторона образца (полупрозрачный золотой слой).

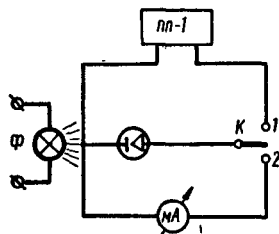


Рис. 138. Принципиальная схема для исследования характеристик фотоэлемента:

ПП-1 — потенциометр; К — переключной ключ; Ф — градуированный источник света.

Основные работы.

1. Подготовка германиевой пластинки.
2. Нанесение полупрозрачного слоя металла. Нанесение электродов.
3. Измерение э. д. с. холостого хода и ее зависимости от освещенности.
4. Измерение чувствительности фотоэлемента в режиме короткого замыкания.
5. Измерение зависимости $I_{к.з} = f(E)$.

1. Германиевая заготовка (германий *n*-типа с $\rho = 0,5 \div 15$ ом·см и толщиной 0,3—0,7 мм) путем шлифовки подгоняется до размеров $4 \times 4 \times 0,5$ мм³. Шлифовка должна производиться абразивом не крупнее, чем М=10, иначе получится очень глубокий, непригодный для дальнейшей работы слой. Отшлифованные заготовки тщательно промываются сначала проточной, а затем дистиллированной водой, потом протравливаются в 4%-ном растворе H₂O₂ в течение 5 мин. После травления заготовки просушиваются в сушильном шкафу в течение 20—30 мин.

2. Нанесение полупрозрачного слоя золота осуществляется методом катодного распыления. Полупрозрачность наносимого слоя определяется по контрольному стеклу, лежащему рядом с заготовками, или по прозрачности экрана (гл. 6, § 4). Контроль

ное стекло должно иметь зеленоватый оттенок в проходящем свете.

Электроды получаем методом нанесения серебряного слоя испарением в вакууме (10^{-4} мм рт. ст.) через трафарет. С лицевой стороны заготовки (со стороны полупрозрачного золотого слоя) трафарет имеет вид, показанный на рис. 137, б. Напыление следует производить с таким расчетом, чтобы электроды не замыкались друг с другом.

3. Измерение характеристик фотоэлемента производится в специальном держателе с хорошими контактами. Для измерений рекомендуется собрать схему, указанную на рис. 138. Замкнув ключ в положении 1, следует убедиться в отсутствии э. д. с. в темноте. Затем, включив осветитель (100 лка), измеряем фото-э. д. с. Приближая источник света, снимаем зависимость фото-э. д. с. от освещенности. Снятие характеристики производится до тех пор, пока не обнаруживаем независимость $V_{х.х}$ от освещенности. Измерение зависимости фототока от освещенности производится при положении ключа на 2.

§ 3. Обработка результатов

При оформлении результатов необходимо составить таблицы и построить графики:

1. Зависимость фото-э. д. с. холостого хода от освещенности

$$V_{х.х} = f(E).$$

2. Зависимости тока короткого замыкания от освещенности.

3. Расчет интегральной чувствительности производится по формуле

$$\frac{I}{E} = k,$$

где k — чувствительность фотоэлемента;

I — ток, мка;

E — освещенность, лм.

Используемая зависимость

$$I_{\phi} = f(E).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Лансберг. Оптика. Гостехиздат, 1947.
2. Полупроводники в науке и технике. Т. II. Изд. АН СССР, 1958.
3. Л. Герлих. Фотоэлементы. Гостехиздат, 1948.
4. Ю. М. Алтайский и Н. А. Гоженко. ЖЭТФ, Т. 30. В. 2. 1956.
5. Полупроводниковые фотоприемники и преобразователи излучения. Под ред. А. И. Фримера и И. И. Таубкина. Изд-во «Мир», М., 1965.

Глава 17

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕРМАНИЕВЫХ ФОТОДИОДОВ

§ 1. Теоретический обзор

Если в цепь фотоэлемента (гл. 16) включить источник э. д. с. в заперном направлении, то режим работы такого фотоэлемента называется фотодиодным режимом, а сам фотоэлемент фотодиодом (рис. 139). В настоящее время фотодиоды изготавливаются из германия созданием в нем электронно-дырочного прохода. Поэтому принцип действия фотодиода в основном не отличается от принципа действия фотоэлемента. Однако имеется ряд отличий.

Во-первых, так как к фотодиоду приложено некоторое внешнее напряжение и в темноте у него имеется некоторый, отличный от нуля обратный ток диода, называемый в случае фотодиода темновым током I_{τ} , поэтому чувствительность фотодиода определяется как разность полного и темнового токов (равная фототоку) на единицу освещенности

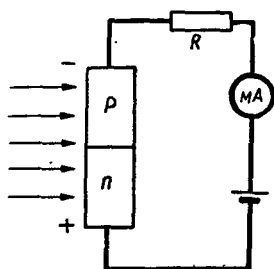


Рис. 139. Фотодиодные включения фотоэлемента.

$$k = \frac{I_{\text{п}} - I_{\tau}}{E} = \frac{I_{\text{ф}}}{E},$$

где k — чувствительность;

$I_{\text{п}}$ — полный ток;

I_{τ} — темновой ток;

$I_{\text{ф}}$ — фототок;

E — освещенность, лм.

Во-вторых, благодаря приложенному напряжению образованные светом пары электрон — дырка разделяются гораздо более интенсивно, чем в фотоэлементе, где действовало только контактное поле. Поэтому можно считать, что понижение потенциального барьера между p - и n -областями будет происходить

в результате освещения не на 0,25 в (величину э. д. с. холостого хода фотоэлемента), а величины, сравнимые с приложенным напряжением, т. е. до 100 в. И, таким образом, изменение падения напряжения на фотодиоде при освещении может достигать весьма значительных величин. Но так как внешнее напряжение, согласно закону Кирхгофа, распределяется между нагрузочным сопротивлением и фотодиодом,

$$V_{\text{п}} = V_{\text{н}} + V_{\text{вн}},$$

где $V_{\text{п}}$ — внешнее напряжение;

$V_{\text{н}}$ — падение напряжения на нагрузке;

$V_{\text{вн}}$ — падение напряжения на фотодиоде.

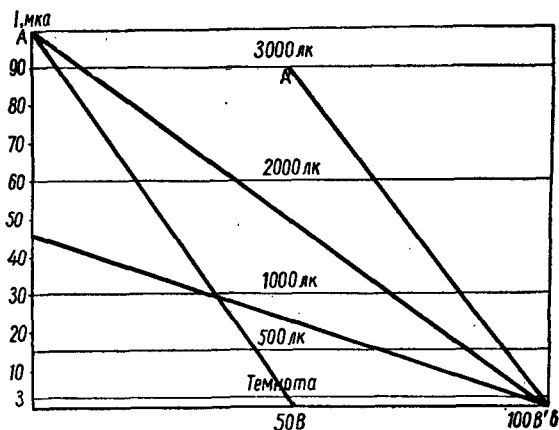


Рис. 140. Вольт-амперные характеристики фотодиода при различной освещенности.

С изменением падения напряжения на фотодиоде $V_{\text{вн}}$ соответственно изменяется падение напряжения на нагрузке, так что $V_{\text{п}} = \text{const}$.

Таким образом, можно добиться, что при достаточно больших освещенностях почти все приложенное напряжение будет падать на нагрузке (понижение потенциального барьера будет при этом столь значительным, что можно считать $V_{\text{вн}} = 0$).

Наиболее удобно расчет падения напряжения на различных нагрузочных сопротивлениях производить с помощью так называемых нагрузочных прямых. Последние строятся на графике семейства вольт-амперных (i/a) характеристик фотодиода в зависимости от освещенности. Так как фотодиод — это диод (гл. 15, § 1), чувствительный к освещению, то и его вольт-амперные ха-

рактические будут сходны с обратными характеристиками диода (рис. 140).

Так, вольт-амперная характеристика в темноте будет тождественна вольт-амперной характеристике кристаллического диода с ее типичным насыщением и пробойным напряжением, наступающим у современных типов фотодиодов примерно при 100 в. Освещение сдвигает прямую насыщения вверх, причем строго линейно с освещенностью. Таким образом, фотодиоды подобно фотоэлементам в режиме тока короткого замыкания обладают линейной зависимостью тока от освещенности.

Для построения нагрузочных прямых (то есть прямых, координаты которых дают нам ток и падение напряжения на фотодиоде при данных освещенностях) задаемся начальным приложенным напряжением или током через фотодиод и нагрузочным сопротивлением и под углом с осью ординат, тангенс которого равен с осью ординат нагрузочному сопротивлению, из заданной точки проводим прямую (рис. 140). Прямая AB' соответствует нагрузочному сопротивлению в 1 $Mом$ и общему приближенному напряжению 100 в. Она показывает, что в темноте на фотодиоде падает напряжение 97 в (на нагрузке 3 в), а при потоке в 3000 $лк$ на фотодиоде 10 в (на нагрузке 90 в). Кривые AB и $A'B'$ соответствуют $R_n=0,5 Mом$, но AB соответствует приложенному напряжению в 50 в, а $A'B'$ — 100 в. Прямая AB' соответствует нагрузочному сопротивлению $R_n=2 Mом$ и $V_n=100 в$. Следовательно, темновая характеристика будет просто равна характеристике обратного тока диода с той лишь разницей, что с ростом освещенности ордината кривых насыщения будет сдвигаться вверх.

Следует отметить, что из множества нагрузочных кривых для данной освещенности и данного напряжения будет обеспечивать прямая, соединяющая ординату максимального полного тока с абсциссой максимального напряжения (для 3300 $лк$ и 100 в — это прямая AB). Действительно, если освещенность меняется от 0 до 3300 $лк$, то напряжение нагрузки изменяется от 3 до 99 в ($\Delta V_n=96 в$). Кривые меньшего R_n , как ясно из рис. 140, обеспечивают меньшую величину ΔV_n . Прямые для $R_n>1 Mом$, например, $R_n=2 Mом$ тоже дают меньшие величины ΔV_n , так как в темноте $V_n=6 в$, а при освещенности в 3300 $лк$, так же как и в 1500 $лк$, $V_n=100 в$. Можно было бы ввести еще понятие вольтовой чувствительности, определяя ее как изменение падения напряжения на нагрузке при изменении освещенности на единицу. Но так как V_n зависит от $V_{вн}$, а последнее определяется внутренним сопротивлением фотодиода, которое обратно пропорционально зависит от площади, то и сама вольтовая чувствительность явилась бы не постоянной величиной, а квадратичной функцией, освещаемой площади фотодиода, потому что освещенность для данного потока прямо пропорциональна площа-

ди. Вследствие вышесказанного понятие вольтовой чувствительности не вводится, а просто говорится об изменении падения напряжения на нагрузке при изменении освещенности, иногда называют это изменение вольтовой чувствительностью (но еще раз подчеркиваем, что вольтовая чувствительность фотодиода является функцией освещаемой поверхности и изменяется от прибора к прибору).

Наличие значительной вольтовой чувствительности является весьма ценным качеством данного прибора, ибо в целом ряде случаев технического использования фотоэлементов важно именно достаточно большее изменение напряжения на нагрузке (реле, магнитные пускатели и т. д.).

Наличие же отличного от нуля темнового тока является отрицательным качеством фотодиода, ограничивающим его применение в ряде систем автоматики и контроля, усугубляющееся еще тем свойством, что фототок резко (11% *град*) растет с температурой. Поэтому одной из важнейших характеристик нужно

считать отношение фототока к темновому току $-\frac{I_{\Phi}}{I_T}$ (при 20° С и 1000 лк удовлетворительной считается характеристика $\frac{I_{\Phi}}{I_T} \geq 10$).

Отношение $\frac{I_{\Phi}}{I_T}$ обуславливается точно теми же потерями, которыми определяется к. п. д. фотоэлемента (гл. 16). Поэтому непременным условием получения хороших фотодиодов является чистота изготовления этих приборов и особая тщательность и осторожность при обработке поверхности.

Существенным параметром фотодиода, помимо рабочего тока, определяемого освещенностью поверхности и напряжения, падающего на фотодиод, является максимальная рассеиваемая мощность. В случае постоянного тока

$$W_p = I_p V_n,$$

где W_p — рассеиваемая мощность;

I_p — ток через фотодиод;

V_n — падение напряжения на нагрузке.

Превышение этой величины для данной конструкции прибора проявляется дрейфом полного тока, с течением времени происходящем в результате саморазогрева фотодиода. Увеличение W_p достигается путем усовершенствования конструкции в сторону усиления теплоотвода от корпуса прибора, то есть точно так же, как и обыкновенных кристаллических диодов.

Основные характеристики фотодиодов, серийно выпускаемых нашей промышленностью, приведены в табл. 21.

Таблица 21

Тип фотодиода	Чувствит., ма/лм	Квант. выход	Граничная частота, Мгц
С точечным контактом	100—200	3—6	0,2—0,1
С одним $p-n$ -переходом	30	1	0,2—1
С $n-p-n$ -переходом	3000—10000	100—300	0,04—0,1

§ 2. Экспериментальная часть

Цель работы:

1. Исследовать семейство вольт-амперных характеристик фотодиода.

2. Вычислить чувствительность фотодиода по току.

3. Построить оптимальную нагрузочную кривую и вычислить чувствительность по напряжению.

Основные этапы работы.

1. Получение и подготовка заготовок германия.

2. Обработка заготовок.

3. Нанесение электродов.

4. Проведение процесса сплавления (получение $p-n$ -перехода).

5. Припайка омического контакта.

6. Измерения.

1. Из пластинки германия размерами $(2,2 \times 2 \times 4)$ мм³ путем шлифовки абразивом М-10 вручную или с помощью специального приспособления отшлифовать фронтальные поверхности до толщины 0,25—0,3 мм, соблюдая при этом плоскопараллельность граней.

2. Промыть заготовки сначала в проточной, а затем в дистиллированной воде.

Примечание. После этой операции прикасаться к образцам можно только чистым, протертым спиртом пинцетом.

Затем произвести травление заготовок в 4%-ном растворе H_2O_2 . После травления заготовки тщательно промыть и просушить в сушильном шкафу.

3. Вырезанный по трафарету с помощью специального выдавливателя (рис. 141) электрод, состоящий из In для n -германия или из сплава PbSb для p -германия, прижимается к центру широкой стороны заготовки. Для выдавливания сплав раскатывается до толщины 0,15 мм и выдавливаются диски диаметром в 0,8 мм.

4. Заготовки с дисками сплава помещаются под колпак вакуумной установки или трубу газовой печи (водород или смесь $Ag + H_2$). После проведения откачки до 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст.

или, соответственно, напуска газа начинается медленный подъем температуры со скоростью не более 20 град/сек до 500°С и затем такое же медленное понижение ее до комнатной.

5. На вынутые из печи полученные фотодиоды наносятся контакты. Сначала наносится омический контакт. Для этого,

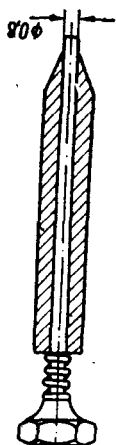


Рис. 141. Устройство для выдавливания пластинок круглой формы из фольги.

используя в качестве припоя In для $p\text{-Ge}$ и Sn для $n\text{-Ge}$ с помощью специального миниатюрного паяльника и употребляя в качестве флюса канифоль или ZnCl_2 , осторожно залуживается уголок кристалла, к которому припаивается заслуженная проволочка ($d = 0,15 \text{ мм}$). После этого с исключительной осторожностью, чтобы не деформировать каплю основного контакта, последний слегка залуживается быстрым касанием паяльника, и таким же быстрым касанием концом паяльника к нему припаивается залуженная проволочка.

Примечание. Припайка требует некоторого навыка и поэтому для облегчения можно пользоваться лупой или микроскопом.

После припайки фотодиоды промываются в горячей воде, а затем протравливаются в 4%-ном растворе H_2O_2 с добавлением 2—3 капель 15%-ного раствора щелочи. После тщательной промывки образцы сушатся в шкафу при $t = 100\text{—}120^\circ\text{C}$ на 1,5—2 часа.

Примечание. Для предотвращения попадания грязи на переход последний рекомендуется заливать перед сушкой свежим лаком МБК, однако сушка после этого должна продолжаться не менее 12 час.

Если при проверке образцов обнаружится дрейф темного тока или неудовлетворительные характеристики, повысить качество фотодиода можно попытаться путем повторного травления или более длительной сушкой.

6. Исследование семейства вольт-амперных характеристик с помощью осциллографа можно провести на схеме, приведенной в гл. 2, рис. 38.

Работа проводится в таком порядке:

1. Включаем схему; на экране появляется линия (горизонтальная при разомкнутых и вертикальная при короткозамкнутых контактах A и B), увеличивающая свою длину с ростом приложенного напряжения.

Примечание. Осциллограф должен быть предварительно градуирован так, чтобы одна клетка вертикальной оси соответствовала 10 $\mu\text{ка}$, а горизонтальной — 10 в при сопротивлении нагрузки в 1 Мом .

Далее, постепенно вводя напряжение (образец зажат между точками A и B), следим за изменением характеристики до тех пор, пока напряжение не достигнет пробойного значения. Вид вольт-амперной характеристики темнового тока перевести на кальку, поместив начало координат в начальной точке характеристики. Переключив ключ K_1 , перевести на кальку прямую характеристику фотодиода.

2. Включаем осветитель, при этом должна появиться чувствительность к свету обратного фототока. Снимаем значения фототока при освещенностях 500—1000, 2500—5000 лк, зарисовав характеристики на тот же график. Из полученного графика вычисляется чувствительность фотодиода по току, из него же рассчитывается оптимальное нагрузочное сопротивление для освещенности в 5000 лк и максимальное для данного фотодиода на напряжения. Для этого построить нагрузочную кривую по правилам, изложенным в § 1, и вычислить R_n .

3. Поставить рассчитанное R_n (на рис. 38 — R_1) на схеме и приложить максимальное напряжение, оставляя прибор в темноте. Вид характеристики с экрана перевести на кальку. Осветить фотодиод световым потоком в 5000 лк. Вид новой характеристики перевести на кальку. Прodelать эти же операции для других значений R_n (в два раза большие и в два раза меньшие). Во время работы необходимо следить, чтобы приложенное напряжение было строго постоянным (для этого можно, например, высокоомным вольтметром замерить напряжение между точками A и B). Вычислить разность падений напряжений в темноте и при освещении для каждого из сопротивлений нагрузки, убедившись в правильности в выборе оптимального нагрузочного сопротивления.

§ 3. Обработка результатов

При оформлении работы необходимо:

- вычертить диаграммы семейства вольт-амперных характеристик в зависимости от освещения;
- рассчитать чувствительность фотодиода по току по формуле

$$K = \frac{I_n - I_t}{\Phi \cdot S},$$

где I_n — полный ток;

I_t — темновой ток;

Φ — световой поток, лк;

S — площадь освещаемой поверхности, м;

- рассчитать перепад падения напряжения на различных

нагрузочных сопротивлениях при 5000 лк и в темноте по формулам

$$\Delta U'_n = U'_{n_1} - U'_{n_0} \quad \text{для} \quad R'_n;$$

$$\Delta U''_n = U''_{n_1} - U''_{n_0} \quad \text{для} \quad R''_n;$$

$$\Delta U'''_n = U'''_{n_1} - U'''_{n_0} \quad \text{для} \quad R'''_n$$

$$(\Delta U'_n \equiv \Delta V'_n),$$

где $\begin{cases} U_{n_0} = U_n - U_{\Phi_0} \\ U_{n_1} = U_n - U_{\Phi_0} \end{cases} \quad \text{для} \quad R'_n;$

U_n — приложенное напряжение;

U_{Φ_0} — падение напряжения на фотодиоде в темноте (вычисляется по длине вольт-амперной характеристики на экране осциллографа);

U_{Φ_1} — падение напряжения на фотодиоде при освещении в 5000 лк (вычисляется по длине участка насыщения вольт-амперной характеристики на экране осциллографа или на зарисованной диаграмме; если он отсутствует, то берется расстояние крайней точки вольт-амперной характеристики до оси ординат).

Те же формулы имеют место для сопротивления R'_n и R''_n . Приложить диаграммы для случаев вольт-амперных характеристик R' , R'' и R''' при освещенности в 5000 лк и в темноте.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников.
2. Полупроводники в науке и технике. Т. I и II.
3. В. Шокли. Теория электронных полупроводников. ИЛ, 1953.
4. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.
5. В. И. Туркулец и Н. П. Удалов. Фотодiodы и фототриоды.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Раздел первый

Некоторые вопросы теории и техники физического эксперимента

Глава 1. Введение в технику физического эксперимента	5
§ 1. Гигиена физического эксперимента	5
§ 2. Погрешности измерений физических величин	6
Глава 2. Методы и техника электрических и магнитных измерений	11
§ 1. Гальванометры	11
§ 2. Электрометры и электрические схемы	25
§ 3. Измерение сопротивлений, емкости и индуктивности. Мосты	36
§ 4. Электроно-лучевой осциллограф	44
§ 5. Измерение магнитных величин	51
Глава 3. Основные методы оптических измерений	58
§ 1. Источники света	58
§ 2. Измерение спектров поглощения. Оптические устройства	62
§ 3. Фотоэлементы и фотоумножители	65
Глава 4. Некоторые приемы лабораторной практики	79
§ 1. Методы холодной обработки стекла и других материалов	79
§ 2. Методы получения высоких температур	84
§ 3. Пайка и точечная сварка металлов	96
§ 4. Различные составы, применяемые в физической лаборатории. Приемы лабораторной практики	98
Глава 5. Основы вакуумной техники	102
§ 1. Свойства вакуума	102
§ 2. Получение высокого вакуума	103
§ 3. Измерение вакуума	108
§ 4. Основные приемы при работе с вакуумными установками	111
Глава 6. Поверхностные покрытия	118
§ 1. Впекание	118
§ 2. Способы химического покрытия металлом	118
§ 3. Гальваническое осаждение металла	120
§ 4. Катодное распыление	121
§ 5. Испарение в вакууме	124

Раздел второй

Лабораторные задания

Глава 7. Измерение проводимости полупроводника на постоянном токе	129
§ 1. Теоретический обзор	129
§ 2. Экспериментальная часть	132
§ 3. Обработка результатов	133
Глава 8. Исследование некоторых свойств щелочно-галогенных кристаллов	134
§ 1. Теоретический обзор	134
§ 2. Экспериментальная часть	138
§ 3. Обработка результатов	139
Глава 9. Измерение диэлектрической проницаемости изоляционного материала	140
§ 1. Вводная часть	140
§ 2. Экспериментальная часть	142
§ 3. Обработка результатов	143

Глава 10. Изучение фотопроводимости полупроводниковых образцов .	144
§ 1. Вводная часть	144
§ 2. Экспериментальная часть	145
§ 3. Обработка результатов	147
Глава 11. Измерение сопротивления металлов или полупроводников в магнитном поле	148
§ 1. Вводная часть	148
§ 2. Экспериментальная часть	150
§ 3. Обработка результатов	152
Глава 12. Измерение постоянной Холла у металла или полупроводника. .	153
§ 1. Вводная часть	153
§ 2. Экспериментальная часть	156
§ 3. Обработка результатов	157
Глава 13. Измерение контактной разности потенциалов	159
§ 1. Введение	159
§ 2. Экспериментальная часть	162
§ 3. Обработка результатов	163
Глава 14. Определение времени жизни неосновных носителей тока фото-электрическим методом	164
§ 1. Теория метода	164
§ 2. Экспериментальная часть	166
§ 3. Оформление результатов измерений	168
Глава 15. Исследование характеристик германиевых выпрямителей . . .	169
§ 1. Теоретический обзор	169
§ 2. Экспериментальная часть	174
§ 3. Оформление результатов	175
Глава 16. Исследование германиевых фотоэлементов	176
§ 1. Теоретический обзор	176
§ 2. Экспериментальная часть	181
§ 3. Обработка результатов	182
Глава 17. Исследование основных характеристик германиевых фото-диодов	183
§ 1. Теоретический обзор	183
§ 2. Экспериментальная часть	187
§ 3. Обработка результатов	189

Владимир Григорьевич Сидякин,
Юрий Михайлович Алтайский

Техника физического эксперимента

Редактор *Миронец Е. М.* Художник *Обуховский В.*

Технический редактор *Окопная Е. Д.*

Художественный редактор *Егоров В. А.*

Корректор *Борейко Т. А.*

Сдано в набор 1/II 1965 г. БФ 36846. Зак. 421. Тираж 4930. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Физич и условн. печ. листов 12. Учетно-издат. листов 10,95. Бум. листов 6. Подписано к печати 16.XI 1965. Цена 33 коп.

Издательство Киевского университета, Киев, Б. Шевченко, 14.

Т. П. — 1965 — поз. 15.

Киевская книжная типография № 5 Государственного комитета Совета Министров УССР по печати, Киев, Репина, 4.