

Ярославский государственный педагогический  
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 11  
Определение ширины  
запрещенной зоны  
полупроводника

Ярославль  
2020

---

## Оглавление

1.	Теоретическое введение . . . . .	3
2.	Описание установки . . . . .	9
	2.1. Устройство и принцип работы потенциометра Р-307 . .	11
	2.2. Измерение напряжений с помощью потенциометра Р-307	13
3.	Порядок выполнения работы . . . . .	13
	Задание 1. . . . .	13
	Задание 2. . . . .	14
	Задание 3. . . . .	14
4.	Э.Д.С. нормального элемента Вестона . . . . .	15
5.	Контрольные вопросы . . . . .	15

## Лабораторная работа № 11

### Определение ширины запрещенной зоны полупроводника

**Цель работы:** исследование зависимости проводимости полупроводника от температуры и определение ширины запрещенной зоны.

**Приборы и принадлежности:** образец полупроводника, укрепленный в сушильном шкафу в специальном зажиме, потенциометр с принадлежностями, выпрямитель, термопара с микроамперметром, комнатный термометр, гальванометр.

Литература:

1. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина.
2. Гольдин Л.Л., Новикова П.И. Введение в атомную физику.
3. Савельев И.В. Курс физики, том 3.

## 1. Теоретическое введение

При объединении атомов в кристаллическое тело структура энергетических уровней электронов претерпевает важные изменения. Эти изменения почти не затрагивают наиболее глубоких уровней образующих внутренние заполненные оболочки. Зато наружные уровни коренным образом перестраиваются. Указанное различие связано с разным пространственным распределением электронов, находящихся на глубоко лежащих и на верхних энергетических уровнях. Атомы в кристалле тесно “прижаты” друг к другу. Волновые функции наружных электронов в существенной мере перекрываются, что приводит к обобществлению этих электронов — они теперь принадлежат не отдельным атомам, а всему кристаллу.

В то же время волновые функции внутренних электронов друг с другом практически не перекрываются. Положение этих уровней в кристалле мало отличается от их положения у изолированных атомов.

У одиночных атомов одного и того же элемента энергия соответствующих уровней в точности одинакова. При сближении атомов эти

энергии начинают расходиться, как это изображено на рис. 1.1а. Расщепление энергетических уровней аналогично расхождению частот колебаний, происходящему при появлении связи между одинаковыми маятниками или между электрическими колебательными контурами, настроенными на одну и ту же частоту. Системы “разошедшихся” уровней образуют в кристалле разрешенные энергетические зоны, разделенные запрещенными зонами (рис. 1.1б). **Ширина зон определяется** величиной связи между атомами и не зависит от числа атомов в кристалле. В то же время количество уровней в зоне равно числу атомов и описывается цифрами с десятком или несколькими десятками нулей. Таким образом, расстояние между уровнями оказывается столь незначительным, что говорить о положении отдельных уровней в зоне не имеет смысла. В то же время количество уровней сохраняет вполне ясный смысл.

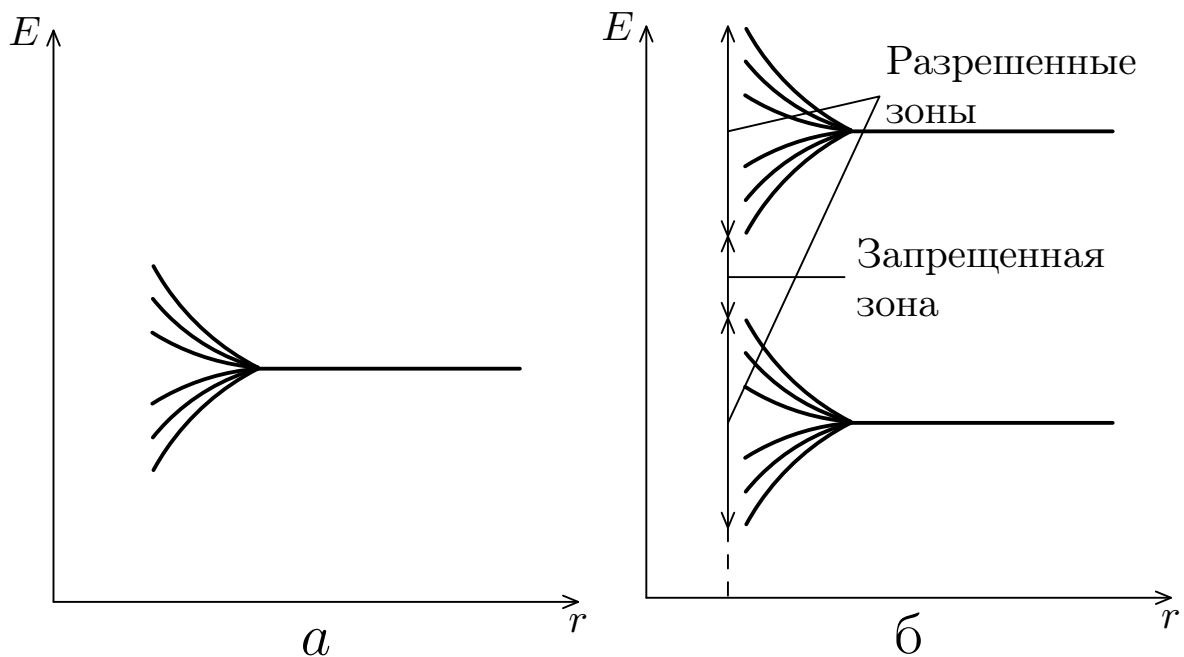


Рис. 1.1.

$E$  — энергия,

$r$  — расстояние между атомами.

*При сближении атомов число возможных состояний, а, следовательно, и число электронов, которые могут занять эти состояния, не изменяется*

Квантовые числа, которыми характеризуются состояния обобществленных электронов в кристалле, не имеют ничего общего с квантовыми числами электронов в изолированных атомах. В атомах действующее на электроны поле является центральным, так что момент количества движения сохраняется. Момент количества движе-

## 1. Теоретическое введение

---

ния служит поэтому основой для квантования: уровни отличаются друг от друга величиной и направлением этого момента.

В твердом теле электрические силы нецентральноны, и говорить о моменте количества движения не приходится. Основной особенностью электрического поля в кристаллах является его периодичность. Квантовые состояния электронов различаются импульсом (или, точнее говоря, квазиимпульсом), а значит, направлением и скоростью движения.

Электропроводность кристаллов определяется распределением электронов по уровням. В изоляторах электроны доверху заполняют последнюю из занятых зон (так называемую валентную зону). Следующая разрешенная зона (зона проводимости) не содержит электронов. Ширина запрещенной зоны, разделяющей валентную зону и зону проводимости, велика, так что электроны в обычных условиях не могут ее перепрыгнуть. В силу симметрии кристалла количество электронов находящихся в валентной зоне и движущихся в противоположные стороны, одинаково — электрический ток отсутствует. В присутствии поля ни один из электронов не может изменить своего движения (например, сменить импульс “по полю” на импульс “против поля”), так как нет свободных энергетических состояний в зоне.

В металлах электроны лишь частично заполняют последнюю из занимаемых зон, и в ней имеются свободные состояния. В присутствии поля электроны зоны могут занимать эти состояния, что равносильно получению электронами импульса “против поля”, и кристалл проводит ток.

К полупроводникам относятся вещества, которые при низких температурах являются изоляторами. Они отличаются от обычных изоляторов небольшой шириной запрещенной зоны. Уже при нормальных температурах тепловое движение перебрасывает часть электронов из валентной зоны в зону проводимости. В зоне проводимости она определяется присутствующими там электронами (электронная проводимость). В валентной зоне проводимость становится возможной из-за появления свободных состояний, часть из которых (соответствующих нужному направлению тока) может быть занята электронами зоны (дырочная проводимость).

Величина электропроводности в полупроводниках определяется числом электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне (эти числа в чистых полупроводниках, конечно, равны друг друга).

Число электронов, находящихся в зоне проводимости, равно произведению числа имеющихся уровней на вероятность их заполнения. Вероятность заполнения уровней определяется функцией Ферми, которая в нашем случае мало отличается от простой экспоненты:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-\mu}{kT}\right) + 1} \approx \exp\left(-\frac{E-\mu}{kT}\right), \text{ т.к. } (E-\mu) \gg kT, \quad (1.1)$$

где  $E$  — энергия уровня в зоне проводимости,  
 $\mu$  — некоторая константа, носящая название энергии Ферми.

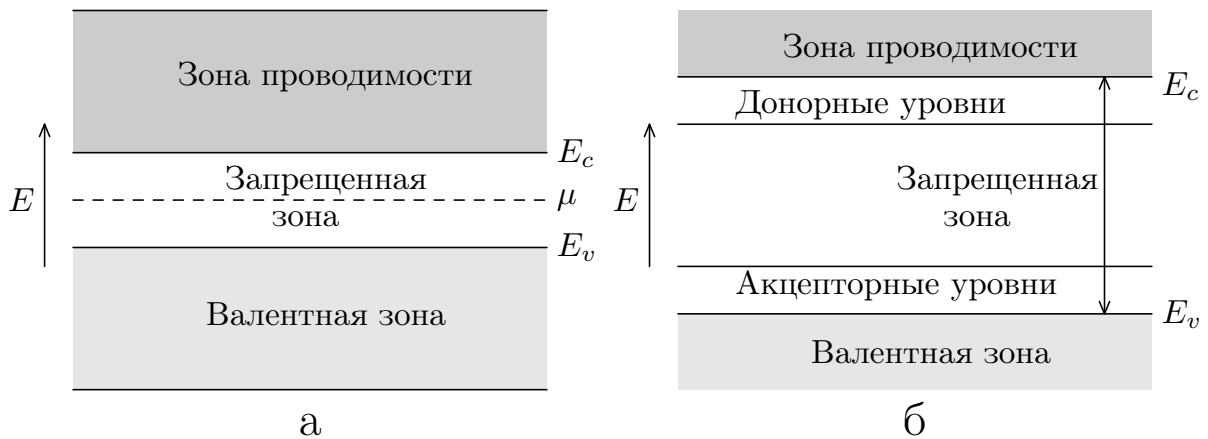


Рис. 1.2

В собственных полупроводниках энергия Ферми лежит вблизи середины запрещенной зоны (рис. 1.2а).

При обычных температурах заняты главным образом уровни находящиеся у дна зоны проводимости, так что в качестве энергии  $E$  можно подставить энергию  $E_c$ , соответствующую дну зоны проводимости. При этом вместо полного числа уровней в зоне нужно принимать некоторое эффективное число уровней  $N_{\text{эфф}}$ , находящихся вблизи дна зоны. Таким образом, число электронов в зоне проводимости равно:

$$n_{\text{э}} = N_{\text{эфф}_{\text{э}}} \cdot \exp\left(-\frac{E_c - \mu}{kT}\right). \quad (1.2)$$

Вероятность появления дырки в валентной зоне определяется раз-

## 1. Теоретическое введение

---

ностью  $1 - f(E)$ . Поэтому число дырок равно:

$$n_g = N_{\text{эфф}g} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{E_\nu - \mu}{kT}\right) + 1} \right) \approx N_{\text{эфф}g} \cdot \exp\left(\frac{E_\nu - \mu}{kT}\right). \quad (1.3)$$

При преобразовании формулы (1.3) было принято во внимание, что энергия верхнего края валентной зоны  $E_\nu$  меньше  $\mu$  и дробь  $\frac{E_\nu - \mu}{kT}$  является большим отрицательным числом. Перемножим формулы (1.2) и (1.3) и примем во внимание, что число электронов равно числу дырок:

$$n_\varepsilon \cdot n_g = n^2 = N_{\text{эфф}\varepsilon} \cdot N_{\text{эфф}g} \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_\nu}{kT}\right). \quad (1.4)$$

Разность  $(E_c - E_\nu)$  равна ширине зоны  $\Delta E$ . Обозначая для краткости произведение

$$N_{\text{эфф}\varepsilon} \cdot N_{\text{эфф}g} = c^2 \quad (1.5)$$

и извлекая корень из (1.4), получим:

$$n = C \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right). \quad (1.6)$$

Найдем теперь электропроводность полупроводника. В присутствии поля большая часть электронов в зоне проводимости начинает двигаться в сторону противоположную полю. Средняя величина скорости электронов перестает быть равной нулю и направлена вдоль поля. При этом вплоть до самых сильных полей (практически до пробоя) выполняется формула:

$$v_{\text{ср}} = \mu_\varepsilon E, \quad (1.7)$$

где  $v_{\text{ср}}$  — среднее значение скорости электронов,  
 $E$  — напряженность электрического поля,  
 $\mu_\varepsilon$  — коэффициент пропорциональности, носящий название подвижности электронов.

Применяя формулу (1.7) к электронам в зоне проводимости и к дыркам в валентной зоне, найдем:

$$\sigma = \frac{j}{E} = |e| \cdot \{n_\varepsilon \mu_\varepsilon + n_g \mu_g\}, \quad (1.8)$$

---

где  $j$  – плотность электрического тока.

Подставляя в (1.8) значение  $n_{\text{э}} = n_g$  из (1.6), получим:

$$\sigma = |e| \cdot C(\mu_{\text{э}} + \mu_g) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (1.9)$$

где предэкспоненциальный множитель заменен константой  $A$ .

Измерим электропроводность  $\sigma$  как функцию температуры и изобразим результаты на графике в полулогарифмическом масштабе:

$$\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right). \quad (1.10)$$

Формула (1.9) показывает, что график должен иметь вид прямой линии с наклоном  $\frac{\Delta E}{2k}$ .

Наклон прямой (1.10) позволяет, таким образом, определить ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E}{2k} \quad \Rightarrow \quad \Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Приведенные соображения верны лишь постольку, поскольку электропроводность проводника определяется переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости, т.е. пока основной вклад в электропроводность вносит собственная проводимость полупроводника.

При небольших температурах это обычно не имеет места, так как полупроводники всегда содержат примеси. Примесная проводимость полупроводников происходит из-за внедрения в кристалл донорных и акцепторных атомов. Донорными являются атомы V периода таблицы Менделеева. (Напомним, что к типичным полупроводникам принадлежат кремний и германий — элементы IV периода.) Элементы V периода содержат в наружной оболочке лишний, по сравнению с германием и кремнием электрон. У атома, вошедшего в состав кристаллической решетки полупроводника, связь этого электрона с атомом ослабляется. Внутри запрещенной зоны у самого дна зоны проводимости (см. рис. 1.2б) появляется поэтому небольшое количество дополнительных уровней (их число равно числу атомов примесей). Уже при нормальных температурах эти уровни оказываются практически полностью ионизированы: электроны уходят из них в зону проводимости.



## 2. Описание установки

---

Акцепторами служат, обычно, элементы III периода таблицы Менделеева. Создаваемые ими локальные уровни также располагаются в запрещенной зоне, но ближе к верхнему краю валентной зоны. Эти уровни заполняются электронами из валентной зоны; в валентной зоне появляются дырки.

В зависимости от чистоты полупроводника примесная проводимость может вносить в электропроводность больший или меньший вклад. Она искажает температурный ход собственной электропроводности. Чтобы правильно определить ширину запрещенной зоны, нужно провести измерения в широком интервале и выбрать участок, где зависимость электропроводности от  $\frac{1}{T}$  имеет чисто экспоненциальный характер.

Электропроводность полупроводников может измеряться различными способами. При выборе методики следует учитывать факторы, которые способны исказить результаты измерений. Наибольшую опасность представляют места контакта изучаемого образца с подводящими проводами. Сопротивление контактов может оказаться соизмеримым с сопротивлением самого образца, в этом случае, конечно, измерения будут испорчены. Контакт может оказаться неомическим (сопротивление контакта зависит от величины тока) и может сложным образом изменяться с температурой. На контактах полупроводника с металлом появляется термо-э.д.с., величина которой изменяется с температурой.

Обычно предлагается три метода экспериментального исследования зависимости  $\sigma(T)$ , в той или иной степени исключая перечисленные источники ошибок. При выполнении работы следует воспользоваться одним из описанных методов.

## 2. Описание установки

Измерение электропроводности полупроводника в данной работе осуществляется компенсационным методом. Принципиальная схема установки для этой цели изображена на рис. 2.1. Через полупроводниковый образец пропускается постоянный ток. При помощи зондовых электродов 1 и 2 с части образца снимается падение напряжения  $U_x$ , которое измеряется компенсационным методом. Когда падение напряжения на рабочей части потенциометра окажется равным на-

пряжению между зондовыми электродами, ток через гальванометр прекращается. Обозначим поперечное сечение образца через  $S$ , а расстояние между зондами  $\ell$ . Удельная проводимость полупроводника находится по формуле:

$$\sigma = \frac{I}{U_x} \cdot \frac{\ell}{S}.$$

Применение компенсационного метода позволяет исключить ошибку, вносимую сопротивлением контактов, так как измерения проводятся в отсутствие токов через контакты зондовых электродов. Погрешностей, возникающих из-за появления термо-э.д.с. на контактах зонд-полупроводник, этот метод не исключает. Как легко видеть, опасность представляют не сами эти э.д.с., а их разности. Поэтому в данной работе приняты меры, чтобы нагрев полупроводника был равномерным, и оба контакта находились при одинаковой температуре.

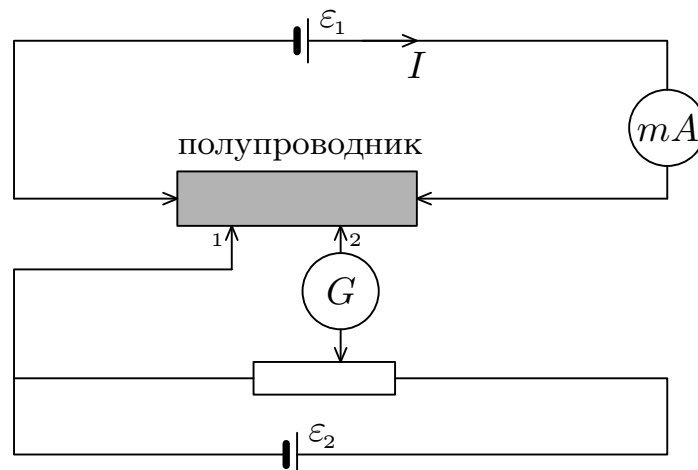


Рис. 2.1

Для изучения зависимости  $\sigma = f(T)$  используется установка, схематически изображенная на рис. 2.2. Исследуемый образец в специальном зажиме помещается в сушильный шкаф. Ток к образцу подается от источника Б5-50. Величина тока контролируется прибором М2020. Падение напряжения между зондами измеряется компенсационным методом при помощи потенциометра постоянного тока типа Р-307.

Нагрев образца в сушильном шкафу можно регулировать реостатом, вмонтированным в шкаф. Температура образца измеряется медь-константановым термостолбиком, составленным из двух термопар. Два спая находятся у образца и два около микроамперметра,

## 2. Описание установки

с помощью которого измеряется ток через термостолбик. Микроамперметр следует помещать как можно дальше от сушильного шкафа, так как половина спаев должна находиться при комнатной температуре. Микроамперметр показывает разницу между температурой образца и комнатной. Поэтому, чтобы узнать абсолютную температуру образца, нужно к температуре, показываемой прибором, прибавить температуру в комнате.

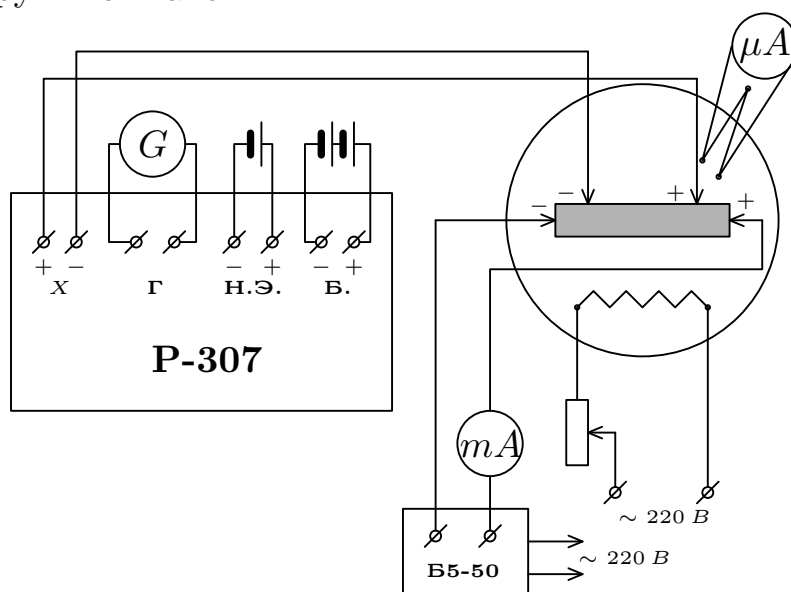


Рис. 2.2. Принципиальная схема

### 2.1. Устройство и принцип работы потенциометра постоянного тока Р-307

Принцип действия потенциометра постоянного тока основан на компенсации измеряемой в некоторой известной э.д.с. и был подробно рассмотрен в практикуме по электричеству.

В настоящем описании отметим только некоторые особенности устройства и работы потенциометра Р-307. Упрощенная схема потенциометра изображена на рис. 2.3.

Ток через потенциометр создается батареей аккумуляторов *В* и регулируется ручками “Грубо” и “Тонко”. (На схеме указаны только две ручки из четырех.) Для установки тока в схему компенсации включается элемент с известной величиной э.д.с. — нормальный элемент Вестона (*НЭ*). В потенциометре Р-307 учитывается изменение э.д.с. *НЭ* с изменением температуры. Для этой цели резистор делают переменным (ручка *НЭ* на потенциометре).

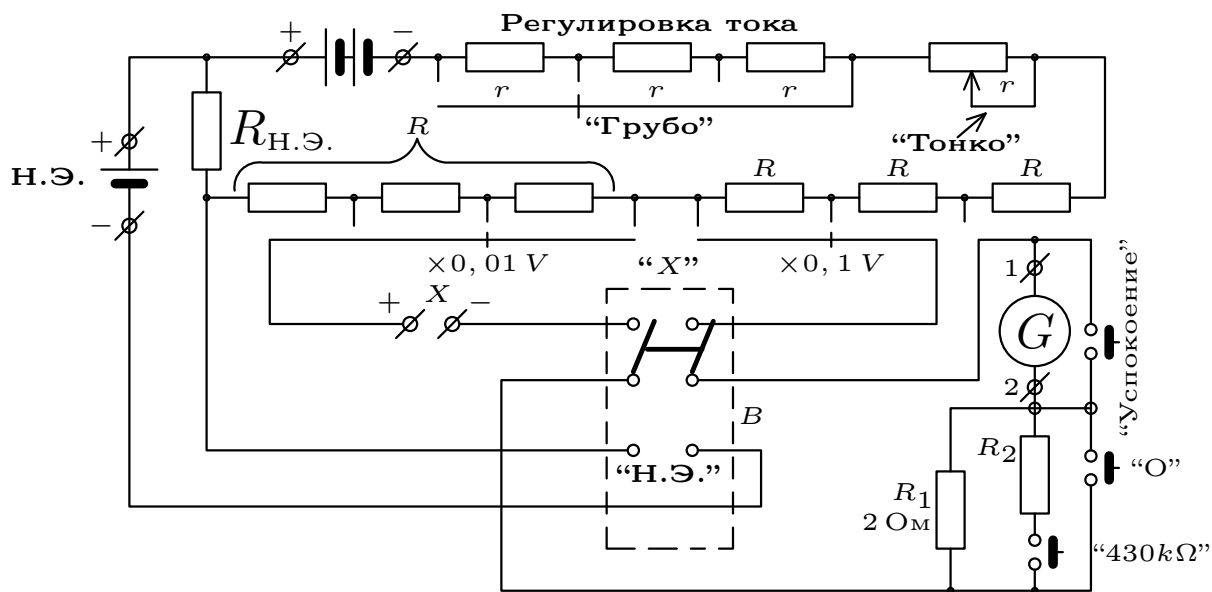


Рис. 2.3

Если величина установленного тока точно известна, то рабочие декады можно проградуировать непосредственно в вольтах, что и сделано в потенциометре Р-307.

С помощью переключателя рода работ  $B$  в схему компенсации можно включать нормальный элемент  $HЭ$  или измеряемое напряжение (положение  $X$ ). Имеется и промежуточное положение, в котором потенциометр выключен. В потенциометр Р-307 можно включать два измеряемых напряжения  $X_1$  и  $X_2$ .

При измерении неизвестного напряжения переключатель  $B$  становится в положение  $X$ , а компенсация осуществляется двумя рабочими декадами:  $\times 0,1 V$  и  $\times 0,01 V$ . (В Р-307 рабочих декад шесть и применена более сложная схема коммутации.)

Кнопки “430кΩ” и “0” для уменьшения чувствительности гальванометра, при сильной раскомпенсации схемы.

Возможны три состояния:

1. Наименьшая чувствительность — все кнопки в верхнем положении.
2. Промежуточная чувствительность — нажата только кнопка “430кΩ”.
3. Наибольшая чувствительность — нажата кнопка “0” (положение кнопки “430кΩ” в этом случае не имеет значения).

Кнопка “Успокоение” замыкает рамку гальванометра накоротко и быстро успокаивает ее колебания.

### 3. Порядок выполнения работы

---

#### 2.2. Измерение напряжений с помощью потенциометра Р-307

1. Нормальный элемент Вестона, гальванометр и аккумуляторную батарею присоединить к соответствующим зажимам потенциометра, соблюдая полярность.
2. К зажимам  $X_1$  или  $X_2$  присоединить источник измеряемого напряжения, соблюдая полярность (в данном случае напряжение между зондовыми электронами).
3. На потенциометре ручкой  $HЭ$  выставить значение, соответствующее значению э.д.с. нормального элемента при данной температуре в комнате.
4. Переключатель рода работ поставить в положение  $HЭ$ .
5. Произвести настройку тока (поставить в положение “нуль” стрелку гальванометра) сначала ручками “Грубо”, а затем “Тонко”. Ток настраивать сначала при выключенных кнопках “430кΩ” и “0”. Затем последовательно включая кнопки “430кΩ” и “0”, т.е. последовательно увеличивая чувствительность гальванометра.
6. Поставить переключатель рода работ в положении  $X_1$  или  $X_2$  (в зависимости от того, к каким клеммам подключена измеряемая величина) и ручками декад переключателей  $I-VI$  произвести компенсацию измеряемой величины при последовательном увеличении чувствительности гальванометра.

Значение измеряемой величины отсчитывать по цифрам в окошечках верхней платы.

Рабочий ток периодически проверять и, в случае необходимости подстраивать.

### 3. Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Ознакомиться с описанием и собрать электрическую схему установки.

**Задание 2.** Снять зависимость  $\sigma = f(T)$  и построить график.

Для этого необходимо подготовить к работе потенциометр Р-307. Затем включают источник Б5-50 и устанавливают ток через образец в пределах  $0,5 - 1,5 \text{ mA}$ . С помощью потенциометра измеряют падение напряжения между зондами при комнатной температуре. Включают сушильный шкаф и нагревают образец на  $10$  градусов. При этом ток через образец поддерживают постоянным, уменьшая напряжение на выходе выпрямителя. Снова измеряют падение напряжения между зондами. И так далее через каждые  $10$  градусов до  $140$  градусов  $C$ . Результаты занести в таблицу, которая будет общей для заданий № 2 и № 3. Измерения следует производить возможно более быстро, так как температура образца постоянно повышается. Работать удобно вдвоем. Один экспериментатор поддерживает постоянным ток через образец и следит за температурой образца, а второй работает с потенциометром и записывает результаты.

По данным эксперимента строится график зависимости  $\sigma = f(T)$ .

### Таблица результатов

$$t_{\text{комн}}^{\circ} = \dots \quad \ell = 26 \text{ мм} \quad S = 4 \times 6 \text{ мм}^2 \quad I = \dots$$

$n$	$t$	$T = t + t_{\text{комн}} + 273$	$\frac{1}{T}$	$U_x$	$\sigma = \frac{I}{U_x} \cdot \frac{\ell}{S}$	$\ln \sigma$
<b>1</b>						
<b>2</b>						
<b>3</b>						
<b>⋮</b>						

**Задание 3.** Построить график зависимости  $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  и по наклону его прямолинейной части определить ширину запрещенной зоны полупроводника.

График зависимости можно строить в полуграфическом масштабе, тогда не нужно вычислять  $\ln \sigma$ . Тангенс угла наклона прямолиней-

#### 4. Э.Д.С. нормального элемента Вестона

---

ной части графика

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E}{2k} \Rightarrow \Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha .$$

#### 4. Э.Д.С. нормального элемента Вестона при различных температурах

$t^{\circ}C$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Э.Д.С.(В)	1,01893	1,01894	1,01888	1,01876	1,01853	1,01837	1,01811	1,01781	1,01746

#### 5. Контрольные вопросы

1. Как образуются энергетические зоны при объединении атомов в кристалл?
2. Чем отличаются энергетические зоны в кристаллах диэлектрика, металла и полупроводника?
3. Собственная и примесная проводимость полупроводников с точки зрения зонной теории?
4. От чего зависит электропроводность полупроводника?
5. Как зависит электропроводность полупроводников от температуры?
6. От чего зависит точность получения результата?