

*Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования*

**«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

Лабораторная работа №11.3.

по курсу общей физики
на тему:

***«Измерение контактной разности
потенциалов в полупроводниках»***

*Работу выполнил:
Баринев Леонид
(группа Б02-827)*

Долгопрудный
2021

1. Аннотация

В работе будет определена контактная разность потенциалов $(p-n)$ -перехода в полупроводниковом диоде по результатам измерений температурной зависимости его сопротивления.

2. Теоретические сведения

Приведем полупроводники p - и n - типа в соприкосновение, вызвав рекомбинацию электронов и дырок. При этом у границы перехода в n -области ионы донорной примеси образуют положительный пространственный заряд, а у границы перехода в p -области ионы акцепторной примеси — отрицательный. Таким образом в области $(p-n)$ -перехода возникает обедненный носителями тока слой и соответствующая **контактная разность потенциалов** — барьер, препятствующий диффузии основных носителей. Равновесие возникает при совпадении уровней Ферми в p - и n -областях. Энергетическая схема перехода изображена на рисунке 1.

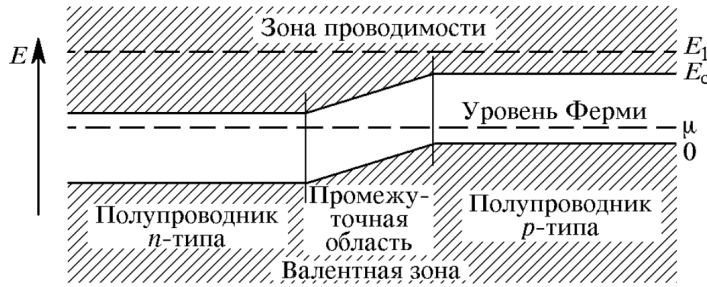


Рис. 1. Энергетическая схема $(p-n)$ -перехода, находящегося в равновесии

На рисунке 1 E_c обозначена энергия, соответствующая дну зоны проводимости, μ — уровень Ферми. В этих обозначениях при обычных температурах концентрация электронов n_n в зоне проводимости и концентрация дырок n_p в валентной зоне равны соответственно:

$$n_n(n\text{-область}) = Q_n \exp\left(-\frac{E_c - \mu}{kT}\right)$$

$$n_p(p\text{-область}) = Q_p \exp\left(-\frac{\mu}{kT}\right)$$

Из-за наличия контактной разности потенциалов ΔV между концентрациями основных и неосновных носителей тока в области устанавливается следующее соотношение:

$$\frac{n_n(n\text{-область})}{n_n(p\text{-область})} = \frac{n_p(p\text{-область})}{n_p(n\text{-область})} = \exp\left(\frac{e\Delta V}{kT}\right)$$

Здесь индекс по-прежнему указывает на тип носителя, а в скобках стоит рассматриваемая область полупроводника.

Проходящий через переход ток I_0 пропорционален концентрации неосновного заряда в области:

$$I_0 \propto n_n(p\text{-область}) = n_n(n\text{-область}) \cdot \exp\left(-\frac{e\Delta V}{kT}\right)$$

Приложим теперь к $(p-n)$ -переходу напряжение $V_{\text{ист}}$ от внешнего источника, чтобы p -область заряжалась положительно относительно n -области (см. рисунок 2.а). Потенциальный барьер снижается в $\exp\left(\frac{eV_{\text{ист}}}{kT}\right)$ раз, и ток, протекающий через переход слева направо, увеличивается в соответствующее количество раз. Ток справа налево остается неизменным и равен I_0 . Тогда полный ток I через барьер равен разности токов, текущих направо и налево:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV_{\text{ист}}}{kT}\right) - 1 \right)$$

Аналогичное равенство справедливо и для тока, переносимого дырками.

При приложении обратного напряжения (см. рисунок 2.б)) полный ток также описывается формулой, данной выше.

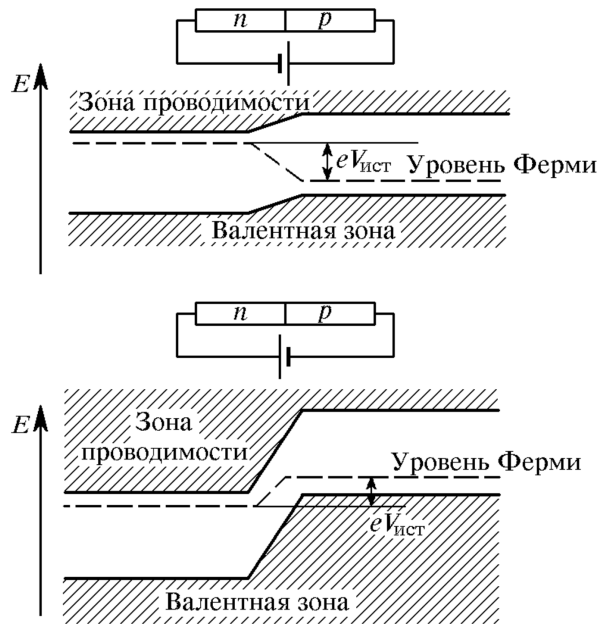


Рис. 2. Схема $(p-n)$ -перехода под внешним напряжением с положительным (а) и отрицательным (б) смещениями области перехода

Таким образом, при приложенном внешнем напряжении $V_{\text{ист}}$ суммарный ток электронов и дырок равен:

$$\begin{aligned}
I &= (I_{0,n} + I_{0,p}) \left(\exp \left(\frac{eV_{\text{ист}}}{kT} \right) - 1 \right) = \\
&= A(n_n(n\text{-область}) + n_p(p\text{-область})) \cdot \exp \left(-\frac{e\Delta V}{kT} \right) \left(\exp \left(\frac{eV_{\text{ист}}}{kT} \right) - 1 \right) = \\
&= C \exp \left(-\frac{e\Delta V}{kT} \right) \left(\exp \left(\frac{eV_{\text{ист}}}{kT} \right) - 1 \right) \quad (1)
\end{aligned}$$

В последнем равенстве учтено, что концентрации электронов и дырок определяются концентрацией примесей и мало зависят от температуры.

При комнатных температурах справедливо приближение: $eV_{\text{ист}} \ll kT$. Тогда для полного тока через переход верно:

$$I = C \exp \left(-\frac{e\Delta V}{kT} \right) \cdot \frac{eV_{\text{ист}}}{kT}$$

Из полученного выражение для тока I найдем сопротивление R ($p-n$)-перехода:

$$R = \frac{V_{\text{ист}}}{I} = \frac{1}{C} \cdot \frac{kT}{e} \exp \left(\frac{e\Delta V}{kT} \right) \propto \exp \left(\frac{e\Delta V}{kT} \right)$$

При написании последнего равенства мы пренебрегли слабой зависимостью от температуры предэкспоненциального члена, которая мало заметна на фоне быстрой экспоненциальной зависимости.

Логарифмируя и дифференцируя последнее выражение, получим искомую формулу для нахождения контактной разности потенциалов:

$$\Delta V = \frac{k}{e} \cdot \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} \quad (2)$$

3. Оборудование

Схема установки для измерения температурной зависимости контактной разности потенциалов $\Delta V(T)$ показана на рисунке 3. Она состоит из мостиковой схемы и термостата. Источником питания схемы служит генератор прямоугольных импульсов, а сигнал с балансируемого моста подается на независимые каналы осциллографа.

На схеме на рисунке 3 указаны также номиналы используемых резисторов. Сопротивление диода R выражается через сопротивление магазина R_M и сопротивления $R_1 = 910 \text{ Ом}$, $R_2 = 9.1 \text{ кОм}$:

$$R = \frac{R_2}{R_1} R_M = 10 \cdot R_M$$

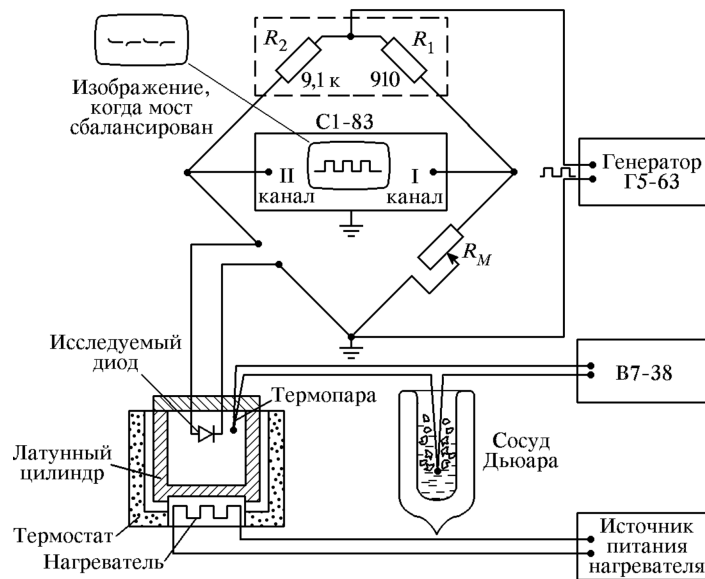


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения контактной разности потенциалов $(p - n)$ -перехода

4. Результаты измерений и обработка результатов

Измерения проводятся в интервале температур от комнатной до $\approx 80^\circ\text{C}$. Температура образца измеряется медно-константановой термопарой, постоянная которой равна $\alpha = 41 \text{ мкВ/К}$.

Снимем зависимость сопротивления магазина R_M при сбалансированном мосте от напряжения на термопаре U . По R_M пересчитаем сопротивление диода $R = 10R_M$. Зная константу термопары α , получим температуру образца T для соответствующего измерения напряжения:

$$T = T_0 + \frac{U}{\alpha}$$

Измерения и последующие вычисления содержатся в таблице 1.

4 Результаты измерений и обработка результатов

№	U , мкВ	R , Ом	ΔR , Ом	T , К	$1/T$, К ⁻¹	$\Delta 1/T$, К ⁻¹	$\ln R$	$\Delta \ln R$
1	80	230	5	300,95	3,323	0,83	5,44	0,02
2	180	180	5	303,39	3,296	0,37	5,19	0,03
3	270	160	5	305,59	3,272	0,24	5,08	0,03
4	390	123	4	308,51	3,241	0,17	4,81	0,03
5	500	93	3	311,20	3,213	0,13	4,53	0,03
6	620	80	3	314,12	3,183	0,10	4,38	0,04
7	700	70	4	316,07	3,164	0,09	4,25	0,06
8	800	63	3	318,51	3,140	0,08	4,14	0,05
9	900	55	4	320,95	3,116	0,07	4,01	0,07
10	1010	49	3	323,63	3,090	0,06	3,89	0,06
11	1140	37	2	326,80	3,060	0,05	3,61	0,05
12	1290	42	2	330,46	3,026	0,05	3,74	0,05
13	1440	27	2	334,12	2,993	0,04	3,30	0,07
14	1590	19	2	337,78	2,961	0,04	2,94	0,11
15	1730	16	2	341,20	2,931	0,03	2,77	0,13

Таблица 1. Результаты измерений

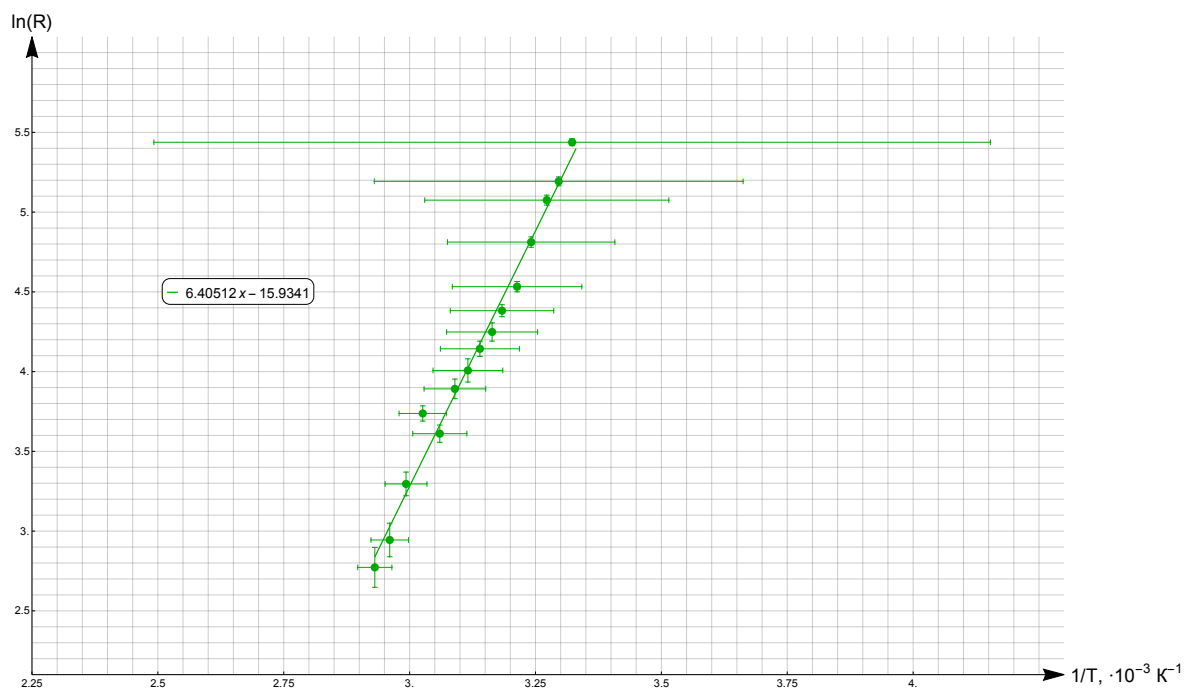


Рис. 4. График зависимости $\ln R$ от $1/T$

Коэффициент наклона, полученные из аппроксимации:

$$k = (6,4 \pm 1,6) \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$$

Находим искомую контактную разность потенциалов $(p - n)$ -перехода полупроводникового диода:

$$\Delta V = \frac{k_B}{e} \cdot k \approx (0,55 \pm 0,14) \text{ В}$$

5. Обсуждение результатов и выводы

Контактная разность потенциалов $(p - n)$ -перехода в полупроводниковом диоде:

$$\Delta V = (0,55 \pm 0,14) \text{ В}$$

Большая погрешность обусловлена трудностью визуального определения показаний осциллографа.