

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа №6.11.3
(Общая физика: квантовая физика)

Измерение контактной разности потенциалов в полупроводниках

Работу выполнил:
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный
2019 год

Цель работы: определить контактную разность потенциалов $(p-n)$ -перехода в полупроводниковом диоде по результатам измерений температурной зависимости его сопротивления.

1. Теоретическое введение

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.

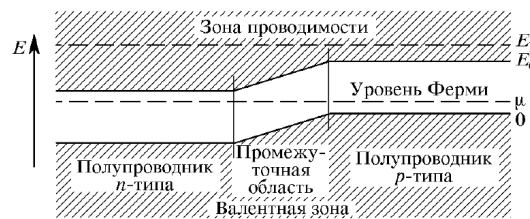


Рис. 1: Энергетическая схема $(p-n)$ -перехода, находящегося в равновесии

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:

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

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:

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

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 $\exp\left\{\left(\frac{eV_{\text{ист}}}{kT}\right)\right\}$ 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.

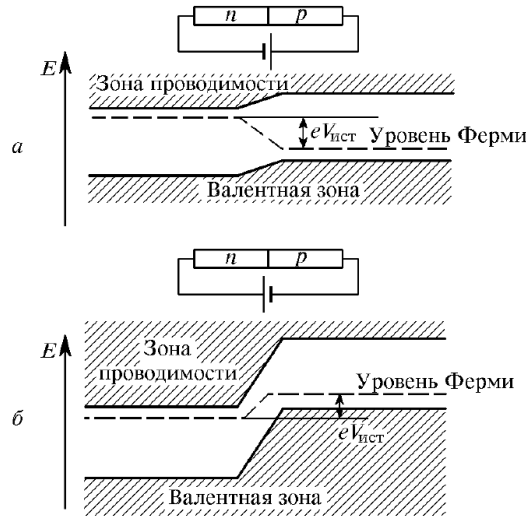


Рис. 2: Схема $(p - n)$ -перехода под внешним напряжением с положительным (а) и отрицательным (б) смещениями области перехода

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

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

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:

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

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

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

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:

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

2. Экспериментальная установка

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.

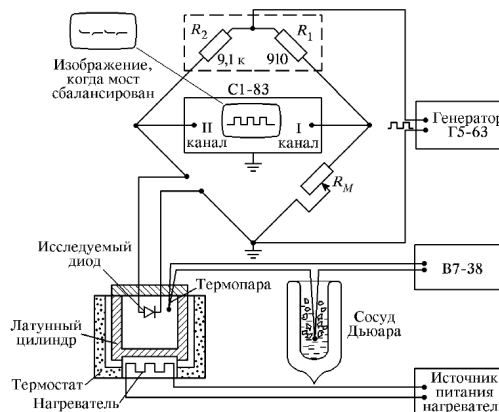


Рис. 3: Экспериментальная установка для определения контактной разности потенциалов ($p-n$)-перехода

На схеме на рисунке 3 указаны также номиналы используемых резисторов. Сопротивление диода R выражается через сопротивление магазина R_M и сопротивления $R_1 = 910 \text{ Ом}$, $R_2 = 9,1 \text{ кОм}$:

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

3. Выполнение работы

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

До включения цепи температура образца совала с комнатной ($T_0 = 298 \text{ K}$), сопротивление на концах термопары при этой было равно $\Delta U_0 = 0,06 \text{ мВ}$.

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

$$T = T_0 + \frac{\Delta U - \Delta U_0}{\alpha}$$

Измерения и последующие вычисления содержатся в таблице 1. Погрешность показаний вольтметра примем равной $0,01 \text{ мВ}$; относительная погрешность сопротивления магазина, в соответствии с указанием на приборе, составит 5% . Первое измерение сделано при выключенной печи.

Таблица 1: Результаты измерений

№	ΔU , мВ	R_M , Ом	T , К	$\frac{1}{T}$, 10^{-3} K^{-1}	$\sigma_{\frac{1}{T}}$, 10^{-3} K^{-1}	R , кОм	σ_R , кОм	$\ln\left(\frac{R}{R_m}\right)$
1	0.06	331	298	3.356	0.017	3.31	0.17	3.72
2	0.265	213	303	3.3	0.016	2.13	0.11	3.28
3	0.47	135	308	3.247	0.016	1.35	0.07	2.83
4	0.675	91	313	3.195	0.015	0.91	0.05	2.43
5	0.88	64	318	3.145	0.015	0.64	0.03	2.08
6	1.085	48	323	3.096	0.014	0.48	0.02	1.79
7	1.29	35	328	3.049	0.014	0.35	0.02	1.48
8	1.495	28	333	3.003	0.014	0.28	0.01	1.25
9	1.7	21	338	2.959	0.013	0.21	0.01	0.97
10	1.905	16	343	2.915	0.013	0.16	0.01	0.69
11	2.11	13	348	2.874	0.012	0.13	0.01	0.49
12	2.315	11	353	2.833	0.012	0.11	0.01	0.32
13	2.52	8	358	2.793	0.012	0.08	0	0

Погрешность температуры T будем считать равной $1,5 \text{ K}$ для всех измерений, погрешность величины $\sigma_{\ln\left(\frac{R}{R_m}\right)} \approx 0,07$ для всех измерений. Построим график зависимости $\ln\left(\frac{R}{R_m}\right)$ от обратной температуры $\frac{1}{T}$.

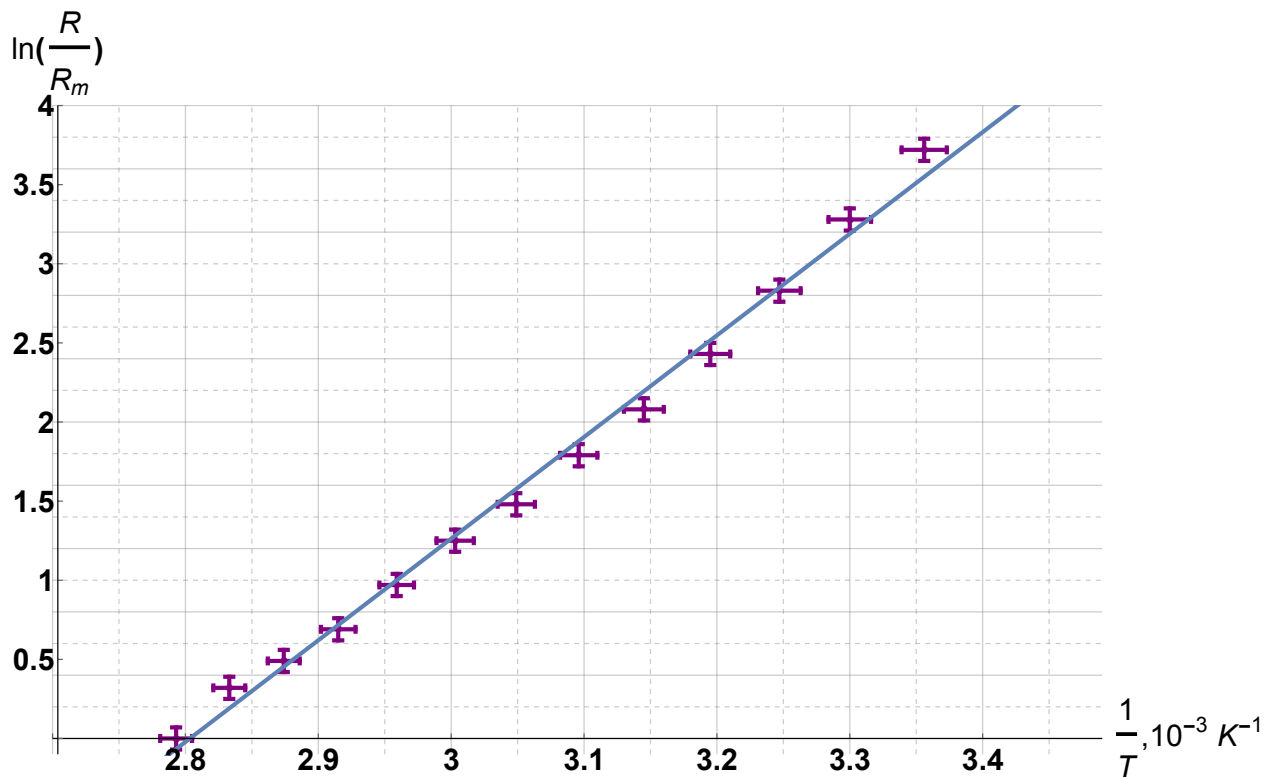


Рис. 4: График зависимости $\ln\left(\frac{R}{R_m}\right)$ от $\frac{1}{T}$

Таблица 2: Фит рис. 4 функцией $y = ax + b$

	Estimate	Standard Error
b	-18.004	0.464
a	6.42	0.15

Получив из параметров фита коэффициент наклона фита $a' = 10^3 \cdot a \text{ K} \approx (6,42 \pm 0,15) \cdot 10^3 \text{ K}$, из формулы (1) находим искомую контактную разность потенциалов ($p - n$)-перехода полупроводникового диода:

$$\Delta V = \frac{k}{e} \cdot a' \approx 0,554 \pm 0,013 \text{ В}$$

4. Вывод

Таким образом, в этой работе мы измерили температурную зависимость сопротивления полупроводникового диода. Она оказалась совпадающей с теорией. По этой зависимости определена контактная разность потенциалов ($p - n$)-перехода.