

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

**Измерение контактной разности потенциалов  
в полупроводниках**

выполнила студентка 653 группы ФФКЭ

Карпова Татьяна

Долгопрудный, 2019 г.

## 1 Цель работы

Определение контактной разности потенциалов ( $p$ - $n$ )-перехода в полупроводниковом диоде по результатам измерений температурной зависимости его сопротивления

## 2 Физическая суть явления

В работе исследуется явление контактной разности потенциалов, возникающее на контакте электронного и дырочного полупроводников. Для создания такого контакта в полупроводник вводятся как донорная, так и акцепторная примеси. В одной части образец содержит доноры (обладает электронной электропроводностью), а в другой части - акцепторы (обладает дырочной электропроводностью), соответственно, в некоторой области кристалла происходит смена характера электропроводности, или так называемый ( $p$ - $n$ )-переход.

При приведении полупроводников  $n$ - и  $p$ - типа в соприкосновение друг с другом сначала вблизи границы перехода будет существовать большой градиент концентрации электронов и дырок, в результате чего начнётся диффузия электронов из  $n$ -области в  $p$ -область и дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. Возникновение диффузионных потоков приведёт к разделению зарядов и появлению положительного объёмного заряда в  $n$ -области (положительные ионы донорной примеси) и отрицательного объёмного заряда в  $p$ -области (отрицательные ионы акцепторной примеси), и в области ( $p$ - $n$ )-перехода образуется слой, обеднённый носителями тока. Эти объёмные заряды в области контакта создадут сильное электрическое поле, направленное от  $n$ -области к  $p$ -области и препятствующее движению электронов и дырок - возникнет *контактная разность потенциалов*. В результате установится равновесное состояние, уровень Ферми для всего полупроводника будет постоянным, а в области перехода, где имеется электрическое поле, зоны энергии будут искривлены (см. рис. 1)

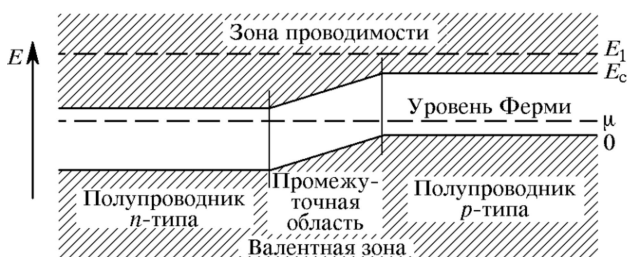


Рис. 1: Энергетическая схема ( $p$ - $n$ )-перехода, находящегося в равновесии

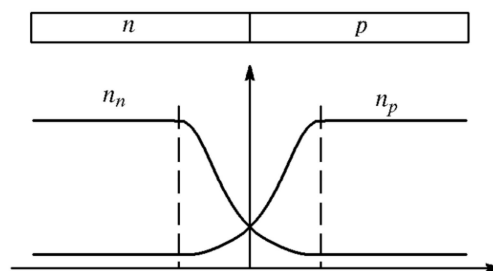


Рис. 2: Концентрация электронов и дырок в области ( $p$ - $n$ )-перехода

В области ( $p$ - $n$ )-перехода уровень Ферми проходит вдалеке как от валентной зоны, так и от зоны проводимости, поэтому эта область бедна как электронами, так и дырками и обладает большим электрическим сопротивлением (см. рис. 2). Переход неосновных носителей заряда через потенциальный барьер совершается под действием электрического поля ( $p$ - $n$ )-перехода. В состоянии термодинамического равновесия плотность диффузионного потока основных носителей заряда уравновешена плотностью дрейфового тока неосновных носителей заряда и суммарный ток через ( $p$ - $n$ )-переход равен нулю.

К ( $p$ - $n$ )-переходу может быть также приложена разность потенциалов такая, что  $p$ -область заряжается положительно относительно  $n$ -области (прямое, или положительное, смещение) или отрицательно (обратное, или отрицательное, смещение) (см. рис. 3 а и б). Основное падение напряжения приходится на область ( $p$ - $n$ )-перехода (он обладает большим сопротивлением).

В первом случае (положительное смещение) высота потенциального барьера понижается по сравнению с равновесным состоянием, это приводит к увеличению потока основных носителей заряда по сравнению с равновесным состоянием, в то время как поток неосновных носителей заряда через переход остаётся практически неизменным, в результате этого во внешней цепи будет протекать прямой ток. Аналогичные рассуждения можно отнести и к дыркам. Таким образом, увеличение положительного смещения приводит к сильному росту тока через контакт в прямом направлении.

Если к ( $p$ - $n$ )-переходу приложено отрицательное смещение, потенциальный барьер понижается. Чем сильнее смещён переход в обратном направлении, тем меньшее количество основных носителей заряда способно преодолеть возросший потенциальный барьер. Ток основных носителей заряда уменьшается, ток неосновных носителей заряда остаётся постоянным. Поэтому суммарный ток через ( $p$ - $n$ )-переход будет направлен от  $n$ -области к  $p$ -области и с увеличением обратного напряжения будет сначала незначительно расти, а затем стремиться к некоторой величине, называемой током насыщения.

Таким образом,  $(p-n)$ -переход имеет нелинейную ВАХ (см. рис. 4) и может использоваться для выпрямления тока.

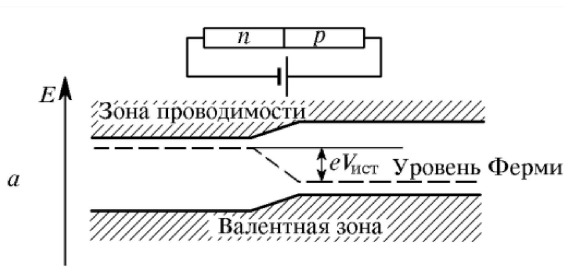


Рис. 3: Схема  $(p-n)$ -перехода под напряжением: положительное смещение

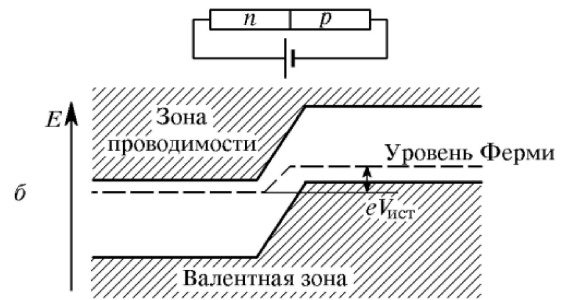


Рис. 4: Схема  $(p-n)$ -перехода под напряжением: отрицательное смещение



Рис. 5: Вольт-амперная характеристика  $(p-n)$ -перехода

### 3 Теоретические положения

Оценим разность потенциалов, возникающую в области  $(p-n)$ -перехода. При равной концентрации акцепторов и доноров смещение уровня Ферми вверх в  $n$ -области равно смещению этого уровня вниз в  $p$ -области. Тогда разность потенциалов в области перехода равна

$$e\Delta V = 2(\mu - \frac{1}{2}E_c), \quad (1)$$

где  $\mu$  - положение уровня Ферми,  $\frac{1}{2}E_c$  определяет несмещённое положение уровня Ферми. Плотности электронов и дырок в зоне проводимости будут равны соответственно

$$n_n = Q_n \exp(-\frac{E_c - \mu}{k_B T}) \quad (2)$$

(определяется плотностью электронов с донорных уровней), и

$$n_p = Q_p \exp(-\frac{\mu}{k_B T}) \quad (3)$$

(определяется плотностью электронов, перешедших под действием теплового возбуждения из валентной зоны в зону проводимости). Тогда

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp(\frac{2\mu - E_c}{k_B T}) = \exp(\frac{e\Delta V}{k_B T}), \quad (4)$$

искомая разность потенциалов равна

$$\Delta V = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (5)$$

Из-за наличия потенциального барьера между концентрациями основных и неосновных носителей заряда в  $n$ - и  $p$ -областях устанавливается следующее соотношение:

$$\frac{n_n(n)}{n_n(p)} = \frac{n_p(n)}{n_p(p)} = \exp\left(\frac{e\Delta V}{k_B T}\right) \quad (6)$$

В условиях равновесия токи равновесных и неравновесных зарядов равны друг другу:

$$I_0 \propto n_n(p) = n_n(n) \exp\left(-\frac{e\Delta V}{k_B T}\right) \quad (7)$$

При уменьшении потенциального барьера ток неосновных носителей заряда не меняется, а ток основных носителей заряда увеличивается в  $\exp\left(\frac{e\Delta V}{k_B T}\right)$  раз. Полный ток равен разности этих токов, т.е.

$$I(V_s) = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV_s}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Формула правильно описывает полный ток (переносимый при равновесии как электронами, так и дырками), проходящий через  $(p-n)$ -переход. С увеличением  $V_s$  ток быстро возрастает.

С учётом формул (7) и (8):

$$I(V_s) = A \exp\left(-\frac{eV_s}{k_B T}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV_s}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

(сумма концентраций акцепторных и донорных примесей слабо зависит от температуры и принимается за постоянную). При комнатных температурах  $\frac{eV_s}{k_B T} \ll 1$ , поэтому

$$I = A \exp\left(-\frac{e\Delta V}{k_B T}\right) \frac{eV_s}{k_B T} \quad (10)$$

Учитывая, что при небольших (порядка нескольких мВ)  $V_s$  ток прямо пропорционален напряжению, определяем сопротивление перехода:

$$R = \frac{V_s}{I} = \frac{k_B T}{e} \frac{1}{A} \exp\left(\frac{e\Delta V}{k_B T}\right). \quad (11)$$

Исследуя зависимость сопротивления перехода от температуры, найдём контактную разность потенциалов:

$$\Delta V = \frac{k_B}{e} \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} \quad (12)$$

## 4 Экспериментальная установка

Схема установки, используемой для измерения температурной зависимости контактной разности потенциалов, изображена на рис. 6. Установка состоит из мостиковой схемы и термостата. Источником питания мостиковой схемы служат генератор прямоугольных импульсов. В качестве нулевого индикатора используется осциллограф. В плечи моста включены сопротивления  $R_1 = 910$  Ом и  $R_2 = 9100$  Ом, магазин сопротивлений  $R_M$  и полупроводниковый диод (германиевый или кремниевый), сопротивление  $R_d$  которого подлежит измерению.

Сигнал с диагонали балансируемого моста подается на независимые усилители осциллографа: Канал I и Канал II. Разность этих сигналов видна на экране осциллографа. Осциллограф, генератор и одна из точек противоположной диагонали моста имеют общую Землю. Поэтому при сбалансированном (с помощью магазина  $R_M$ ) мосте сигнал на экране осциллографа изображается в виде прямой линии (разность сигналов каналов I и II равна 0), и сопротивление  $R_d$  диода находится по формуле

$$R_d = (R_2/R_1)R_M = 10R_M. \quad (13)$$

Измерения проводятся примерно через  $5^\circ\text{C}$  в интервале температур примерно от  $25$  до  $80^\circ\text{C}$ . Для нагревания образца используется электронагреватель. Температура образца измеряется медно-константановой термопарой, один из спаев которой находится в тепловом контакте с диодом, а другой помещён в сосуд Дьюара, наполненный водой комнатной температуры.

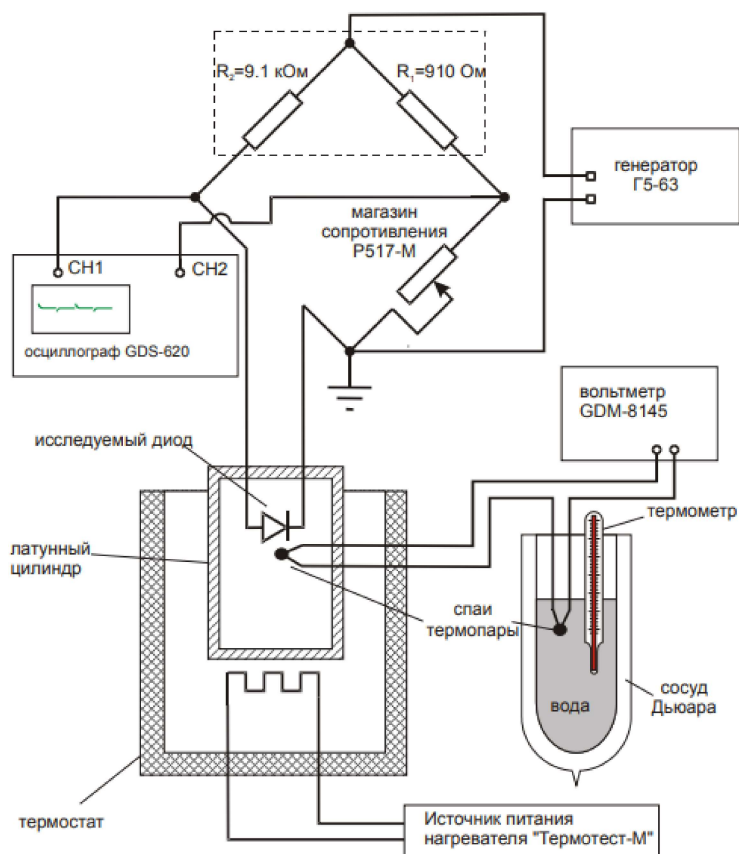


Рис. 6: Схема экспериментальной установки

## 5 Ход работы

1. Включим в сеть генератор, осциллограф, вольтметр (амплитуда сигнала генератора 10В с ослаблением в 2000 раз, период повторения 1000 мкс, длительность 600 мкс, временной сдвиг 25 мкс). Установим на осциллографе максимальную чувствительность (0,1 мВ/дел), подберём подходящую развертку.
2. Измерим температурную зависимость  $(p-n)$ -перехода. Для этого будем снимать зависимость разности потенциалов на термопаре (начальное значение -0.16 мВ, далее прибавляем ко всем значениям напряжения эту величину) от сопротивления диода (оно в 10 раз больше сопротивления магазина). Результаты занесём в таблицу 1. Значения температуры определим, зная постоянную термопары (0,041 мВ/°C), переведем их далее в К.
3. Построим график зависимости величины  $\ln R_d$  от обратной температуры (рис. 7). Определив угол наклона графика ( $\frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} = 6656$ ), оценим контактную разность потенциалов на границе  $(p-n)$ -перехода полупроводникового диода по формуле (12):

$$\Delta V = \frac{k_B}{e} \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} = 0.574 \text{ мВ} \quad (14)$$

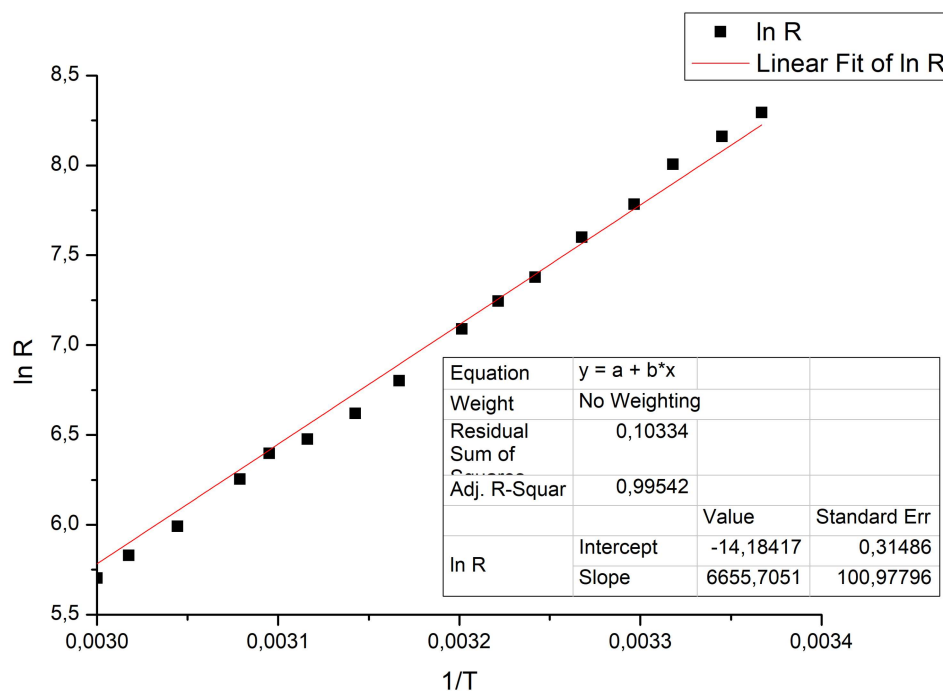
4. Различные оценки показывают, что для кремниевого диода  $\Delta V = 0.35$  мВ, для германиевого диода от 0.2 мВ при небольшой концентрации носителей заряда до 0.5 мВ при большой концентрации носителей заряда. Полученное нами экспериментально значение  $\Delta V = 0.574$  мВ совпадает по порядку величины с этими значениями.

Таблица 1: Температурная зависимость сопротивления полупроводникового диода

V, мВ	0	0,08	0,18	0,26	0,37	0,47	0,55	0,63	0,77	0,87	0,98
$\Delta T$ , К	0	1,95	4,39	6,34	9,02	11,46	13,41	15,37	18,78	21,22	23,90
T, К	297	298,95	301,39	303,34	306,02	308,46	310,41	312,37	315,78	318,22	320,90
$R_d$ , $\Omega$	4000	3500	3000	2400	2000	1600	1400	1200	900	750	650
$\ln R$	8,29	8,16	8,01	7,78	7,60	7,38	7,24	7,09	6,80	6,62	6,48
$1/T$ , $10^{-3} \text{ K}^{-1}$	3,37	3,35	3,32	3,30	3,27	3,24	3,22	3,20	3,17	3,14	3,12
V, мВ	1,07	1,14	1,29	1,41	1,49	1,67	1,89	1,97	2,16	2,26	
$\Delta T$ , К	26,10	27,80	31,46	34,39	36,34	40,73	46,10	48,05	52,68	55,12	
T, К	323,10	324,80	328,46	331,39	333,34	337,73	343,10	345,05	349,68	352,12	
$R_d$ , $\Omega$	600	520	400	340	300	250	200	180	140	120	
$\ln R$	6,40	6,25	5,99	5,83	5,70	5,52	5,30	5,19	4,94	4,79	
$1/T$ , $10^{-3} \text{ K}^{-1}$	3,10	3,08	3,04	3,02	3,00	2,96	2,91	2,90	2,86	2,84	

## 6 Вывод

В ходе работы была экспериментально определена величина контактной разности потенциалов в полупроводниковом диоде путём определения зависимости сопротивления ( $p$ - $n$ )-перехода от температуры. Полученное значение оказалось равным  $\Delta V = 0.57$  мВ, что по порядку величины совпадает с различными оценками для контактной разности потенциалов в кремнии и германии.

Рис. 7: Зависимость  $\ln R_d$  от  $1/T$