

# **ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ**

## **Лабораторная работа 2.02Д**

### **ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА**

*И.Д. Веневцев, В.В. Романов*

## Работа 2.02Д

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

*И.Д. Веневцев, В.В. Романов*

### Цель работы

Определение температурного коэффициента сопротивления металла и ширины запрещенной зоны полупроводника.

### Задачи

1. Измерить температурные зависимости электрического сопротивления металлического и полупроводникового образцов в диапазоне температур от  $-10$  до  $75^{\circ}\text{C}$ .
2. По результатам п. 1 вычислить температурный коэффициент сопротивления металла и ширину запрещенной зоны полупроводника.

### Введение

Электрический ток есть упорядоченное движение заряженных частиц – коллективизированных носителей заряда. В отсутствие внешнего электрического поля носители совершают хаотическое тепловое движение, которое характеризуется средним модулем скорости  $v$ , имеющим при комнатных температурах значение порядка  $10^5$  м/с. При этом среднее значение вектора скорости равно нулю. Электрическое поле действует на носитель заряда силой:

$$F = q \cdot E, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд носителя,  $E$  – напряженность электрического поля. Таким способом внешнее поле создает упорядоченное движение носителей заряда (дрейф) – электрический ток с плотностью тока  $J$ :

$$J = q \cdot n \cdot v. \quad (2)$$

Здесь  $n$  – концентрация носителей заряда,  $v$  – дрейфовая скорость носителей. Если ток создается одним типом носителей (например, электронами), выражение (2) полностью описывает плотность тока в исследуемом образце, если концентрация носителей однородна и, соответственно, нет диффузионного тока.

В конденсированных средах при протекании электрического тока носители заряда сталкиваются между собой и рассеиваются на узлах кристаллической решетки. Это приводит к важным последствиям: во-первых, дрейфовая скорость носителей много меньше средней скорости их теплового

движения ( $u \ll v$ ) и, во-вторых, пропорциональна силе  $F$  и напряженности электрического поля (1):

$$\mathbf{u} = \mu \cdot \mathbf{E}. \quad (3)$$

Коэффициент  $\mu$  называют *подвижностью носителей заряда*. Из (2) и (3) следует:

$$\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – это *удельная проводимость*. Обратную величину  $\rho=1/\sigma$  называют *удельным сопротивлением* материала. Выражение (4) представляет собой дифференциальную (или лучше локальную) векторную форму закона Ома.

Зависимости проводимости от температуры принципиально различны для металлов и полупроводников. При температурах, не слишком далеких от комнатной, удельное сопротивление металлов удовлетворительно описывается простой линейной зависимостью:

$$\rho_m(t) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (6)$$

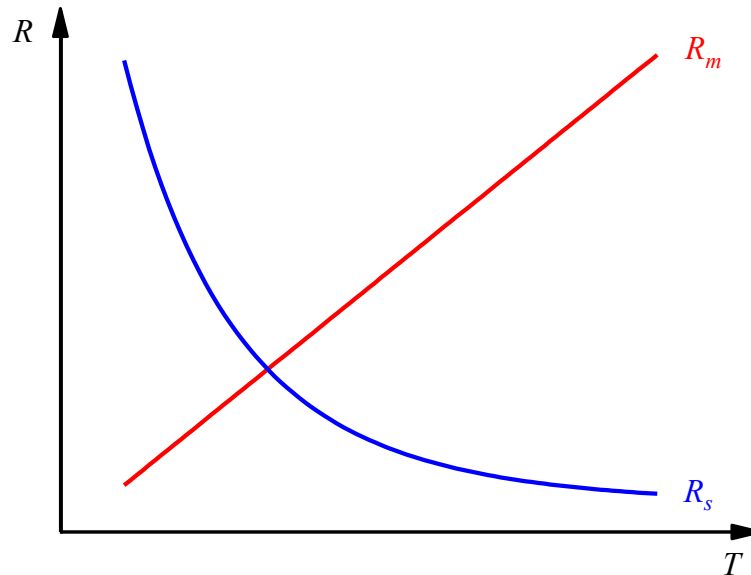
где  $\rho_0$  – удельное сопротивление металла при температуре  $0^\circ\text{C}$ , а  $\alpha$  – *температурный коэффициент сопротивления*. Поскольку сопротивление любого металлического образца пропорционально его удельному сопротивлению, то, пренебрегая температурным расширением, можно записать:

$$R_m(t) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t). \quad (7)$$

Такая зависимость объясняется тем, что в металлах практически все валентные электроны коллективизированы – не связаны с каким-либо конкретным атомом, поэтому нагрев или охлаждение не приводит к заметному изменению концентрации носителей  $n$ . Температурная зависимость проводимости (5) определяется изменением подвижности электронов. Подвижность же тем больше, чем реже происходят столкновения носителей с атомами и дефектами кристаллической решетки. Рост амплитуды тепловых колебаний атомов решетки с температурой увеличивает вероятность рассеяния электронов, приводя к уменьшению их подвижности.

Характерный вид такой зависимости показан на рис. 1 линией  $R_m$ .

В полупроводнике связь валентных электронов с атомами значительно сильнее, а энергетический спектр таков, что для того, чтобы разорвать эту связь и создать электрон проводимости, необходимо сообщить ему дополнительную энергию, превосходящую некоторую величину  $W_g$ .



**Рис. 1.** Качественный вид температурных зависимостей сопротивления металла ( $R_m$ ) и полупроводника ( $R_s$ ).

Такая энергия поставляется тепловыми колебаниями атомов кристаллической решетки. Среднее значение энергии тепловых колебаний  $kT$  ( $k$  – постоянная Больцмана) при комнатной температуре составляет  $\approx 4 \cdot 10^{-21}$  Дж = 25 мэВ. Для более детального рассмотрения необходимо ознакомиться с понятиями зонной теории [2]. Величину  $W_g$  называют *шириной запрещенной зоны полупроводника*. Ширина запрещенной зоны индивидуальна для каждого полупроводникового материала и составляет примерно 1 эВ ( $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж).

В *собственном полупроводнике* (в материале, содержащем пренебрежимо малое количество примесей), каждая генерация электрона проводимости приводит к образованию второго носителя – *дырки* – квазичастицы, возникающей как дефицит электрона в валентной связи. За счет взаимодействия с другими валентными электронами, которые последовательно заполняют эту связь, оставляя за собой другую, разорванную, дырки также могут перемещаться по решетке, в том числе под действием внешнего электрического поля, т.е. являются свободными носителями положительного заряда, равного по модулю заряду электрона ( $+e$ ). Направление дрейфа дырок противоположно направлению дрейфа электронов, при этом за счет противоположного по знаку заряда, направление векторов плотности тока одинаковое (2). Таким образом, в плотность тока в полупроводнике дают вклад оба типа носителей:  $J = J_e + J_h$ . ( $J_e$  – плотность тока электронов,  $J_h$  – плотность тока дырок). Учитывая равенство концентраций электронов и дырок в собственном полупроводнике, можно записать:

$$\sigma_s = e \cdot n \cdot (\mu_e + \mu_h). \quad (8)$$

В полупроводнике температурная зависимость концентрации носителей заряда проявляется значительно сильнее температурной зависимости их подвижности, поэтому последней можно пренебречь.

Процесс генерации носителей сопровождается обратным процессом *рекомбинации* электронов проводимости с дырками. Выравнивание скоростей приводит к состоянию динамического равновесия. Концентрация носителей заряда при этом будет экспоненциальным образом зависеть от температуры:

$$n(T) \sim \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right). \quad (9)$$

Наличие множителя «2» в знаменателе обусловлено генерацией пары носителей в каждом акте. Удельная проводимость полупроводника также зависит от температуры:

$$\sigma(T) = \sigma^* \cdot \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right), \quad (10)$$

а удельное сопротивление (обратная величина):

$$\rho_s(T) = \rho_s^* \cdot \exp\left(\frac{W_g}{2kT}\right) \quad (11)$$

Зависимость сопротивления полупроводникового образца от температуры можно описать следующей формулой:

$$R_s(T) = R_s^* \cdot \exp\left(\frac{W_g}{2kT}\right). \quad (12)$$

Вид этой зависимости показан на рис. 1 кривой  $R_s$ . Для простоты обработки данную зависимость нужно будет логарифмировать и построить в координатах  $\ln(R_s)$  ( $1/T$ ). Тогда она примет линейный вид:

$$\ln(R_s) = \ln(R_s^*) + \frac{W_g}{2kT}. \quad (13)$$

Разница между температурными зависимостями металла и полупроводника очевидна: сопротивление металла по мере повышения температуры растет, а сопротивление полупроводника – падает. Для металла сопротивление линейно зависит от температуры (формула (7), линия  $R_m$  на рис. 1), для полупроводника линейно связаны логарифм сопротивления и величина, обратная температуре (13).

По экспериментальным данным, руководствуясь формулой (7), методами обработки линейных зависимостей легко найти температурный коэффициент сопротивления металла  $\alpha$ :

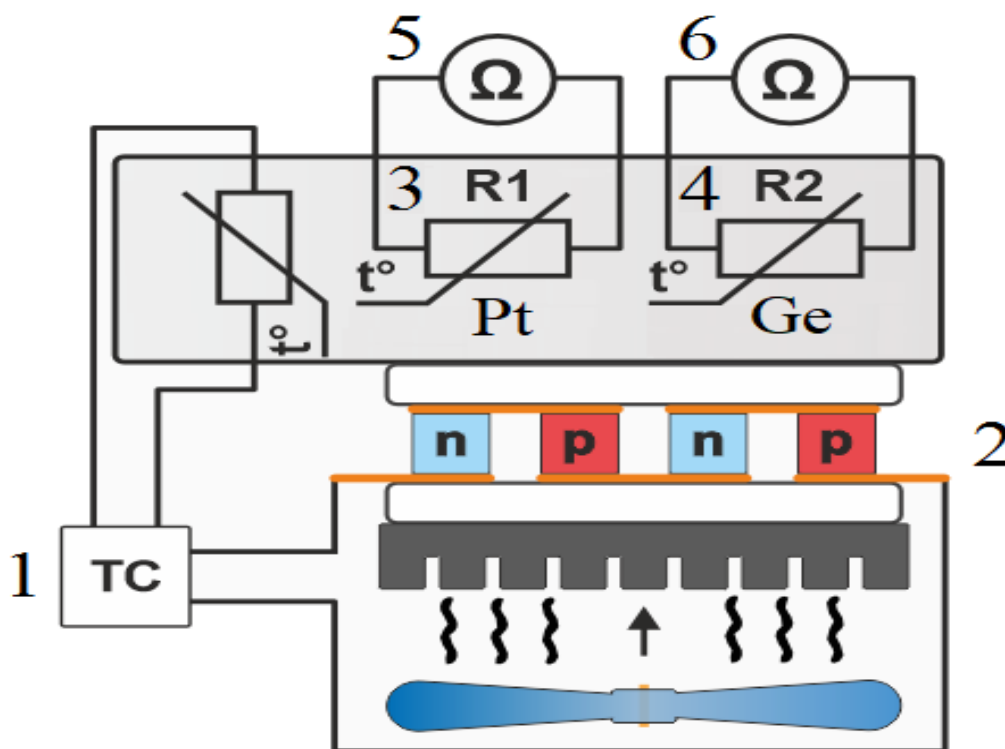
$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\Delta R_m}{\Delta t} \quad (14)$$

при этом  $\Delta R_m / \Delta t$  – это угловой коэффициент зависимости  $R_m(t)$ , а  $R_0$  – точка её пересечения с осью ординат (сопротивление при  $t=0^\circ\text{C}$ ).

Аналогичным образом из результатов измерений на полупроводниковом образце легко вычислить ширину запрещенной зоны  $W_g$ :

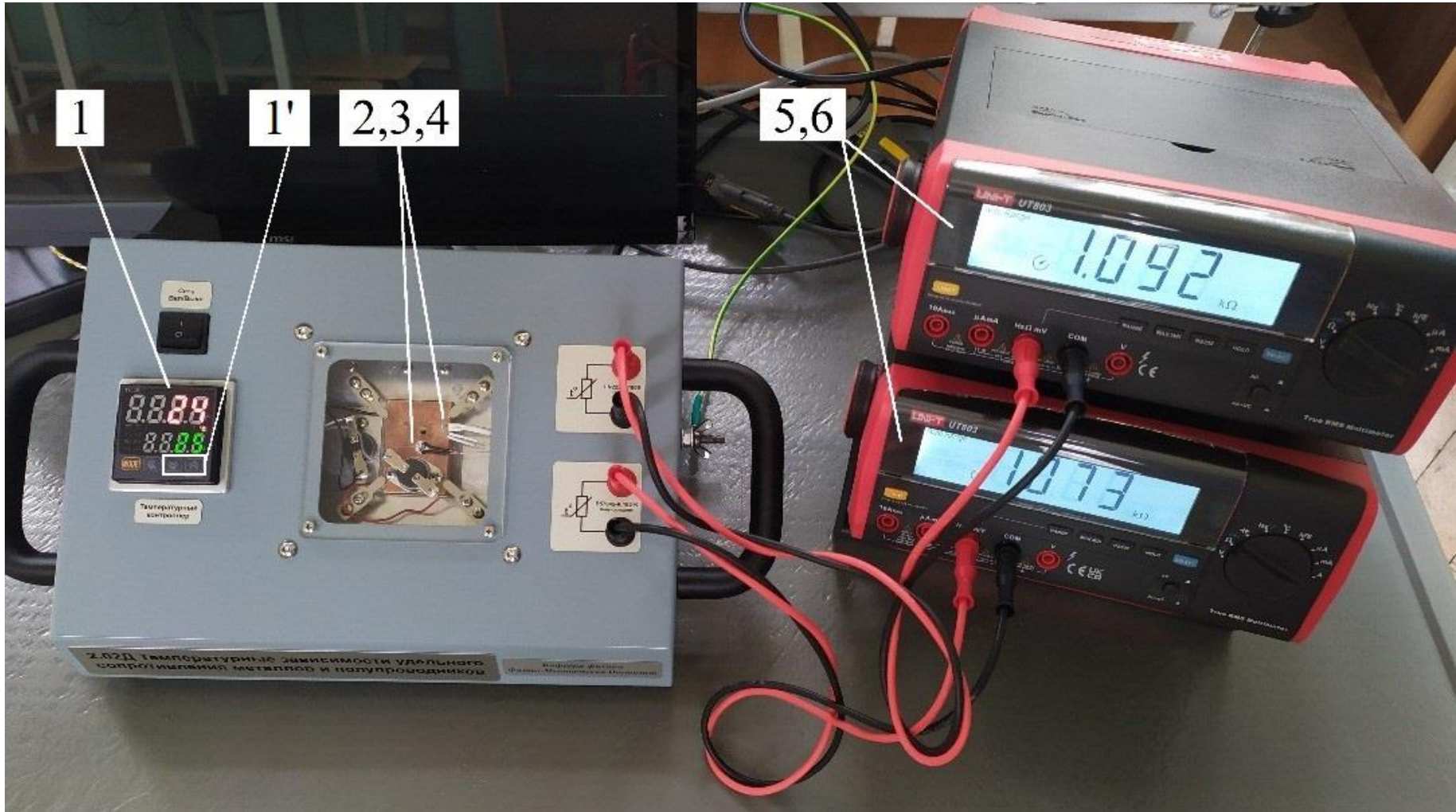
$$W_g = 2k \cdot \frac{\Delta \ln(R_S)}{\Delta(1/T)} \quad (15)$$

### Описание установки



**Рис.2.** Блок-схема экспериментальной установки. 1 – контроллер температуры, 2 – элемент Пельтье, 3 – образец металла, 4 – образец полупроводника, 5,6 – мультиметры в режиме измерения сопротивления

Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 2, а фотография установки на рис. 3. Экспериментальная установка (рис. 2) включает в себя контроллер температуры, который управляет элементом Пельтье, обеспечивая охлаждение или нагрев до заданной температуры медного блока. На медном блоке закреплены образцы – металлический (платиновый) и полупроводниковый (германиевый). Контакты образцов выведены на приборную панель для удобного подключения цифровых мультиметров, напрямую измеряющих сопротивление. Все приборы также подключены к компьютеру.



*Рис. 3. Экспериментальная установка. Нумерация блоков совпадает с рис. 2*

*1 – контроллер температуры (1' - кнопки установки температуры), 2 – элемент Пельтье, 3 – образец металла, 4 – образец полупроводника, 5,6 – мультиметры в режиме измерения сопротивления*

## Порядок проведения работы

1. Включите клавишу «сеть» на блоке розеток и на приборной панели установки. Включите мультиметры. Установка может управляться как непосредственно с приборной панели, так и с ПК. При необходимости включите компьютер и запустите программу управления. Для корректной работы через ПК необходимо, чтобы на мультиметрах были зажаты кнопки «RS232» (на панели приборов будут отображаться соответствующие значки).

2. Проведите измерение температурных зависимостей сопротивления платинового и германиевого образцов. Для этого:

а. Установите необходимую температуру либо непосредственно на температурном контроллере при помощи стрелок «вверх» и «вниз» (элемент 1' на рис. 3), либо в программе на компьютере.

б. Дождитесь стабилизации значений температуры и сопротивлений. При работе через ПК наиболее информативно опираться на выводимую зависимость температуры от времени.

с. Занесите значения температуры, сопротивления металлического и полупроводникового образца в таблицу 1.

д. Повторите пункты 2а-2с для остальных значений температуры. Рекомендуется выбрать температурный диапазон  $-10 - 75^{\circ}\text{C}$ . Шаг измерения –  $5^{\circ}\text{C}$ .

3. Установите на контроллере температуру в  $25^{\circ}\text{C}$ . Дождитесь её стабилизации и выключите приборы.

4. Выключите клавишу «сеть» на блоке розеток.

5. **ВНИМАНИЕ! В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ ВЫХОДИТЬ ЗА ПРЕДЕЛЫ РЕКОМЕНДОВАННОГО ДИАПАЗОНА ТЕМПЕРАТУР!**

**Таблица 1.** Результаты измерений температурной зависимости сопротивлений

№ изм.	$t, ^{\circ}\text{C}$	$R_m, \text{Ом}$	$R_s, \text{Ом}$	$T, \text{К}$	$1/T, \text{К}^{-1}$	$\ln(R_s)$
1						
2						
3						
....						
18						



## Обработка результатов

1. Постройте зависимость  $R_m(t)$  и выделите на ней точки, укладывающиеся на прямую.
2. Для них методом парных точек (или наименьших квадратов) вычислите угловой коэффициент этой прямой и определите  $R_0$  по точке её пересечения с осью ординат. Результаты оформите в виде таблицы. Для правильного оформления таблиц руководствуйтесь методическими материалами [3].
3. Определите температурный коэффициент сопротивления металла и погрешность к нему.
4. Для построения зависимости  $\ln(R_s) (1/T)$  произведите предварительные вычисления обратных температур и логарифмов сопротивления полупроводника. Результаты вычислений занесите в таблицу 1.
5. Постройте зависимость  $\ln(R_s) (1/T)$  и выделите на ней точки, укладывающиеся на прямую.
6. Методом парных точек (или наименьших квадратов) вычислите угловой коэффициент этой зависимости. Результаты оформите в виде таблицы (правила оформления можно найти в [3]).
7. Вычислите ширину запрещенной зоны полупроводника и погрешность к ней. Результат приведите в эВ.

## Контрольные вопросы

1. Какие процессы уменьшают подвижность носителей заряда?
2. Почему ширину запрещенной зоны полупроводников неудобно выражать в джоулях?
3. Как изменится температурный коэффициент сопротивления металлического образца, если все геометрические размеры образца (длина, ширина, толщина) уменьшить вдвое?
4. Почему сопротивление металлов пропорционально температуре, если концентрация электронов в них постоянная?
5. В каких единицах выражаются температурный коэффициент сопротивления и угловой коэффициент зависимости  $\ln(R_s) (1/T)$ ?

## Литература

1. Савельев И.В.. Курс общей физики, том II. Электричество. М.: Наука. 1973.
2. Сивухин Д.В.. Общий курс физики, том III. Электричество. М.: Наука. 1974.
3. Агапьев Б.Д., Козловский С.С.. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: методические указания. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
4. Иванов В.К. , Физика. Электромагнетизм: учеб. пособие / Иванов В.К. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 265 с

### **Работа 2.02Д при дистанционном доступе к лабораторной установке.**

#### **Введение**

Данный вариант работы используется в случае невозможности очного проведения занятий. Для успешного выполнения необходимо присутствие преподавателя или лаборанта в зале лабораторных работ. Студентам понадобится персональный компьютер с установленным программным обеспечением, позволяющим удаленно управлять рабочим столом. Допуск к работе осуществляется через видеоконференцию в режиме управления удаленным рабочим столом. Для записи результатов измерений может использоваться как бумажный, так и электронный протокол, по решению преподавателя. Факт выполнения фиксируется видеозаписью собрания.

#### **Описание установки, имеющей возможность дистанционного доступа**

Установка, предназначенная для выполнения работы в дистанционном режиме, идентична установке для очного выполнения (рис. 2,3). В дополнение к основным элементам установки установка снабжается компьютером и видеокамерой, позволяющими управлять работой приборов и наблюдать за ними.

#### **Порядок проведения работы**

Подготовку стенда к работе осуществляет преподаватель или лаборант. Для работы в дистанционном режиме необходимо:

1. Включить компьютер, закрепить на столе камеру, запустить видеоконференцию (смотри инструкцию на стр.98).

2. Начать собрание на лабораторном компьютере и пригласить туда студентов и, если необходимо, преподавателя.

3. После получения студентами допуска к работе необходимо включить стенд и измерительные приборы (в соответствии с порядком выполнения в очном формате), а также запустить программу управления приборами.

4. Передать одному из студентов управление рабочим столом.

После передачи управления студенты самостоятельно выполняют работу. Порядок выполнения идентичен очному варианту работы:

1. Запустите программу управления приборами (вид рабочего стола, приведен на рис. 4).

2. Проведите измерение температурных зависимостей сопротивления платинового и германиевого образцов. Для этого:

a. Установите необходимую температуру либо непосредственно на контроллере, либо в программе на компьютере.

b. Дождитесь стабилизации значений температуры и сопротивлений.

c. Занесите значения температуры, сопротивления металлического и полупроводникового образца в таблицу 1.

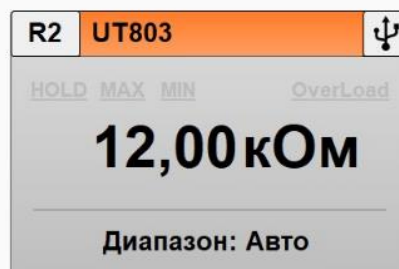
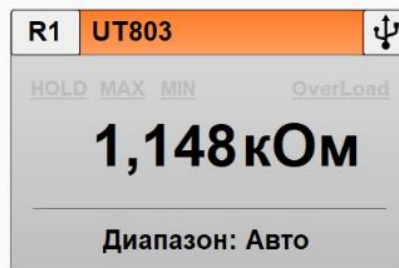
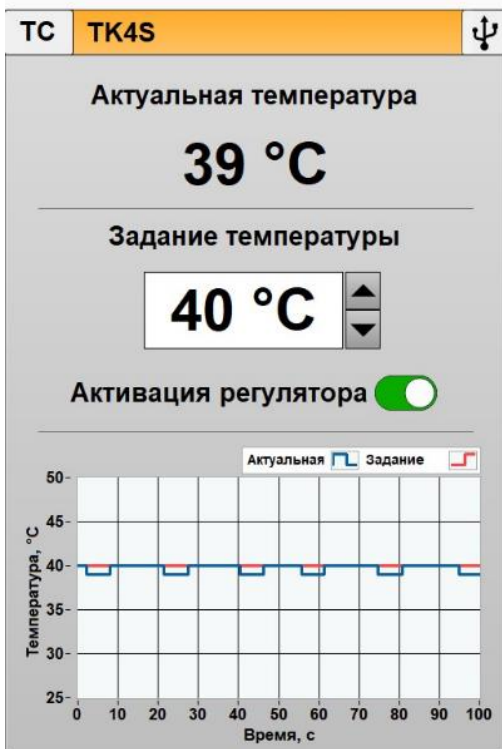
d. Повторите пункты 2a-2c для остальных значений температуры. Рекомендуется выбрать температурный диапазон  $-10 - 75^{\circ}\text{C}$ . Шаг измерения –  $5^{\circ}\text{C}$ .

2. Установите на контроллере температуру в  $25^{\circ}\text{C}$ . Дождитесь её стабилизации и закройте программу.

3. **ВНИМАНИЕ! В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ ВЫХОДИТЬ ЗА ПРЕДЕЛЫ РЕКОМЕНДОВАННОГО ДИАПАЗОНА ТЕМПЕРАТУР!**

***По окончании выполнения работы, выключение приборов и компьютера осуществляется преподавателем.***

## 2.01Д - Температурные зависимости удельного сопротивления металлов и полупроводников



TC - Температурный контроллер Autonics TK4S, управление нагревом/охлаждением через элемент Пельтье  
 R1 - Термосопротивление LN222 Pt1000, платина  
 R2 - NTC термистор, B57045-K 102-K, полупроводник

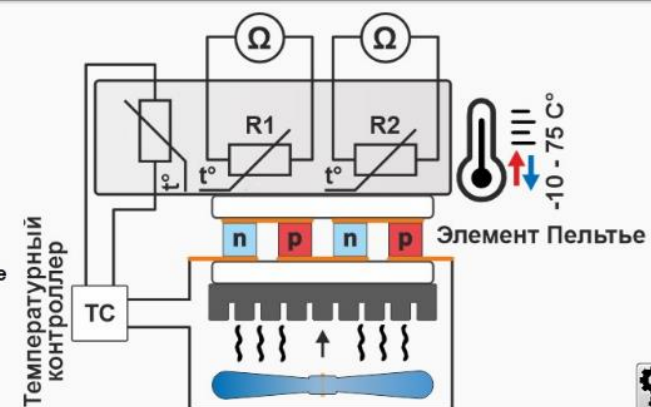
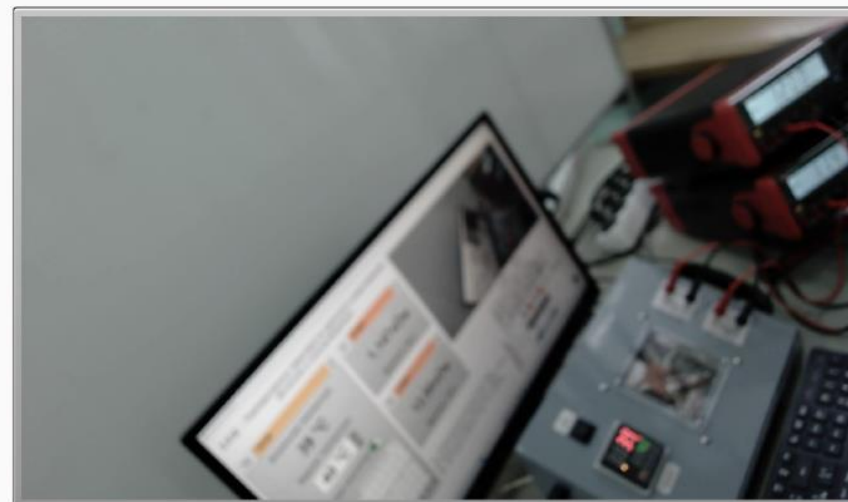


Рис. 4. Общий вид рабочего стола с запущенной программой управления.