Как снять ВАХ?

Задача 2. [ВсОШ 2024/25, региональный этап, 9 класс, задача 2 (практический тур)] «Как снять ВАХ?».

В данном экспериментальном задании оценивать погрешности не нужно.

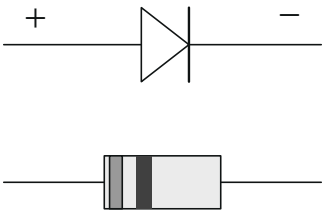
В вашем распоряжении имеются два мультиметра. Первый мультиметр (на его корпусе присутствует отметка «№1») можно использовать только в режиме омметра. Второй мультиметр необходимо использовать только в качестве амперметра или вольтметра.

При подключении к омметру электрического элемента он показывает его статическое сопротивление, то есть отношение напряжения на элементе к силе тока через него $R_{\text{ст}} = \dfrac{U}{I}$.

1. Определите сопротивления амперметра и вольтметра в режимах измерения постоянного тока и постоянного напряжения. Запишите значения измеренных сопротивлений для режимов амперметра с пределом измерений меньше 10 А и для режимов вольтметра с пределом измерений меньше 200 В.
2. Снимите вольтамперную характеристику диода в прямом направлении (см. рис. ниже) в максимально широком диапазоне значений напряжений, считая известным, что характеристики обоих диодов одинаковые. Необходимое количество точек — не менее 11. Старайтесь, чтобы точки распределялись равномерно по напряжениям. При промежуточных измерениях обязательно указывайте соответствующие электрические схемы с обозначением приборов и их режимами. Используйте таблицы с описанием качественной и количественной информацией об измерениях.
3. Постройте график полученной вами вольтамперной характеристики.

Оборудование: два мультиметра, соединительные провода, два одинаковых диода, лист миллиметровой бумаги для построения графика.

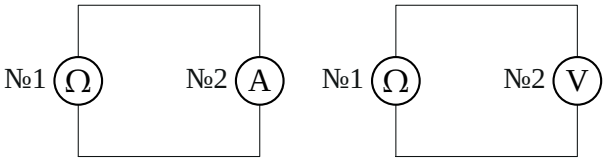
При подключении диода в электрическую цепь учитывайте его полярность. На рисунке показана схема подключения диода для его работы в прямом направлении.



▲ **Решение. Что происходит.** Источника тока в оборудовании нет — его роль играет омметр: чтобы измерить сопротивление, он сам пропускает через элемент небольшой ток и показывает отношение U/I. На разных пределах омметр даёт разный ток, поэтому, подключая к нему диод (или два диода в разных соединениях), мы попадаем в разные точки ВАХ. Второй мультиметр, включённый параллельно диоду, даёт напряжение (вольтметр) — тогда ток $I = U/R$. Главная трудность — точки ложатся неравномерно, и средний участок ВАХ (около 100–200 мВ) приходится добирать хитрее: включить параллельно диоду амперметр, у которого известно сопротивление, — он работает как шунт и сам себе вольтметр.

Обозначения. R — показание омметра, U_V — показание вольтметра, I_A — показание амперметра; R_V, R_A — сопротивления вольтметра и амперметра; U и I — напряжение на одном диоде и ток через него.

Пункт 1. Подключаем омметр к входам второго мультиметра, переключённого в нужный режим: тогда омметр показывает внутреннее сопротивление прибора в этом режиме.



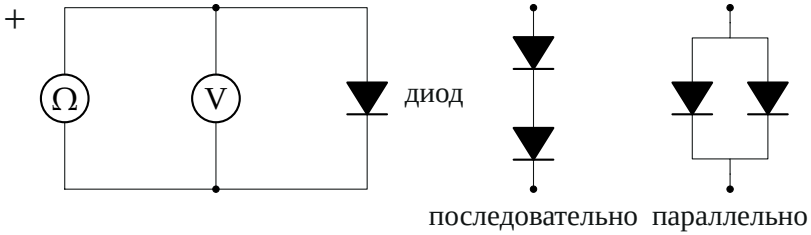
Измерение сопротивления амперметра (слева) и вольтметра (справа) омметром

У организаторов: вольтметр на всех пределах $R_V = 1{,}0$ МОм; амперметр $R_A^{2000\ \text{мкА}} = 105{,}7$ Ом, $R_A^{20\ \text{мА}} = 15{,}8$ Ом, $R_A^{200\ \text{мА}} = 5{,}0$ Ом. У других моделей мультиметров числа и набор пределов свои. Чем больше предел амперметра, тем меньше его сопротивление: он пропускает больший ток при той же собственной малой «потере» напряжения.

Пункт 2. 1. Схема с вольтметром. Вольтметр подключаем параллельно диоду, к диоду же — омметр плюсом к аноду (прямое направление). Вольтметр показывает напряжение на диоде, а омметр — отношение этого напряжения к полному току. Пока $R \ll R_V = 1$ МОм, ток через вольтметр пренебрежимо мал, и весь ток идёт через диод:

$$U = U_V, \qquad I = \frac{U_V}{R}.$$

Для двух диодов, соединённых последовательно, ток через каждый тот же, а напряжения одинаковы (диоды одинаковые): $U = \frac{U_V}{2}, I = \frac{U_V}{R}$. Для двух параллельных диодов напряжение то же, а ток делится пополам: $U = U_V, I = \frac{U_V}{2R}$.



Омметр (источник тока), вольтметр и диод параллельно; справа — чем заменяем диод во втором и третьем наборе измерений

Измерения организаторов (германиевый диод Д9Б):

диоды	предел омметра	R, кОм	U_V, мВ	I, мА	U, мВ
один	2000k	21	5,8	0,0003	5,8
	200k	13	32,6	0,0025	32,6
	20k	5,07	82,8	0,016	82,8
	2000	0,262	275	1,050	275
	200	0,1824	304	1,667	304
два послед.	2000k	36	12,6	0,0004	6,3
	200k	23,7	66,2	0,0028	33,1
	20k	10,98	152,8	0,014	76,4
	2000	0,577	542	0,939	271
два парал.	2000k	8	2,3	0,0001	2,3
	200k	6,6	17,4	0,0013	17,4
	20k	3,16	58	0,009	58
	2000	0,219	235	0,537	235
	200	0,1553	265	0,853	265

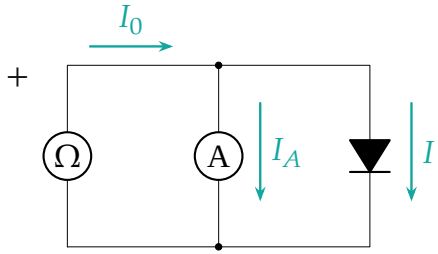
2. Схема с амперметром. Точек между $\approx$ 100 и $\approx$ 230 мВ нет: на пределе 20k омметр даёт слишком малый ток, на пределе 2000 — уже большой. Вставим вместо вольтметра амперметр на пределе 2000 мкА. Он и диод соединены параллельно, поэтому напряжение на диоде равно напряжению на амперметре (закон Ома для амперметра):

$$U = I_A R_A.$$

Омметр по-прежнему показывает отношение напряжения к полному току $I_0 = I_A + I$: $R = \frac{U}{I_A + I}$. Отсюда ток через диод

$$I = \frac{U}{R} - I_A = I_A\left(\frac{R_A}{R} - 1\right),$$

а для двух параллельных диодов — вдвое меньше. Амперметр забирает часть тока, и напряжение на диоде получается промежуточным — ровно в «провале».

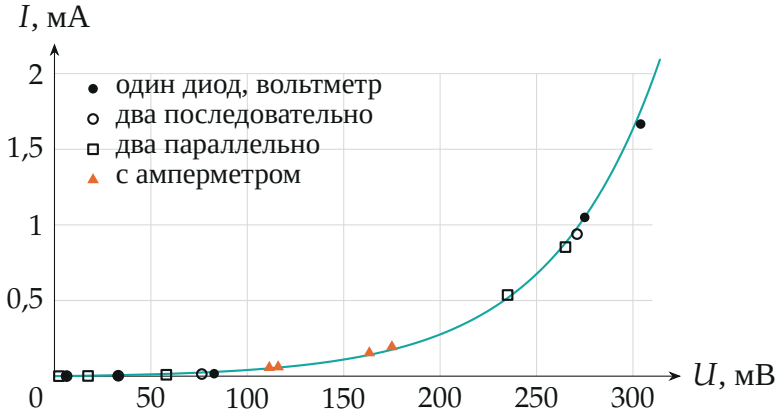


Амперметр параллельно диоду: он одновременно шунт и измеритель напряжения $U = I_A R_A$

диоды	предел омметра	I_A, мА	R, Ом	I, мА	U, мВ
один	200	1,656	94,5	0,196	175,0
один	2000	1,097	100	0,063	116,0
два парал.	200	1,545	87,9	0,156	163,3
два парал.	2000	1,054	95	0,059	111,4

Пример пересчёта: $U = 1{,}656$ мА $\cdot\, 105{,}7$ Ом $= 175{,}0$ мВ, $I = 1{,}656 \cdot (\frac{105{,}7}{94{,}5} - 1)$ мА $= 0{,}196$ мА.

Пункт 3. Всего 18 точек от 2 до 304 мВ. Строим график $I(U)$.



ВАХ диода Д9Б; кривая — $I = I_0(e^{U/U_0} - 1)$, $I_0 \approx 8{,}5$ мкА, $U_0 \approx 57$ мВ

Обратите внимание: омметр показывает статическое сопротивление $R = U/I$, а не наклон ВАХ; поэтому и пересчёт $I = U/R$ верен при

любой нелинейности диода. И схема с вольтметром работает, только пока $R \ll R_V$: на пределе 2000k ($R = 21$ кОм) поправка за ток вольтметра около 2%.

Проверка. Точки трёх разных соединений и двух схем легли на одну кривую — значит, пересчёт на один диод верен. Точка двух последовательных диодов на пределе 2000 (271 мВ; 0,94 мА) почти совпадает с точкой одного диода (275 мВ; 1,05 мА). Вид кривой — как у полупроводникового диода: до $\approx$ 150 мВ ток мал (диод «закрыт»), дальше быстро растёт; у германиевого диода открытие начинается при малых напряжениях, 0,2–0,3 В.

Физический смысл: прибор, предназначенный для измерения, сам становится источником тока, а меняя его предел и соединения, мы двигаемся по ВАХ.

Ответ. 1) $R_V = 1{,}0$ МОм на всех пределах; $R_A^{2000\ \text{мкА}} = 105{,}7$ Ом, $R_A^{20\ \text{мА}} = 15{,}8$ Ом, $R_A^{200\ \text{мА}} = 5{,}0$ Ом (мультиметры организаторов); 2) 18 точек ВАХ от 2 до 304 мВ — таблицы в решении; 3) график: экспоненциальный рост тока, $I \approx 1{,}7$ мА при $U = 0{,}30$ В.