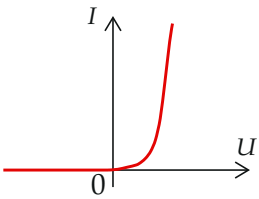
Греем диод

Задача E2. [ВсОШ 2020/21, заключительный этап, 9 класс, задача E2] «Греем диод».

На рис. 1 представлена типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода. При прямом включении сила тока I через диод быстро увеличивается с ростом напряжения U, а при обратном — ток практически отсутствует. С повышением температуры диода ветвь ВАХ его прямого включения смещается влево (рис. 2).



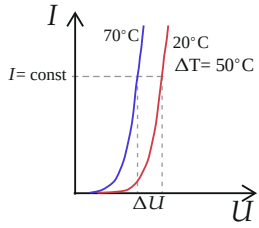


Рис. 1 (слева) и рис. 2 (справа)

Температурным коэффициентом напряжения (ТКН) диода называют отношение $\eta = \Delta U / \Delta T$, где ΔU — изменение напряжения на диоде, вызванное изменением его температуры ΔT при фиксированном значении силы тока.

Определите ТКН выданного вам полупроводникового диода. Для этого:

1. Снимите и изобразите на одном графике (формат А5) участки ВАХ диода для 4-х температур из диапазона $20\,^{\circ}\text{C} - 60\,^{\circ}\text{C}$ (для каждой ВАХ достаточно получить 5 точек в интервале токов от 5 мА до 15 мА).
2. По результатам измерений постройте график (формат А5) зависимости напряжения на диоде U_x от температуры T при силе тока $I_x = 10$ мА.
3. По графику зависимости $U_x(T)$ определите ТКН диода.

Примечания. Во время эксперимента диод должен оставаться СУХИМ: помещайте его и термометр в пробирку, а горячую воду наливайте в стакан термостата. Для снятия ВАХ используйте провод с

зажимами типа «крокодил» и магазин сопротивлений с источником напряжения (схема — рис. 3). Использовать мультиметр в режиме амперметра ЗАПРЕЩЕНО: рассчитывайте силу тока, текущего через диод, измеряя напряжение на одном из резисторов магазина. Сила тока через диод не должна превышать 50 мА; подключайте диод к магазину сопротивлений только во время измерений. Расчёт погрешностей в работе не требуется.

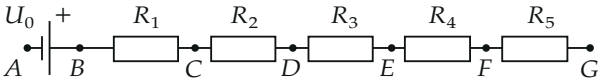


Рис. 3

Оборудование: диод, магазин сопротивлений с источником, провод с зажимами типа «крокодил», мультиметр с щупами, термометр, термостат (состоящий из внешнего пенопластового стакана, пластикового стакана, разделительного кольца, крышки и пробирки), горячая вода по требованию, лист миллиметровой бумаги формата А4 для построения графиков, салфетка для поддержания чистоты на рабочем месте.

▲ **Решение. Что происходит.** Экспериментальная задача класса «нелинейный элемент цепи + обработка серии измерений». ВАХ диода при нагреве сдвигается влево: тот же ток идёт при меньшем напряжении. Снимаем несколько ВАХ при разных температурах, на каждой находим напряжение при одном и том же токе 10 мА — это сечение ВАХ горизонталью $I = \text{const}$ (рис. 2). Получаем зависимость $U_x(T)$; её наклон и есть ТКН. Ток измеряем без амперметра — по закону Ома для резистора магазина, включённого последовательно с диодом.

Обозначения. U_d — напряжение на диоде, U_r — напряжение на резисторе R магазина, I — ток через диод, U_x — напряжение на диоде при $I_x = 10$ мА.

1. Схема и как измерять ток. Диод подключаем в прямом направлении «крокодилом» к выводу A (плюс источника) и к одному из выводов C–G магазина (рис. 4). Диод и резисторы магазина соединены последовательно, поэтому ток через них один и тот же. Закон Ома для участка

цепи с резистором R:

$$I = \frac{U_r}{R}.$$

Вольтметром по очереди измеряем U_d (на выводах диода) и U_r (на резисторе). Нужный ток 5–15 мА подбираем, меняя число резисторов в цепи (вывод магазина, к которому подключён диод). Сопротивление магазина в цепи 750–1550 Ом при напряжении источника около 10 В даёт как раз такие токи.

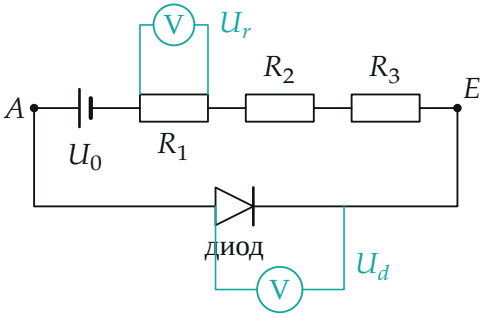


Рис. 4. Схема опыта: диод между выводом A и выводом магазина (здесь E). Вольтметр (один и тот же мультиметр) подключают по очереди к диоду (U_d) и к резистору R_1 (U_r).

2. Температура. Диод и термометр — в сухой пробирке, пробирка — в стакане термостата с горячей водой. Начинаем с самой горячей воды (около 65 °C) и снимаем ВАХ по мере остывания. За время снятия одной ВАХ (пять точек, около минуты) температура меняется меньше чем на 1 °C — этим пренебрегаем. Диод подключаем только на время отсчёта: ток 10 мА при 0,5 В выделяет 5 мВт, и диод сам себя нагревал бы.

3. Результаты. Ниже — измерения организаторов при пяти температурах (U_d и U_r — в мВ, I — в мА). Отношение U_r/I во всех столбцах одно и то же, 9,80 Ом: ток рассчитан по напряжению на резисторе этого

сопротивления.

T, °C						
26	U_d	550	590	565	575	558
	U_r	61	125	80	96	69
	I	6,22	12,76	8,16	9,80	7,04
37	U_d	530	575	548	558	540
	U_r	62	126	81	97	70
	I	6,33	12,86	8,27	9,90	7,14
45	U_d	518	558	532	542	525
	U_r	63	129	82	98	71
	I	6,43	13,16	8,37	10,00	7,24
55	U_d	500	540	515	525	508
	U_r	64	131	84	100	73
	I	6,53	13,37	8,57	10,20	7,45
65	U_d	483	522	497	507	490
	U_r	65	134	85	102	74
	I	6,63	13,67	8,67	10,41	7,55

4. Пункт 1: ВАХ на одном графике. Пять серий точек — на рис. 5. Через точки каждой серии проводим плавную кривую. Удобно и точнее, чем «на глаз»: на участке 5–15 мА ВАХ диода хорошо описывается формулой $U_d = a + b \ln I$ (ток растёт экспоненциально с напряжением), коэффициенты a, b находим методом наименьших квадратов; отклонения точек от кривых не больше 3 мВ. Кривые идут почти параллельно и сдвигаются влево с ростом температуры — как на рис. 2.

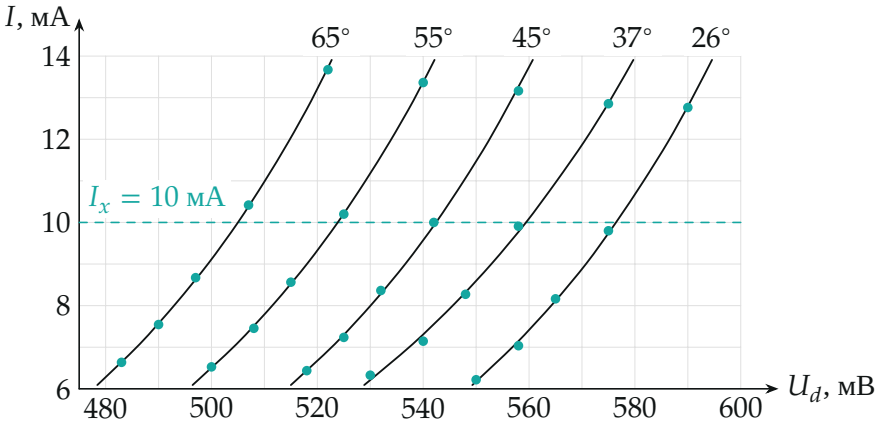


Рис. 5. Участки ВАХ диода при 26, 37, 45, 55 и 65 °C (точки — измерения, линии — $U_d = a + b \ln I$). Пунктир — сечение $I_x = 10$ мА.

5. Пункт 2: напряжение при 10 **мА.** Точка пересечения каждой ВАХ с горизонталью $I = 10$ мА даёт U_x:

T, °C	26	37	45	55	65
U_x, мВ	576	559	542	524	505

Точки ложатся на прямую (рис. 6) — напряжение на диоде при постоянном токе линейно убывает с температурой.

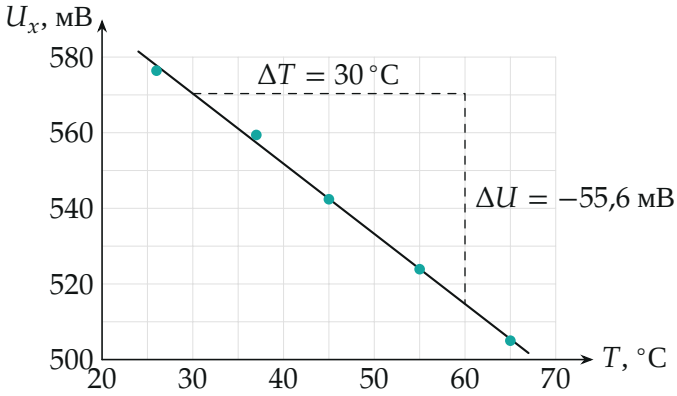


Рис. 6. Зависимость $U_x(T)$ при $I_x = 10$ мА: точки — из рис. 5, прямая — метод наименьших квадратов. Треугольник для отсчёта наклона.

6. Пункт 3: ТКН. Наклон прямой по методу наименьших квадратов (по пяти точкам):

$$\eta = \frac{\Delta U}{\Delta T} = -1{,}85\ \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}},$$

его стандартная погрешность 0,05 мВ/°C. По треугольнику на рис. 6: $\eta = -55{,}6/30 = -1{,}85$ мВ/°C. Знак минус: при нагреве на 1 °C напряжение при том же токе уменьшается почти на 2 мВ.

Обратите внимание. В решении организаторов при 45 °C указано $U_x = 547$ мВ, но в их же таблице при $I = 10{,}00$ мА стоит $U_d = 542$ мВ; на наклон это почти не влияет ($-1{,}87$ против нашего $-1{,}85$ мВ/°C).

Проверка. Второй способ: вместо логарифмической кривой провести через пять точек каждой ВАХ прямую (U_d линейно по I) и взять её значение при 10 мА — получаем 575, 558, 541, 522, 503 мВ и наклон $-1{,}86$ мВ/°C, то же в пределах погрешности. Справочное значение ТКН кремниевого диода — около -2 мВ/°C, наш результат с ним согласуется.

Нагрев облегчает электронам преодоление барьера в p–n-переходе, поэтому нужный ток устанавливается при меньшем напряжении; диод можно использовать как термометр.

Ответ. 1) ВАХ — на рис. 5; 2) $U_x(T)$: 576, 559, 542, 524, 505 мВ при 26, 37, 45, 55, 65 °C; 3) $\eta \approx -1{,}85 \pm 0{,}05$ мВ/°C.