

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

В этой задаче мы используем дифференциальный термометрический метод для выполнения следующих двух заданий:

1. Нахождение температуры затвердевания кристаллического вещества.
2. Определение к.п.д. солнечного элемента.

А. Дифференциальный термометрический метод

В этом эксперименте кремниевые диоды, включенные в прямом направлении, используются как датчики для измерения температуры. Если сила тока через диод остается постоянной, падение напряжения на диоде зависит от температуры в соответствии с формулой

$$V(T) = V(T_0) - \alpha(T - T_0), \quad (1)$$

где $V(T)$ и $V(T_0)$ – напряжения на диоде при температуре T и при комнатной температуре T_0 (измеряемых в $^{\circ}\text{C}$) соответственно, а множитель α равен

$$\alpha = 2.00 \pm 0.03 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}. \quad (2)$$

Значение $V(T_0)$ может несколько отличаться для разных диодов.

Если два таких диода находятся при разных температурах, разность этих температур может быть измерена по разности напряжений на двух диодах. Разность падений напряжения, называемая *дифференциальным напряжением*, может быть измерена с высокой точностью; следовательно, разность температур также может быть определена с высокой точностью. Такой метод называется *дифференциальным термометрическим методом*.

Электрическая цепь с диодами, используемая в эксперименте, показана на рис. 1. К диодам D_1 и D_2 приложено напряжение в прямом направлении от источника (батарея 9 В) через одинаковые резисторы R_1 и R_2 сопротивлением 10

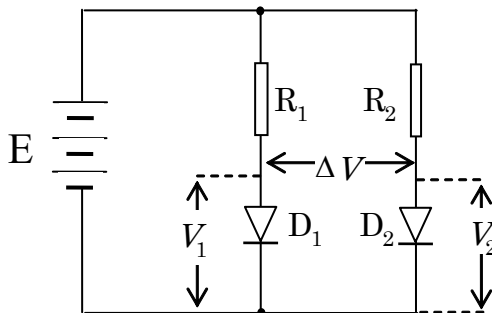


Рис 1 Электрическая схема диодных датчиков

кОм. Эта схема поддерживает токи через оба диода неизменными.

Пусть T_1 и T_2 – температуры диодов D_1 и D_2 соответственно. Тогда из (1) следует, что

$$V_1(T_1) = V_1(T_0) - \alpha(T_1 - T_0)$$

и

$$V_2(T_2) = V_2(T_0) - \alpha(T_2 - T_0).$$

Величина дифференциального напряжения определяется по формуле

$$\Delta V = V_2(T_2) - V_1(T_1) = V_2(T_0) - V_1(T_0) - \alpha(T_2 - T_1) = \Delta V(T_0) - \alpha(T_2 - T_1),$$

или

$$\Delta V = \Delta V(T_0) - \alpha \Delta T, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$. Таким образом, измеряя дифференциальное напряжение ΔV , можно определить разность температур.

Чтобы приложить напряжение к диодам, используется контактная плата (коробка), схема которой показана на рис. 2.

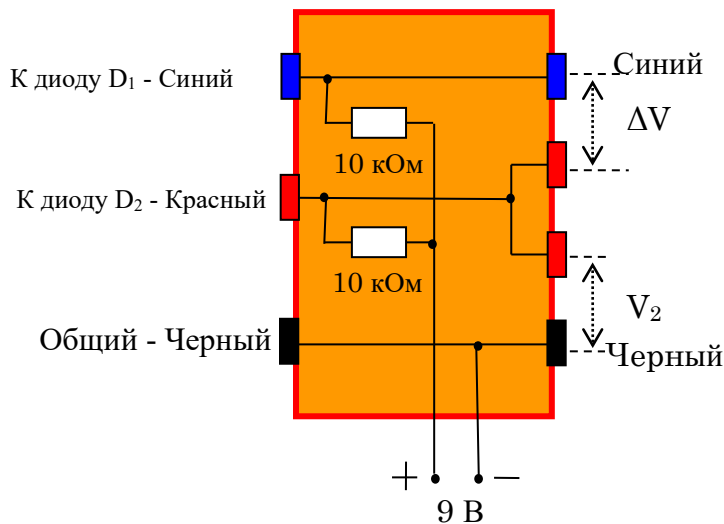


Рис 2. Схема соединений на контактной плате
(вид сверху)

Схема содержит два резистора сопротивлением 10 кОм для подачи тока на диоды, соединительные провода, подключенные к батарее напряжением 9 В, гнезда для подключения диодов D_1 и D_2 , а также гнезда для подключения цифровых мультиметров, измеряющих напряжение V_2 на диоде D_2 и дифференциальное

напряжение ΔV диодов D_1 и D_2 .

В. Задание 1: Определение температуры затвердевания кристаллического вещества

1. Цель эксперимента

Если кристаллическое твердое вещество нагревается до расплавленного состояния, а затем охлаждается, оно затвердевает при фиксированной температуре T_s , называемой *температурой затвердевания*, или *точкой плавления* вещества.

Традиционный метод определения T_s состоит в том, чтобы следить за изменением температуры со временем в процессе охлаждения. В силу того, что процесс затвердевания сопровождается выделением скрытой теплоты фазового перехода, температура вещества не изменяется, пока все оно не затвердеет. Если количество вещества достаточно велико, то отрезок времени, в течение которого температура остается неизменной, будет достаточно длительным, и можно легко определить эту температуру. В противоположном случае, когда количество вещества мало, этот отрезок времени оказывается очень коротким, и его трудно зафиксировать. Тогда определить T_s достаточно сложно.

Для определения T_s при малом количестве вещества мы используем *дифференциальный термометрический метод*, принцип которого состоит в следующем. Используются две одинаковые маленькие кюветы, одна из которых содержит малое количество изучаемого вещества (будем называть ее *кюветой с образцом - sample dish*), а другая не содержит вещества (будем называть ее *опорной кюветой - reference dish*). Обе кюветы помещены на источник тепла, температура которого со временем медленно изменяется. Тепловые потоки внутрь и наружу для обеих кювет примерно одинаковы. В каждой кювете находится датчик температуры (кремниевый диод, включенный в прямом направлении). Пока агрегатное состояние вещества остается неизменным, температуры T_{samp} кюветы с образцом и T_{ref} опорной кюветы изменяются с практически одинаковой скоростью, поэтому разность $\Delta T = T_{\text{ref}} - T_{\text{samp}}$ при изменении T_{samp} меняется

медленно. Если агрегатное состояние вещества изменяется, причем T_{samp} остается неизменной и равной T_s , в то время как T_{ref} продолжает изменяться, то ΔT меняется быстро. На графике зависимости ΔT от T_{samp} возникает скачок. Значение T_{samp} , соответствующее скачку ΔT , и есть T_s .

Целью этого эксперимента является определение температуры затвердевания T_s чистого кристаллического вещества. Эта температура лежит в интервале от 50°C до 70°C . Используются традиционный и дифференциальный термометрический методы. Количество вещества, используемое в эксперименте, составляет около 20 мг.

2. Аппаратура и материалы

1. Для нагрева служит галогеновая лампа мощностью 20 Вт.
2. Держатель кювет представляет собой бакелитовую (пластмассовую) пластину с квадратным отверстием, над которым закреплена стальная пластинка. На стальной пластинке помещены два маленьких магнита.
3. Две маленькие стальные кюветы, к каждой из которых припаян кремниевый диод. Одна из них используется как опорная кювета, а другая – как кювета для образца.

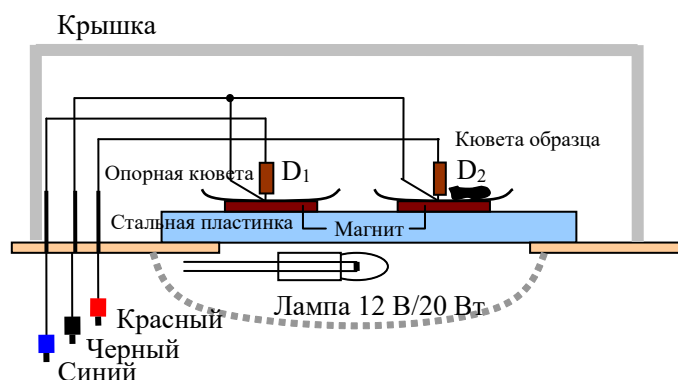


Рис. 3. Устройство для измерения температуры затвердевания

Каждая из кювет помещена на магнит. Таким образом обеспечивается контакт между кюветой, магнитом и стальной пластинкой. Магниты также обеспечивают необходимую величину теплового потока от стальной пластинки к кюветам и обратно.

Серая пластмассовая коробка служит крышкой, защищающей кюветы от внешнего воздействия.

Рисунок 3 показывает взаимное расположение кювет и магнитов на держателе, а также размещение электрической лампы.

4. Два цифровых мультиметра используются как вольтметры. Они могут также измерять комнатную температуру при повороте переключателя функций в положение “°C/°F”. Напряжение, измеренное мультиметром, имеет погрешность ± 2 единицы последнего разряда.

Внимание! Чтобы предупредить переключение мультиметра в режим “Auto power off” (автоматическое выключение), переведите переключатель функций из положения OFF в требуемое положение, одновременно нажав и удерживая в нажатом положении кнопку SELECT (выбор).

5. Контактная плата (коробка) с электрической цепью, показанная на рис. 2.

6. Батарея (9 В).

7. Соединительные провода.

8. Маленькая пробирка, содержащая около 20 мг исследуемого вещества.

9. Таймер.

10. Калькулятор.

11. Миллиметровка.

3. Эксперимент

1. Расположите магниты с кюветами на стальной пластине симметрично, как показано на рис.4. Кювета слева с диодом D_1 используется как опорная (диод D_1 будем называть опорным), а кювета справа с диодом D_2 – как кювета для образца (D_2 будем называть измерительным диодом).

Положите лампу, чтобы она светила снизу вверх, как показано на рис. 5. Не включайте лампу. Положите держатель кювет на лампу. Подсоедините оборудование так, чтобы

вы могли измерять напряжения на диоде D_2 , $V_{\text{samp}} = V_2$, и дифференциальное напряжение ΔV .

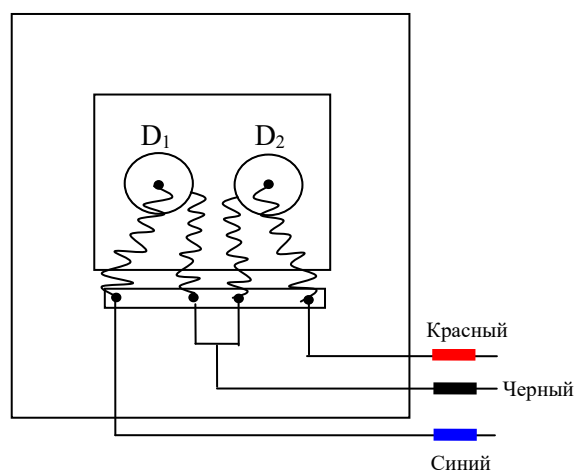


Рис 4. Кюветы на держателе
(вид сверху)

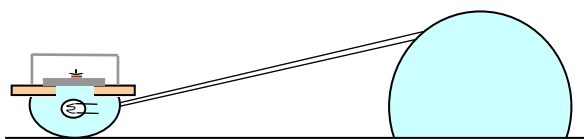


Рис. 5. Использование галогенной лампы как источника тепла.

Чтобы исключить ошибки, вызванные изменением температуры оборудования и приборов, рекомендуем после сборки цепи выждать около 5 минут до начала измерений.

1.1. Измерьте комнатную температуру T_0 и напряжение $V_{\text{samp}}(T_0)$ на диоде D_2 , прикрепленном к кювете для образца, при этой температуре.

1.2. Вычислите значения напряжений $V_{\text{samp}}(50^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(70^\circ\text{C})$ и $V_{\text{samp}}(80^\circ\text{C})$ на измерительном диоде D_2 при температурах 50°C , 70°C и 80°C , соответственно.

2. Оставляя кюветы пустыми, включите лампу. Наблюдая за изменением напряжения V_{samp} , дождитесь, чтобы температура на кювете для образца достигла $T_{\text{samp}} \sim 80^\circ\text{C}$, и выключите лампу.

2.1. Подождите до тех пор, пока $T_{\text{samp}} \sim 70^\circ\text{C}$, затем измерьте зависимости напряжения V_{samp} и дифференциального напряжения ΔV от времени при охлаждении пластины с шагом по времени от 10 сек до 20 сек. Запишите значения V_{samp} и ΔV в зависимости от времени t в таблицу. Если ΔV изменяется быстро, можно уменьшить интервал между измерениями. Когда температура кюветы уменьшится до $T_{\text{samp}} \sim 50^\circ\text{C}$, прекратите измерения.

2.2. Постройте график зависимости V_{samp} от времени t (График 1) на миллиметровке.

2.3. Постройте график зависимости ΔV от V_{samp} (График 2) на миллиметровке.

Примечание: в пунктах 2.2. и 2.3. не забудьте указать название графиков.

3. Выложите исследуемое вещество из ампулы в кювету для образца. Повторите измерения, сделанные в п.2.

3.1. Занесите результаты измерений V_{samp} и ΔV в зависимости от времени t в таблицу.

3.2. Постройте график зависимости V_{samp} от времени t (График 3) на миллиметровке.

Примечание: в пунктах 3.2. и 3.3. не забудьте указать название графиков

3.3. Постройте график зависимости ΔV от V_{samp} (График 4) на миллиметровке.

4. С помощью графиков 1-4 определите температуру затвердевания вещества.

4.1. Использование традиционного метода для определения T_s : сравнивая График 3 и График 1, отметьте точку на Графике 3, где вещество затвердевает, и определите значение V_{samp} в этой точке, которое будем обозначать V_s . Найдите температуру затвердевания T_s вещества и оцените ее погрешность.

4.2. Использование дифференциального термометрического метода для определения T_s : сравнивая График 4 и График 2, отметьте точку на Графике 4, где вещество затвердевает, и определите в этой точке значение $V_{\text{samp}} = V_s$. Найдите температуру затвердевания T_s вещества и оцените ее погрешность.

4.3. С учетом погрешностей результатов измерений и приборных погрешностей рассчитайте полную погрешность температуры T_s , полученную дифференциальным термометрическим методом. Приведите эти расчеты и запишите значение температуры T_s с ее погрешностью.

С. Задача 2: Определение к.п.д. солнечного элемента, освещаемого галогеновой лампой накаливания

1. Цель эксперимента

Целью этого эксперимента является определение к.п.д. солнечного элемента, освещаемого галогеновой лампой накаливания. К.п.д. элемента определяется как отношение электрической мощности во внешней цепи, к общей мощности излучения, падающего на фотоэлемент. К.п.д. зависит от спектра падающего излучения. В данном эксперименте излучение, падающее на элемент, испускается галогеновой лампой накаливания. Чтобы определить к.п.д. солнечного элемента, вы должны измерить *плотность потока энергии (освещенность) E* в некоторой точке, расположенной под лампой на расстоянии d от нее на вертикальной линии, и *максимальную мощность P_{\max}* солнечного элемента, когда он располагается в этой точке. В этом эксперименте $d = 12$ см (рис. 6). Освещенность E определяется следующим соотношением:

$$E = \Phi / S,$$

где Φ – мощность потока излучения (радиационная мощность), падающего на площадку площадью S .

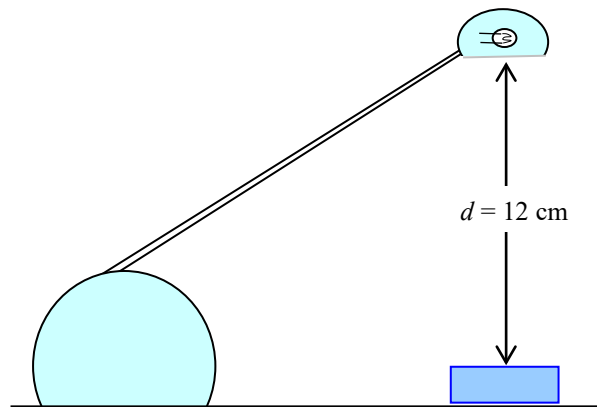


Рис. 6

Использование галогеновой лампы, как источника света

2. Приборы и оборудование

1. Источником света служит галогеновая лампа мощностью 20 Вт.
2. Детектором излучения служит медный конус, внутренняя поверхность которого зачернена (рис. 7). Конус не полностью термически изолирован от окружающей среды. В этом эксперименте детектор можно рассматривать как абсолютно черное тело. Для определения температуры используются кремниевые диоды. Измерительный диод прикреплен к детектору излучения (D_2 на рис. 1 и рис. 7), так, что его температура равна температуре конуса. Опорный диод помещен на внутренней стороне стенки коробки с детектором, его температура равна температуре окружающей среды. Суммарная теплоемкость детектора (конуса и

измерительного диода) равна $C = 0,69 \pm 0,02$ Дж/К. Детектор покрыт тонкой полиэтиленовой пленкой, поглощением и отражением излучения в которой можно пренебречь.

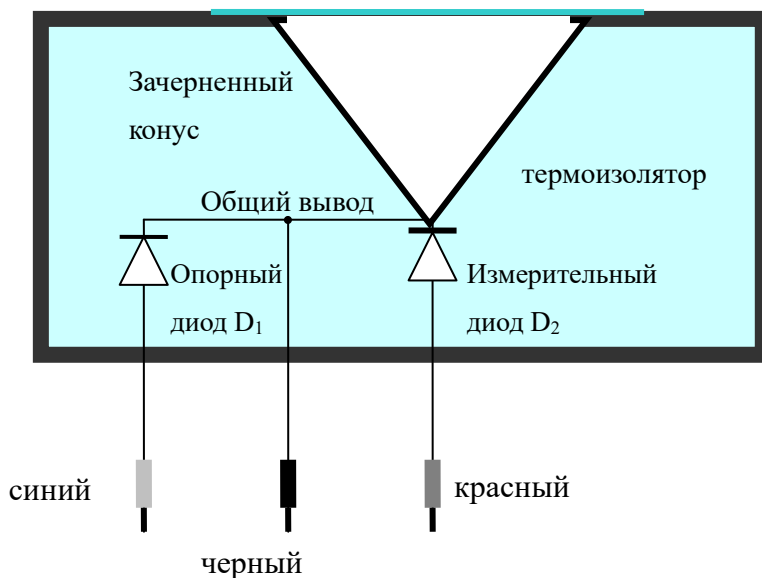


Рис 7. Схема фотодетектора

3. Контактная плата (коробка) с электрической цепью, показанная на рис. 2.

4. Солнечный элемент закреплен на пластиковой коробке (рис. 8). На поверхности элемента находятся некоторые металлические соединительные полосы. При расчетах можно считать, что их площадь входит в площадь фотоэлемента.

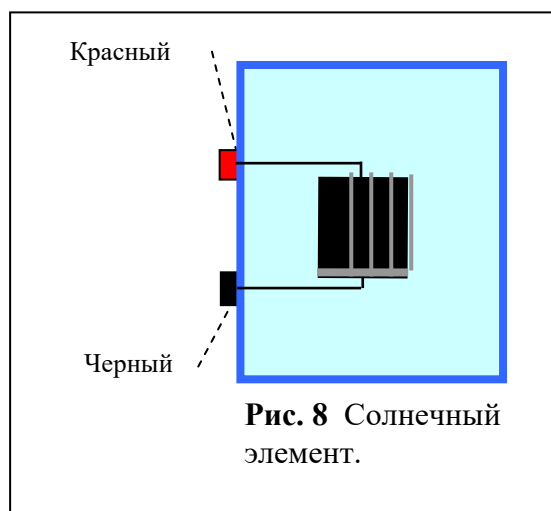


Рис. 8 Солнечный элемент.

5. Два цифровых мультиметра. При использовании для измерения напряжений они имеют очень большое внутреннее сопротивление, которое можно считать бесконечно большим.

При их использовании для измерения силы тока, внутренним сопротивлением мультиметров пренебрегать нельзя. Напряжение, измеренное мультиметром, имеет погрешность ± 2 единицы последнего разряда. Цифровые мультиметры могут измерять комнатную температуру.

Внимание! Чтобы предупредить переключение мультиметра в режим “Auto power off” (автоматическое выключение), переведите переключатель функций из

положения OFF в требуемое положение, одновременно нажав и удерживая в нажатом положении кнопку SELECT (выбор).

6. Батарея (9 В).
7. Переменный резистор.
8. Секундомер (таймер).
9. Линейка с миллиметровыми делениями.
10. Соединительные провода.
11. Миллиметровка.

3. Эксперимент

Когда детектор получает энергию от падающего на него излучения, он нагревается. В то же время, детектор теряет тепло несколькими путями, такими как теплопроводность, конвекция, излучение, и т.д. Таким образом, энергия излучения, полученная детектором за время dt , равна сумме энергии, необходимой для увеличения температуры детектора, и энергии, передаваемой от детектора окружающей среде:

$$\Phi dt = CdT + dQ$$

где C – суммарная теплоемкость детектора и диода, dT – увеличение температуры и dQ – потери тепла.

Когда разность температур детектора и окружающей среды $\Delta T = T - T_0$ мала, можно считать, что количество теплоты dQ , передаваемое детектором окружающей среде за время dt пропорционально ΔT и dt , т.е. $dQ = k\Delta T dt$, где k – постоянный коэффициент, имеющий размерность Вт/К. Следовательно, в предположении, что ΔT мало, имеем: $\Phi dt = CdT + k\Delta T dt = Cd(\Delta T) + k\Delta T dt$

или
$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C}\Delta T = \frac{\Phi}{C} \quad (4)$$

Решение этого дифференциального уравнения дает зависимость разности температур ΔT от времени t с момента, когда на детектор начинает падать свет с постоянной интенсивностью:

$$\Delta T(t) = \frac{\Phi}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{C}t} \right). \quad (5)$$

Если свет выключить, дифференциальное уравнение (4) принимает вид

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C}\Delta T = 0, \quad (6)$$

а зависимость разности температур ΔT от времени:

Экспериментальная задача

$$\Delta T(t) = \Delta T(0) e^{-\frac{k}{C}t} \quad (7)$$

где $\Delta T(0)$ – значение ΔT при $t = 0$ (момент, когда начались измерения).

1. Определите комнатную температуру T_0 .
2. Для измерения температуры детектора соберите электрическую цепь, состоящую из диодных датчиков, контактной коробки и мультиметров.

Чтобы исключить ошибки, вызванные изменением температуры оборудования и приборов, рекомендуем после сборки цепи выждать около 5 минут до начала измерений.

2.1. Разместите детектор под источником света на расстоянии $d = 12$ см от лампы. Лампа выключена. Определите значение $\Delta V(T_0)$ в уравнении (3) измеряя ΔV в течение 2 минут с интервалами в 10 с.

2.2. Включите лампу для освещения детектора. Проследите за изменениями ΔV в течение 2 минут, записывая значения через каждые 10-15 с в колонки x и y листа ответов. (Примечание: эти колонки будут использованы позже при выполнении пункта 4). После этого выключите лампу.

2.3. Уберите детектор от лампы. Проследите за изменением ΔV в течение 2 минут с интервалами 10-15 с. в колонки x и y листа ответов. (Примечание: эти колонки будут использованы позже при выполнении пункта 3).

Подсказка:

Так как детектор обладает тепловой инерцией, рекомендуется не использовать данные, полученные сразу после начала и окончания освещения детектора.

3. Для доказательства того, что после выключения лампы уравнение (7) справедливо, постройте график в прямоугольной декартовой системе координат, выбрав подходящие переменные для осей абсцисс и ординат.

- 3.1. Напишите выражения для переменных, откладываемых по осям x и y.
- 3.2. Постройте график зависимости y от x (График 5).
- 3.3. С помощью графика 5 определите значение k .

4. Для доказательства того, что уравнение (5) справедливо при освещенном детекторе, постройте график в прямоугольной декартовой системе координат, выбрав подходящие переменные для осей абсцисс и ординат.

4.1. Напишите выражения для переменных, откладываемых по осям x и y.

Экспериментальная задача

- 4.2. Постройте график зависимости y от x (График 6).
 - 4.3. Определите освещенность E входного отверстия детектора.
5. Положите солнечный элемент на то же самое место, где лежал детектор. Присоедините элемент к соответствующей электрической цепи, состоящей из мультиметров и переменного резистора, который будет использоваться для изменения нагрузки элемента. Измерьте ток в цепи и напряжение на элементе при различных значениях сопротивления переменного резистора.
- 5.1. Зарисуйте цепь, используемую в данном эксперименте.
 - 5.2. Вращая ручку резистора, можно изменять величину нагрузки. Отметьте значения тока I и напряжения V при каждом положении ручки.
 - 5.3. Постройте график мощности, потребляемой нагрузкой, как функции силы тока через элемент. Это График 7.
 - 5.4. По графику определите максимальное значение P_{\max} мощности и оцените погрешность этой величины.
 - 5.5. Запишите выражение для к.п.д. элемента при максимальной мощности. Рассчитайте его значение и погрешность.

Перечень экспериментального оборудования (рис. 10)

1	Галогеновая лампа 220 В/ 20 Вт	9	Секундомер
2	Держатель для кювет	10	Калькулятор
3	Кюветы	11	Детектор излучения
4	Мультиметры	12	Солнечный элемент
5	Контактная коробка	13	Переменный резистор
6	Батарейка (9 В)	14	Линейка
7	Соединительные провода	15	Коробка, используемая как крышка
8	Ампула с исследуемым веществом		

Внимание: Чтобы избежать перехода мультиметра в режим автоматического выключения питания, поверните ручку выбора функций из положения OFF в нужное вам положение, предварительно нажав и удерживая кнопку SELECT (рис. 9).

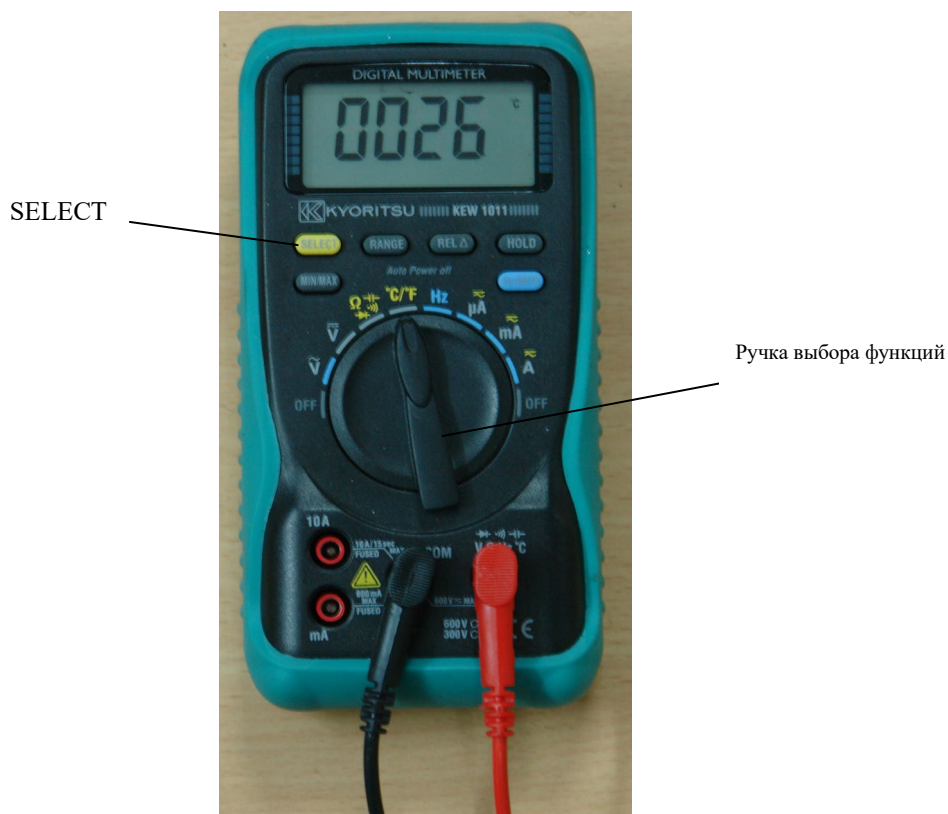


Рис 9. Цифровой мультиметр

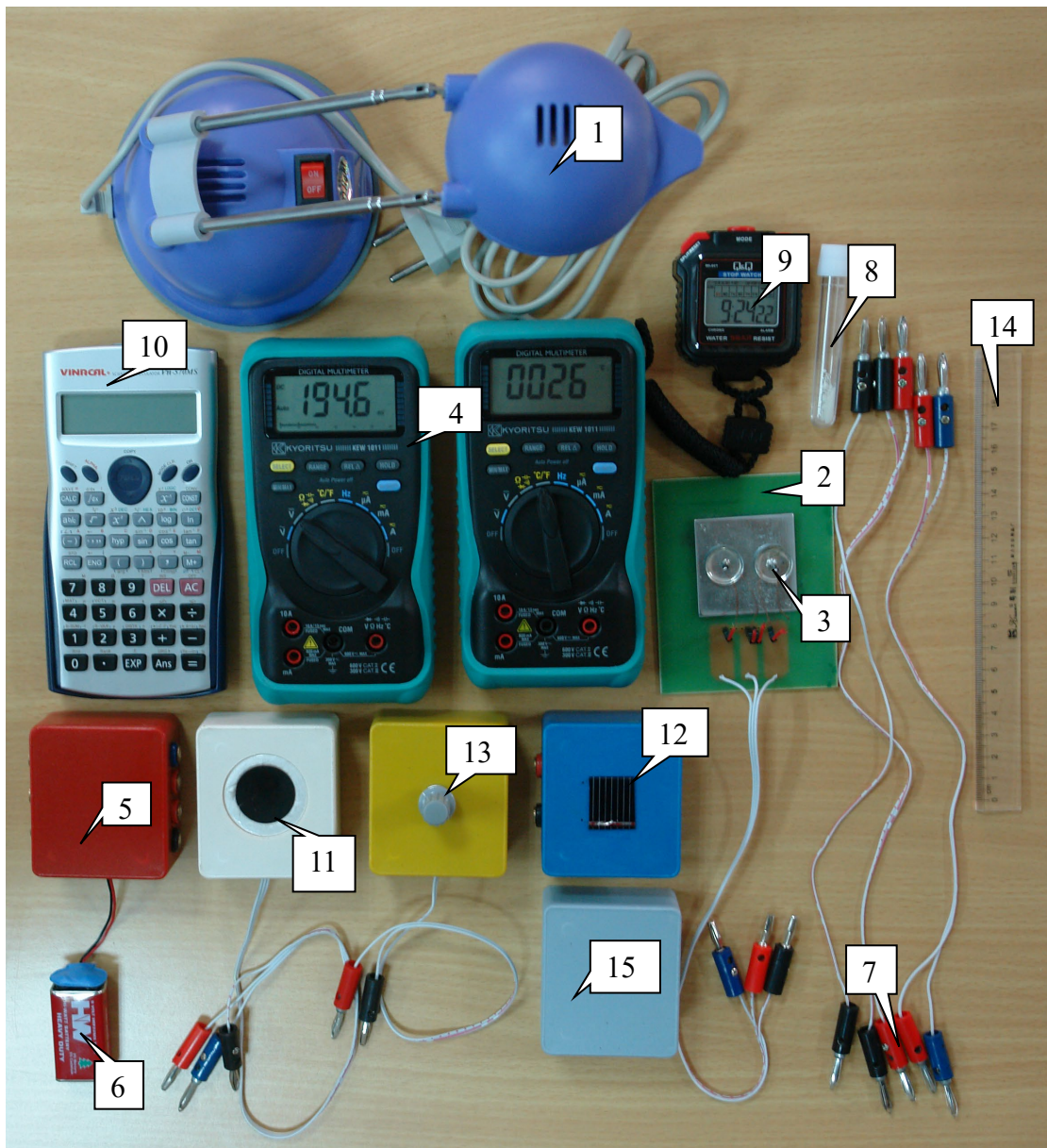


Рис 10. Экспериментальное оборудование