

差分温度測定法(示差熱法)

この問題では、差分温度測定法(示差熱法)を用いて以下の2つの課題を行う:

1. 結晶性固体の凝固点の温度を求める。
2. 太陽電池の発電効率を決める。

A. 差分温度測定法(示差熱法)

この実験では、温度測定のセンサーとして、シリコンダイオードを使う。ダイオードに流れる電流が一定ならば、ダイオードの両端の電圧の温度依存性は次のようになる。

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

ここで、室温 T_0 [°C] での電圧降下を $V(T_0)$ 、温度 T [°C] での電圧降下を $V(T)$ とした。係数 α は、

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

である。この $V(T_0)$ の値はダイオードによって多少異なる。

2つのダイオードを異なる温度のところにおけば、温度差は2つのダイオードの電圧の差から測定することができる。この電圧の差を「示差電圧」と呼び、これは高い感度で測定できる。よって、両者の温度差も高い感度で測定することができる。この方法を「差分温度測定法(示差熱法)」という。この実験の回路を図1に示す。回路にある D_1 と D_2 はダイオード、 R_1 と R_2 は $10 \text{ k}\Omega$ の抵抗、電池の電圧は 9V である。

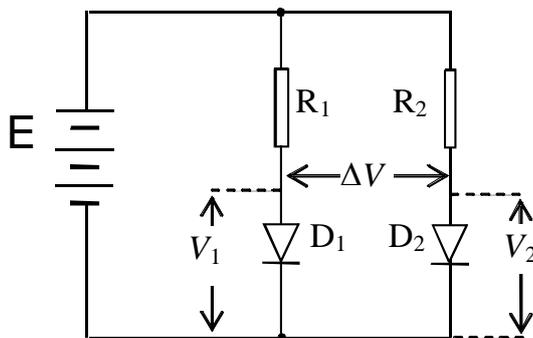


図1 ダイオード・センサーの回路

ダイオード D_1 の温度を T_1 、ダイオード D_2 の温度を T_2 とすれば、(1) 式によって、

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

および

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

が得られる。これにより、示差電圧は、

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

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

となる。ここで、 $\Delta T = T_2 - T_1$ とした。示差電圧 ΔV を測定することにより、温度差が求められる。

ダイオードに電圧をかけるために、図 2 に示す仕組みの回路ボックスを用いる。

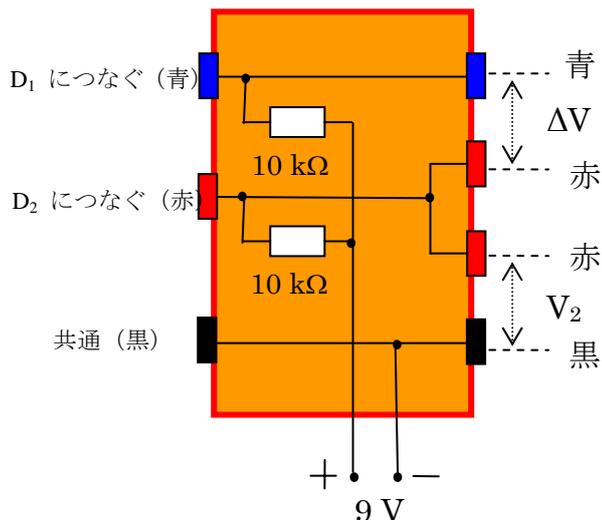


図 2. 回路ボックス (図 10 の部品 5) の概念図 (上から見た場合)

この回路ボックスは、それぞれのダイオードに直列に接続する抵抗値 $10 \text{ k}\Omega$ の2つの抵抗、 9 V の電池、 D_1 と D_2 のダイオードにつなげるための端子、ダイオード D_2 の電圧 V_2 と示差電圧 ΔV を測定するマルチメーターにつなげる端子からなる。

B. 課題 1: 結晶物質の凝固点の温度をを定める

1. 実験の目的

結晶物質の固体を加熱して溶かした後、冷却すると、ある決まった温度 T_s で固化する。この温度を凝固点(固化点)とよぶ(あるいは逆過程から見ると融点といってもよい)。凝固点 T_s を定める通常の方法は、冷却過程において温度の時間変化を測定する。相転移に伴い潜熱を放出するので、固化の途中では、物質の温度は変化しない。物質の量が十分多いと、温度が一定である時間はそれだけ長くなるので、凝固点を定めるのが容易となる。しかし、物質の量が少ないと、その時間は短くなるので、 T_s を求めることが難しくなる。

示差熱法は、少量物質の場合に、凝固点 T_s を求めるのに用いられる。原理は次の通

りである。2 つの同一の皿を用意して、一方の皿に測定したい少量の物質を置き、それを「試料皿」といい、もう一方を「基準皿」という（基準皿には試料物質を置いてはいけない）。2 つの皿を熱源の上に置き、熱源の温度をゆっくりと変える。熱源と 2 つの皿の間の熱伝導は同じとみなせる。2 つの皿には温度センサー（ダイオード）がついている。試料物質に相転移が起こらなければ、試料皿の温度 T_{samp} と基準皿の温度 T_{ref} はほぼ同じように変化する。このため T_{samp} が変化しても、 $\Delta T = T_{\text{ref}} - T_{\text{samp}}$ はわずかしか変化しない。試料物質に相転移が起こると、相転移が起こっている間 T_{samp} は変化しないので、 T_s と等しい温度を維持するが、 T_{ref} はそのまま変化し続けるので、 ΔT が大きく変化する。つまり、 T_{samp} に対して ΔT をプロットすると、急激に変化する。この ΔT の急激な変化に対応する T_{samp} が、まさに T_s である。

この実験の目的は、示差熱法と通常の方法とによって、純度の高い結晶物質の凝固点 T_s (50°C から 70°C の間にある) を求めることである。この実験で用いる試料物質の量は約 20 mg である。

2. 装置と部品

1. 熱源は 20 W のハロゲン・ランプである。
2. 皿の支持台はベークライトの板で、図 3 に示すように、その板にあいている穴に金属板がはめ込んである。金属板に 2 つの小さな磁石が付けてある。
3. シリコンダイオードが付いている 2 つの小さな円形の金属皿が、基準皿と試料皿である。これら 2 つの皿はそれぞれ磁石の上にある。これらの磁石が、磁力で皿と金属板をくっつけている。また、これらの磁石を通して、金属板と皿の間で熱が伝導する。灰色のプラスチック箱(図 10 の部品 15)によって、皿が外界からの影響を受けないようにしてある。

図 3 に、支持台、金属板、磁石ならびに ハロゲン・ランプの配置を示した。

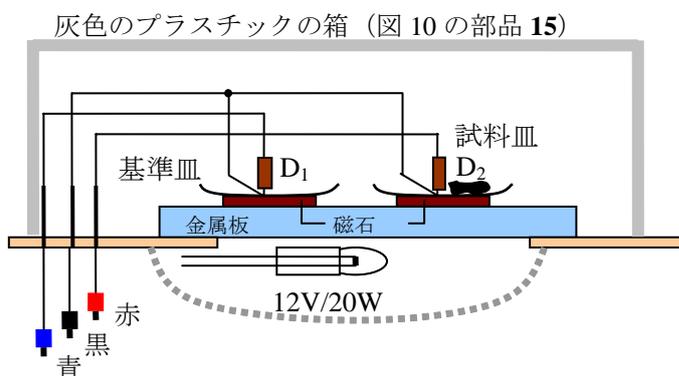


図 3. 凝固点を測定するための装置

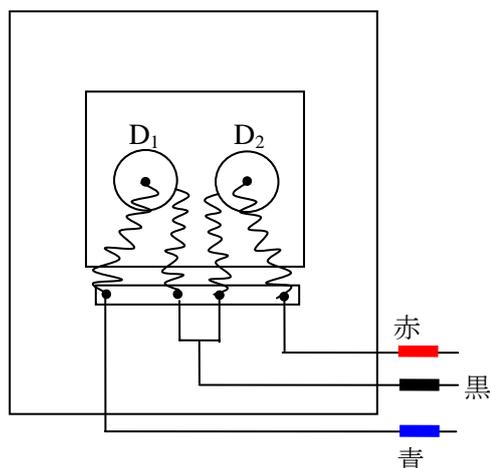


図 4. 皿の支持台を上から見た図

4. 電圧計として 2 つのマルチメーターを用いる。このマルチメーターは室温測定にも使われる。その場合は、端子には何も接続せず機能選択ダイヤル (Function selector) を「°C/°F」にあわせる。このマルチメーターの電圧測定に限って、誤差は、最小桁の数値に関して ± 2 である。それ以外の測定では、最小桁の読み取り誤差とする。

注: マルチメーター (図 9) の「自動的に電源が切れる (オートパワーオフ)」機能がはたらくのを防ぐ場合は、Select ボタンを押しながら、機能選択ダイヤル (Function selector) を OFF ポジションから必要なポジションに切り替える。

5. 図 2 に示す回路箱
6. 9 V の電池
7. 導線
8. 試料の入っている約 20 mg の試験管
9. ストップウォッチ
10. 電卓
11. グラフ用紙

3. 実験

1. 2 つの磁石は金属板上の対称な位置にあり、図 4 のように基準皿と空の試験皿が磁石の上においてある。左の皿は基準皿として用いるもので、ダイオード D_1 とつながっている (D_1 は「基準ダイオード」と呼ぶ)。右の皿は試験皿であり、ダイオード D_2 とつながっている (D_2 は「測定ダイオード」と呼ぶ)。

ランプのスイッチをオフ (OFF) にしたまま、図 5 のようにハロゲン・ランプのアームを伸ばして逆に倒してランプを上に向け、皿の支持台をランプの上におく。配線して、

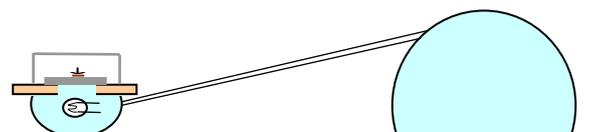


図 5 熱源として用いるハロゲン・ランプ

(図 10 の部品 1)

Experimental Problem

ダイオード D_2 の電圧 $V_{\text{samp}} = V_2$ と示差電圧 ΔV を測定できるようにする。

マルチメーターなどの作動が安定するためには、一定の時間が必要である。だから、測定を始める 5 分前には回路を接続してマルチメーターをオン(ON)にして電流を流して置くこと。

- 1.1. マルチメーターの温度測定機能を用いて、室温 T_0 を測りなさい。次に、試料皿に付いているダイオード D_2 の室温 T_0 での電圧 $V_{\text{samp}}(T_0)$ を測定しなさい。
 - 1.2. 上の測定値とダイオードの特性を表す式から、温度 50°C , 70°C , 80°C における測定ダイオード D_2 の電圧 $V_{\text{samp}}(50^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(70^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(80^\circ\text{C})$ の値を計算しなさい。
 2. 両方の皿にはまだ何も置かずに、ハロゲン・ランプのスイッチをオン(ON)にする。 V_{samp} を測定する。試料皿の温度が $T_{\text{samp}} \sim 80^\circ\text{C}$ に到達したら、ハロゲン・ランプをオフ(OFF)にする。
 - 2.1. $T_{\text{samp}} \sim 70^\circ\text{C}$ に下がるまで待ってから、 V_{samp} と ΔV の時間変化を測定しなさい。この間に金属板も冷却している。10 秒(s) から 20 秒(s) の間の一定時間間隔で、 V_{samp} と ΔV の値を測定し続け、解答用紙の表に記録しなさい。試料皿の温度が下がり、 $T_{\text{samp}} \sim 50^\circ\text{C}$ になったら、測定を止めなさい。ただし、 ΔV は正の場合も負の場合もある。
 - 2.2. 配布されたグラフ用紙に、横軸を t [s], 縦軸を V_{samp} [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 1」と書きなさい。
 - 2.3. 配布されたグラフ用紙に、横軸を V_{samp} [mV], 縦軸を ΔV [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 2」と書きなさい。
 3. 試験管から試料物質を試料皿に移す。上の 2. で述べた測定を同様に行う。
 - 3.1. 解答用紙の表に、時間 t に対して V_{samp} と ΔV のデータを記しなさい。 ΔV が急速に変化する場合は、測定する時間間隔を狭めなさい。
 - 3.2. このデータを用いて、配布されたグラフ用紙に、横軸に時間 t [s], 縦軸に V_{samp} [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 3」と書きなさい。
 - 3.3. 配布されたグラフ用紙に、横軸に V_{samp} [mV], 縦軸に ΔV [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 4」と書きなさい。
- 注意: それぞれのグラフ用紙にグラフの番号を忘れずに書くこと。

Experimental Problem

4. 上の 2. と 3. のグラフを比較することにより、試料物質の凝固点の温度を求める。
- 4.1. 通常の方法で T_s を求める。上の 3. と 2. における $t-V_{\text{samp}}$ グラフ (すなわち、グラフ 3 とグラフ 1) を比較することにより、試料物質の凝固点をグラフ 3 に記入し、凝固点に対応する V_{samp} の値 (V_s) を求め、グラフからその誤差も求めなさい。これから、この試料物質の凝固点の温度 T_s を求め、その誤差をグラフから評価しなさい。
- 4.2. 次に、示差熱法を用いて T_s を求める。上の 3. と 2. における $V_{\text{samp}} - \Delta V$ グラフ (すなわち、グラフ 4 とグラフ 2) を比較することにより、試料物質が凝固し始めた点をグラフ 4 に記入し、この凝固点に対する V_{samp} の値 (V_s) を求め、グラフからその誤差も求めなさい。これから、この試料物質の凝固点の温度 T_s を求めなさい。
- 4.3. 測定データの誤差と装置の測定精度から、示差熱法によって得られた T_s の誤差を計算しなさい。誤差計算の過程を解答用紙に書き、最後に T_s の値と誤差の値を解答用紙に記入しなさい。

C. 課題 2: ハロゲン・ランプの照明の下で太陽電池の発電効率を決定する

1. 実験の目的

実験の目的は、ハロゲン・ランプの照明の下で太陽電池の発電効率を決定することである。発電効率とは、太陽電池が外部回路に供給することができる電力を、太陽電池が受け取る光量(単位時間当たりの光のエネルギー)で割った値として定義される。この効率は、入射する光線のスペクトルに依存する。この実験では、白熱したハロゲン・ランプから放射された白色光を、太陽電池に照射する。太陽電池の効率を決定するために、太陽電池の発電効率が最大値 P_{\max} のとき、ランプの真下に距離 d だけ離れた位置における光の強度 E を測定する必要がある。この実験では、 $d = 12 \text{ cm}$ とする(図 6)。光の強度 E は次によって定義される:

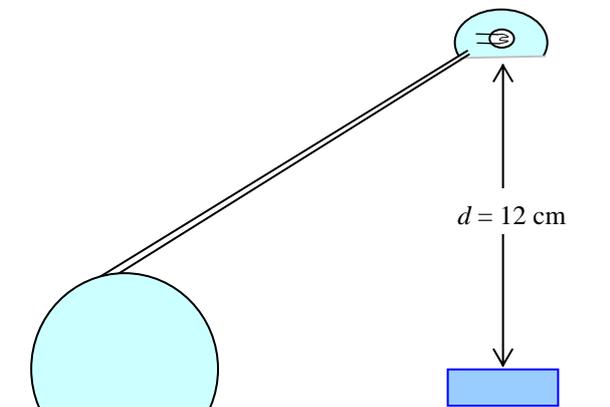


図 6 光源にはハロゲン・ランプを使用する。

$$E = \Phi / S$$

ここで、 Φ は光量(単位時間当たりの光のエネルギー)、 S は光が照射された部分(検出器または太陽電池)の面積であり、後で測定する。

2. 装置と部品

1. 光源となる 20W のハロゲン・ランプ
2. 輻射検出器

輻射検出器(図 7)は銅で作られた中空の円錐であり、その内部表面は煤によって黒くなっている。

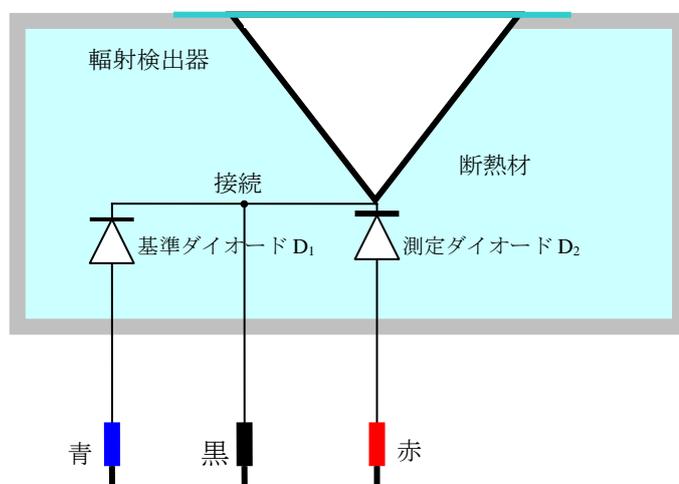


図 7. 輻射検出器 (図 10 の部品 11)

円錐とその外側との断熱は不完全である。この実験において、検出器は理想的な黒体と考える。すなわち、検出器は光をすべて熱に変換すると考える。温度を測定するためにシリコンダイオードを使っている。測定ダイオード(図 1 と図 7 における D_2)は検出器に固定されており、検出器と同じ温度になっている。基準ダイオードは検出器を収容している箱の内壁に置かれ、その温度は外気の温度と等しい。検出器の全熱容量(円錐と測定ダイオードの熱容量の和)は $C = (0.69 \pm 0.02) \text{ J/K}$ である。検出器は、その入り口が非常に薄いポリエチレンフィルムによって覆われており、そのフィルムによる光の吸収は無視できるとする。

3. 図 2 に示す回路ボックス

4. プラスチックの箱に取り付けられた太陽電池(図 8)

太陽電池は、いくつかの銀色の筋状の金属部分を含む。太陽電池の発電効率を計算するときには、これらの部分も太陽電池の一部として面積を計算に含める。

5. 2 つのデジタル・マルチメーター

電圧測定に使う時には、その内部抵抗は非常に大きい(それは無限大と考えることができる)。また、電流測定に使う時には、内部抵抗は小さいが無視できない。マルチメーターは、機能選択ダイヤル(Function selector)をまわして、室温を直接測定することもできる。電圧測定に限り、誤差は、最小桁の数値に関して ± 2 である。それ以外の測定では、最小桁の読み取り誤差とする。

注:マルチメーター(図 9)の「自動的に電源が切れる(オートパワーオフ)」機能がはたらくのを防ぐ場合は、Select ボタンを押しながら、機能選択ダイヤル(Function selector)を OFF ポジションから必要なポジションに切り替える。

6. 9V の電池

7. 可変抵抗器

8. ストップウォッチ

9. 最小目盛 1 mm の定規

10. 導線

11. グラフ用紙

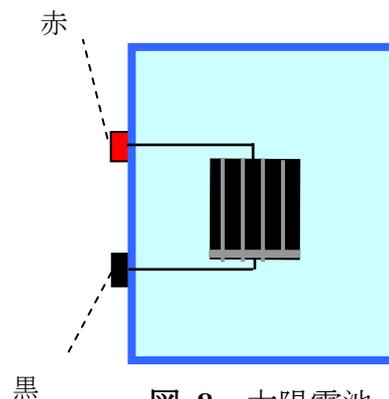


図 8 太陽電池

(図 10 の部品 12)

3. 実験

検出器が光からエネルギーを受けると、熱くなる。同時に、検出器は様々なメカニズムで熱を失う。例えば、熱伝導、対流、放射などである。よって、検出器が微小時間 dt に受け取る光のエネルギーは、検出器の温度を上昇させるのに必要なエネルギーと検出器から周囲に逃げるエネルギー（エネルギー損失量）の和である。

$$\Phi dt = CdT + dQ$$

ここで、 C は検出器とダイオードの熱容量であり、 dT は温度上昇、 dQ はエネルギー損失量である。

検出器と周囲との温度差 $\Delta T = T - T_0$ が小さければ、時間 dt の間に検出器から周囲に逃げるエネルギー dQ は近似的に ΔT と dt に比例し、 $dQ = k\Delta T dt$ となる。ここで、 k は W/K の単位をもつ係数である。よって、 k が一定で、 ΔT が小さいときは、

$$\Phi dt = CdT + k\Delta T dt = Cd(\Delta T) + k\Delta T dt$$

すなわち、
$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C} \Delta T = \frac{\Phi}{C} \quad (4)$$

が得られる。この微分方程式の解によって一定の光量の光を受け取り始めた瞬間からの温度差 ΔT が、時間 t の関数として決まる。 $t=0$ のとき、 $\Delta T = 0$ とすると、

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

光を当てるのを止めれば、上に述べた微分方程式は、

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

となり、温度差 ΔT は次の式にしたがって変化する。

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

ここで $\Delta T(0)$ は時刻 $t=0$ （測定が始める時刻）における温度差である。

1. マルチメーターの温度測定機能を用いて、室温 T_0 を測定しなさい。
2. 検出器の温度を測定するために、ダイオード・センサー、回路ボックス、マルチメーターからなる電気回路を組み立てなさい。
装置の作動が安定するまでに生じる誤差を防ぐために、実際に実験を始める

5 分前には、回路をすべてオン(ON)にして電流を流しておくこと。

- 2.1. 図 6 のように、検出器をハロゲン・ランプの下に距離 $d = 12 \text{ cm}$ のところに置きなさい。ランプを OFF にして、約 2 分間 10 s 間隔で ΔV の変化を測定し、それから方程式(3)の $\Delta V(T_0)$ の平均値および誤差を求めなさい。
- 2.2. ハロゲン・ランプを ON にして、検出器を照らす。 ΔV の変化を測定しなさい。10~15 s の間の適切な一定時間間隔ごとに ΔV の値を記録しなさい (注意: 解答用紙の表のうち、 x と y の欄は、下記の 4. で使用する)。2 分後、ハロゲン・ランプを OFF にして、冷めないうちに、すぐに 次の測定に移りなさい。
- 2.3. 検出器をハロゲン・ランプから離しなさい。それ以降、冷却中の約 2 分間 ΔV の変化を測定しなさい。10~15 s の間の適切な一定時間間隔ごとに ΔV の値を記録しなさい。(注意: 解答用紙の表のうち、 x と y の欄は、下記の 3. で使用する)

問 2 のヒント:

熱慣性とよばれる性質のために、検出器に光が照射されはじめた直後と照射をやめた直後の数点は使用しないこと。

3. ハロゲン・ランプのスイッチを切った後、方程式(7)が成り立つことを利用して、横軸を x 、縦軸を y として、グラフが直線になるように x 軸と y 軸に適当な変数を選んでグラフを描く。
 - 3.1. 変数 x と y として適切な表式を書きなさい。
 - 3.2. 2.3 の解答用紙の表に x と y の数値を記入し、 y を縦軸、 x を横軸として、グラフを描きなさい。そのグラフの右上に「グラフ 5」と書きなさい。
 - 3.3. そのグラフの勾配から k の値を求めなさい。
4. 検出器に光が入射している時に方程式(5)が成り立つことを利用し、横軸を x 、縦軸を y として、光の強度を求めるために、 x 軸と y 軸に適当な変数を選んでグラフを描く。
 - 4.1. 変数 x と y として適切な表式を書きなさい。
 - 4.2. 前問の結果を利用して 2.2 の解答用紙の表に x と y の数値を計算して記入し、それをもとに、 y を縦軸、 x を横軸として、グラフを描きなさい。そのグラフの右上に「グラフ 6」と書きなさい。
 - 4.3. 検出器の開口部の面積を測定し、上で描いたグラフの勾配から、開口部における単位時間当たりの光の強度 E を求めなさい。
5. 太陽電池を検出器と同じ位置に来るように置きなさい。太陽電池にマルチメー

Experimental Problem

ターと可変抵抗を接続して、測定に適切な回路を作る。その際、端子の横の穴を利用して結線する。可変抵抗は太陽電池の負荷を変えるために使用する。回路に流れる電流と太陽電池の電圧を、異なる抵抗値に対して測定する。マルチメーターを電流計として使用する際、接続する端子の位置に注意すること。

- 5.1. この実験に用いる回路図を描きなさい。
- 5.2. まず、可変抵抗についているノブを時計回りにいっぱいに戻し、そこから反時計回りに徐々に回し、電流値 I を変化させ、そのときの電圧値 V を記録しなさい。その際、電流値が適当な間隔になるように変化させること。
- 5.3. その結果から、太陽電池が負荷に供給する電力を計算し、それを縦軸、太陽電池に流れる電流を横軸としてグラフを描きなさい。そのグラフ用紙の右上に「グラフ 7」と書きなさい。
- 5.4. このグラフから最大電力 P_{\max} を読み取り、その誤差を求めなさい。
- 5.5. その最大電力における太陽電池の発電効率を与える式を書きなさい。なお、発電効率の定義は、実験の目的に述べられている。太陽電池の面積を測定し、さらに、上で求めた最大電力および光の強度の値を用いて、この式から発電効率の値と誤差を計算しなさい。

Experimental Problem

実験装置の名称(装置の番号は図 10 を参照しなさい)

1	ハロゲン・ランプ 220V/ 20W	9	ストップウォッチ
2	皿の支持台	10	関数電卓
3	皿	11	輻射検出器
4	マルチメーター	12	太陽電池
5	回路ボックス(図 2 参照)	13	可変抵抗器
6	9 V の電池	14	定規
7	導線	15	灰色のプラスチックの箱
8	試料の入った試験管		

注:マルチメーター(図 9)の「自動的に電源が切れる(オートパワーオフ)」機能がはたらくのを防ぐ場合は, **Select** ボタンを押しながら, 機能選択ダイヤル(**Function selector**)を **OFF** ポジションから必要なポジションに切り替えます。



図 9. マルチメーター

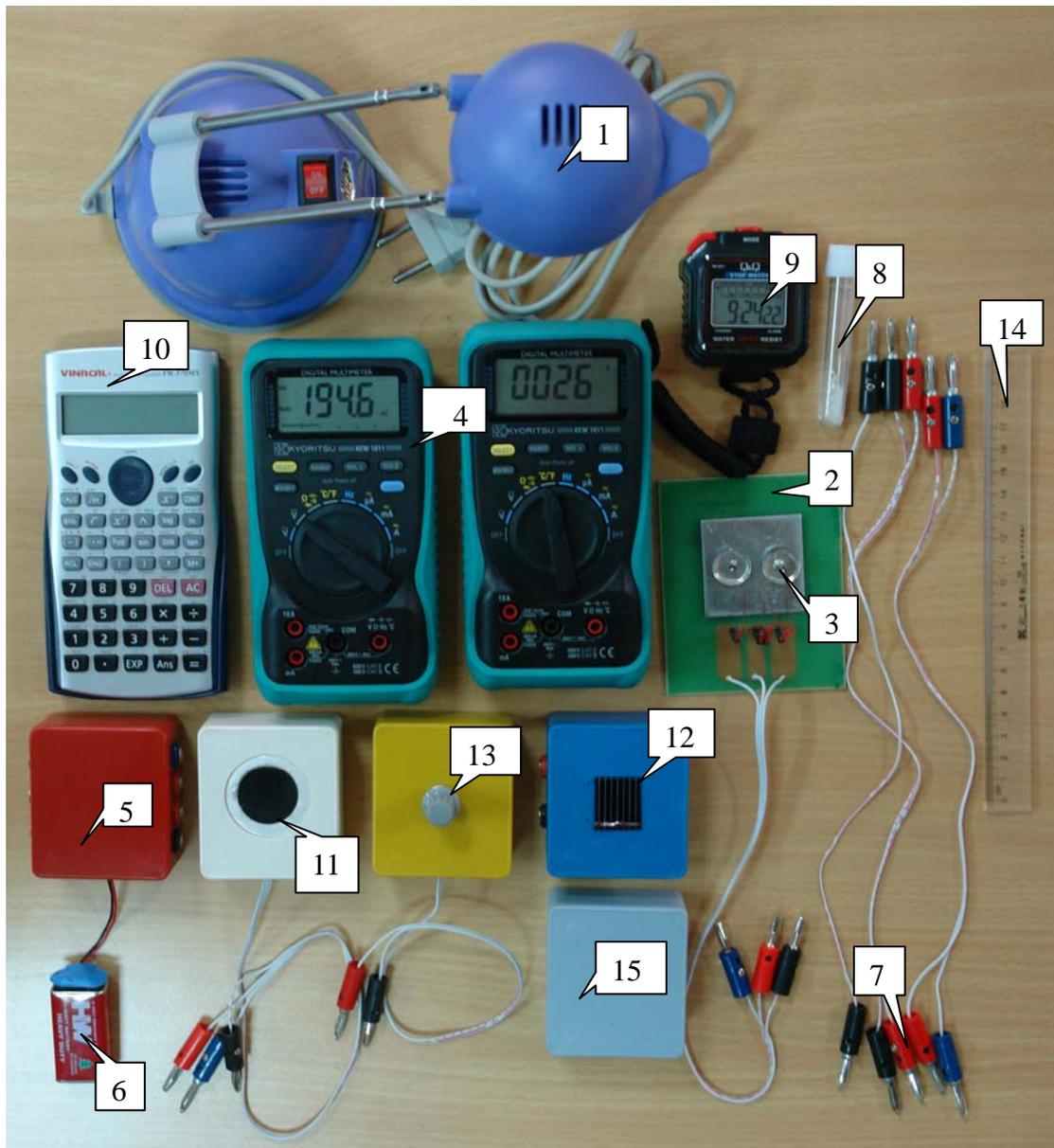


図 10. 実験キットの装置と部品