

# 実習 B 材料工学

三軒家 佑將

## 1 実習の目的

簡単な Si デバイス（太陽電池）の作製を通じて、Si デバイスの作製方法について理解を深める。  
また、太陽電池・LED の動作特性について理解を深める。

## 2 バイポーラ集積回路について

太陽電池の作製プロセスを図にすると図 1 のようになる。

図の説明は以下のようである。

- ①→② Si 基盤を熱酸化し、酸化膜を作成
- ②→③ フォトリソグラフィを行い、図のようにフォトレジストを作成する
- ③→④ エッチングを行い、酸化膜を剥がす
- ④→⑤ フォトレジストを除去する
- ⑤→⑥ 上面にリン拡散源を、下面にホウ素拡散源を塗布する
- ⑥→⑦ 熱拡散を行い、 $n^+ - Si$  と  $p^+ - Si$  を形成する
- ⑦→⑧  $SiO_2$  を除去する
- ⑧→⑨ 電極を形成

## 3 実験で行った内容、条件

### 3.1 太陽電池の作製

前節のプロセスに従って、太陽電池を作製した。その際の条件について以下に示す。

Si 基盤として用いたのは、p 型 Si ウェーハから切断した  $12mm \times 12mm$  の正方形、厚さ  $250\mu m$  の小片である。

熱酸化膜形成については、 $1100^\circ C \cdot 90$  分のドライ加熱を行った。

フォトリソグラフィに際しては、

1. プリベーク  $90^\circ C$  90 秒

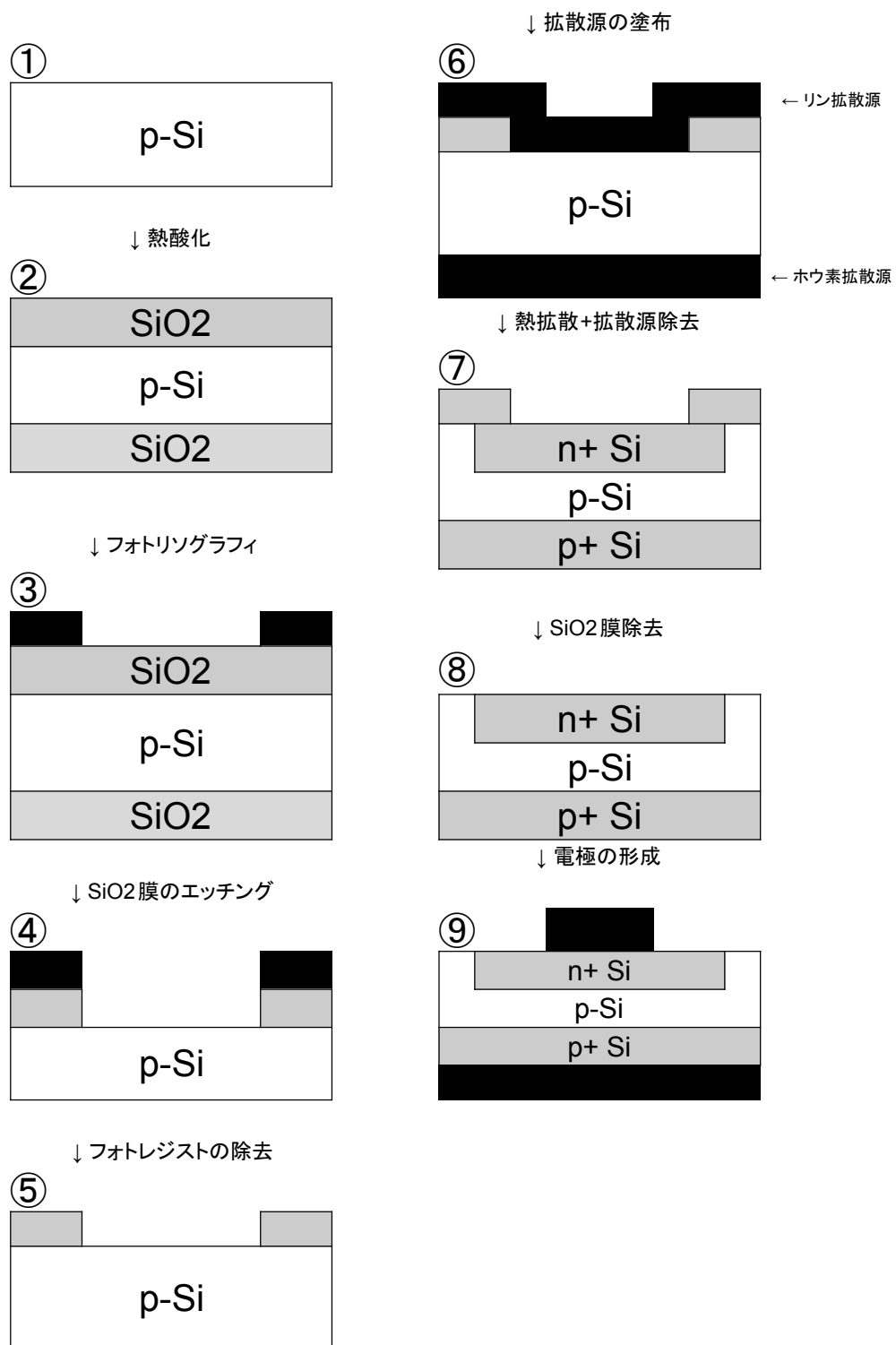


図1 太陽電池の作製プロセス

2. 露光 40 秒
3. 反転ベーク 120 °C 90 秒
4. 露光 180 秒
5. 現像 90 秒
6. ポストベーク 120 °C 30 秒

の順番で行った。また、スコンピータは 4000rpm で 30 秒動作させ、現像の際のマスクには  $8\text{mm} \times 8\text{mm}$  の正方形のものを用了。

拡散源塗布の際には、拡散源を塗布した後に、120 °C 3 分のベークを行った。

熱拡散は、900 °C 3 分のベークを行った。

電極形成の際には、手法としては真空蒸着を、電極用の金属としては Al を用了。また、表面のマスクには葉脈のような形状のものを、裏面のマスクとしては正方形のものを用了。

また、出来上がった太陽電池には、導電性ペーストを用いて、裏面には電子回路基板の金属部分を接着し、表面には細い導線を接着した。

### 3.2 太陽電池の特性測定

以下の回路（図 2, 図 3）を用いて、自作した太陽電池と市販の太陽電池の特性を測定した。暗所での特性は図 2 の回路を用い、電灯で照らしたときの特性は図 3 の回路を用いた。電灯で照らしたときの特性については、電灯の高さが、5cm, 15cm, 25cm の 3 つの場合について特性を調べた。

### 3.3 LED の特性測定

図 2 と同様の回路を用いて、市販の赤・黄・緑・青・白色の LED の特性を測定した。

## 4 実験結果

### 4.1 太陽電池の作製

（割愛）

### 4.2 太陽電池の特性測定

班員 4 名の太陽電池について、それぞれ V-I 特性をグラフにしたのが図 4～図 7 である。

また、図 8 は、市販の太陽電池の特性である。

### 4.3 LED の特性測定

五色の LED について、V-I 特性をグラフにしたのが図 9 である。

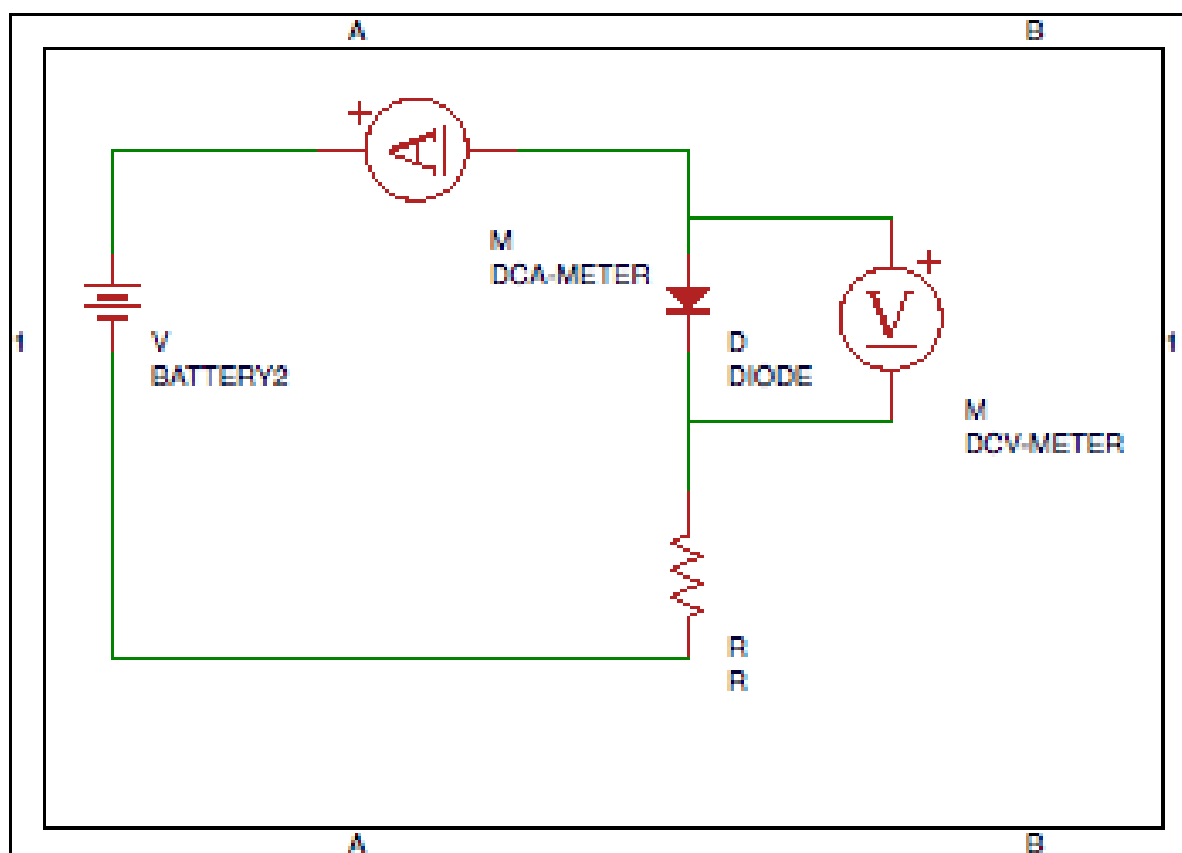


図 2 暗所の測定回路

また、これらを色ごとに片対数グラフにプロットし、傾きを求めたのが図 10～図 14 である。

## 5 課題 1～3

### 5.1 課題 1

4.2 の結果を見ると、名倉・三軒家と中川・板野の 2 つのグループに分かれていることがわかる。以下では、2 つのグループの代表として、三軒家と中川の太陽電池について考察をすすめる。このような 2 つのグループに分かれてしまったのは、太陽電池の表側の電極が  $p^+$  領域にはみ出てしまい、ダイオードに平行な抵抗が接続されたような状態になってしまったことが原因と考えられる。太陽電池だけの特性を見るためには、グラフの直線部分から並列抵抗の値を求め、そこに流れる電流値を計算して、実験データの電流値から引けば良いと考えられる。以上のような操作を中川の太陽電池の特性に対して行くと、図 15 のようになる。これを見ると、他方のグループの暗所での特性とよく似た形状のグラフが得られる事がわかる。

図 4 の暗所のデータと、図 15 のデータについて、片対数グラフにプロットすると、図 16・図 17 のようになる。

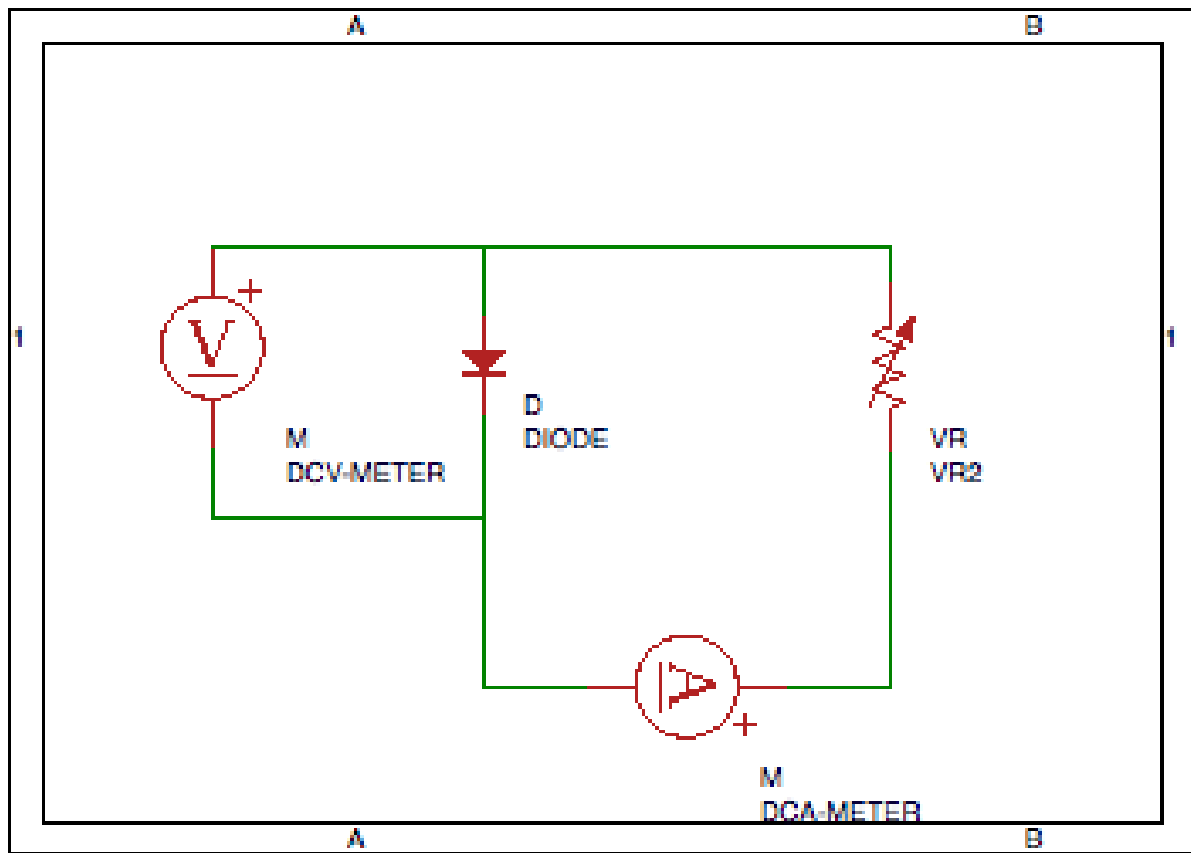


図 3 光照射時の測定回路

ダイオードの I-V 特性は、

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

のように表され (e: 電気素量, n: 理想ダイオード因子, k: ボルツマン定数, T: 絶対温度)、V があ  
る一定の範囲のとき、

$$\begin{aligned} I &\approx I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \\ \therefore \log I &\approx \frac{e}{nkT} V + \log I_0 \end{aligned} \quad (2)$$

と近似できる。図 16・図 17 の直線部分が、式 (2) によって近似できるとすると、それぞれ、

**三軒家**  $\frac{e}{nkT} = 10.4, \therefore n = 3.72$

**中川**  $\frac{e}{nkT} = 8.06, \therefore n = 4.80$

となる。I が拡散電流と再結合電流のみによると考えると、n は 1~2 の値になると考えられるの  
で、この結果と一致しない。

このことの説明としては、Si 基板中のトラップに一部のキャリアが捕らわれてしまい、電流に寄  
与しなくなってしまった、ということが考えられる。ただし、図 16・図 17 の直線部は、外れ値は

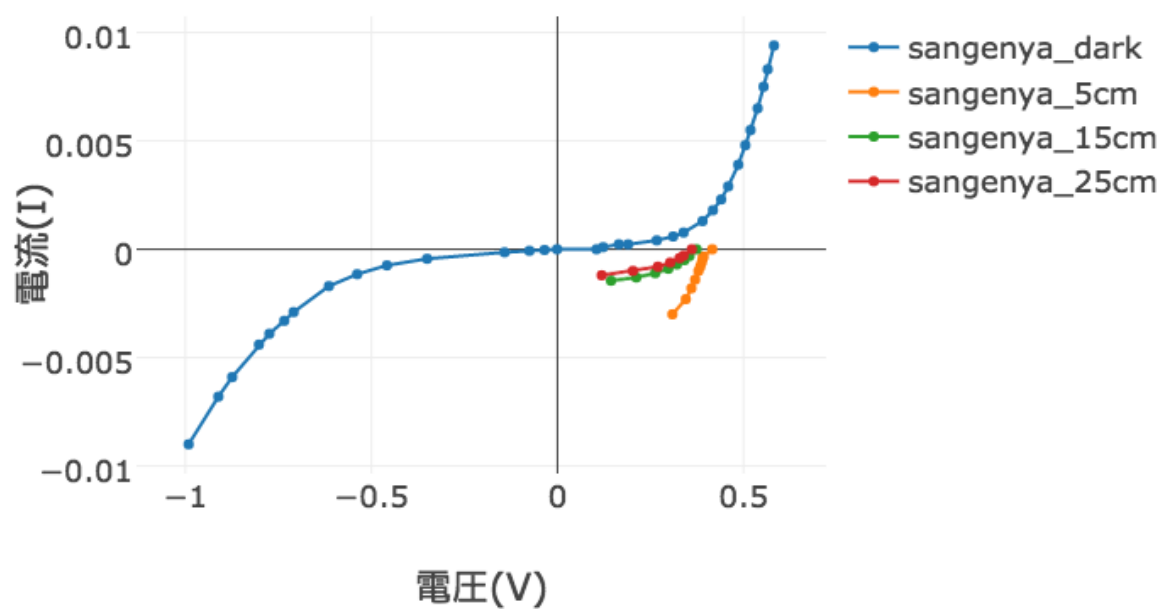


図4 三軒家の太陽電池の特性

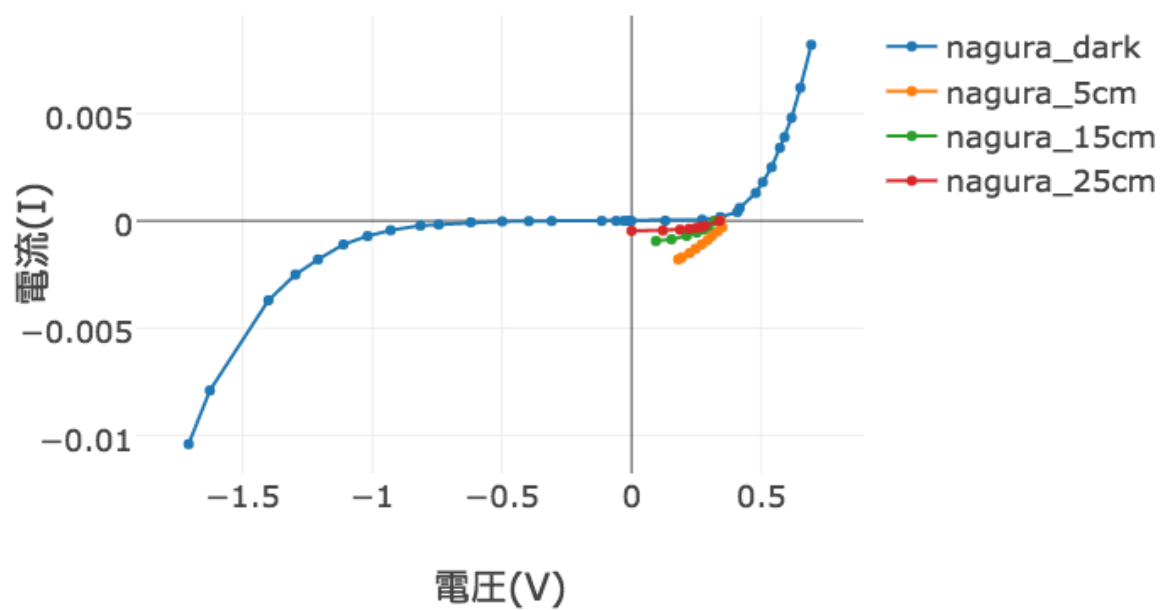


図5 名倉の太陽電池の特性

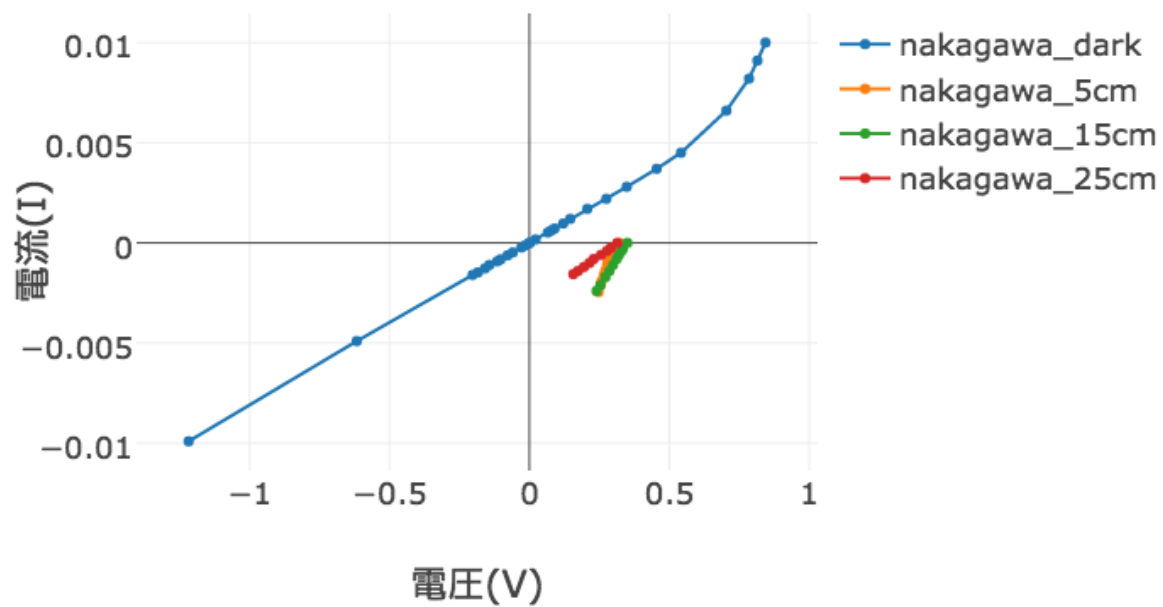


図6 中川の太陽電池の特性

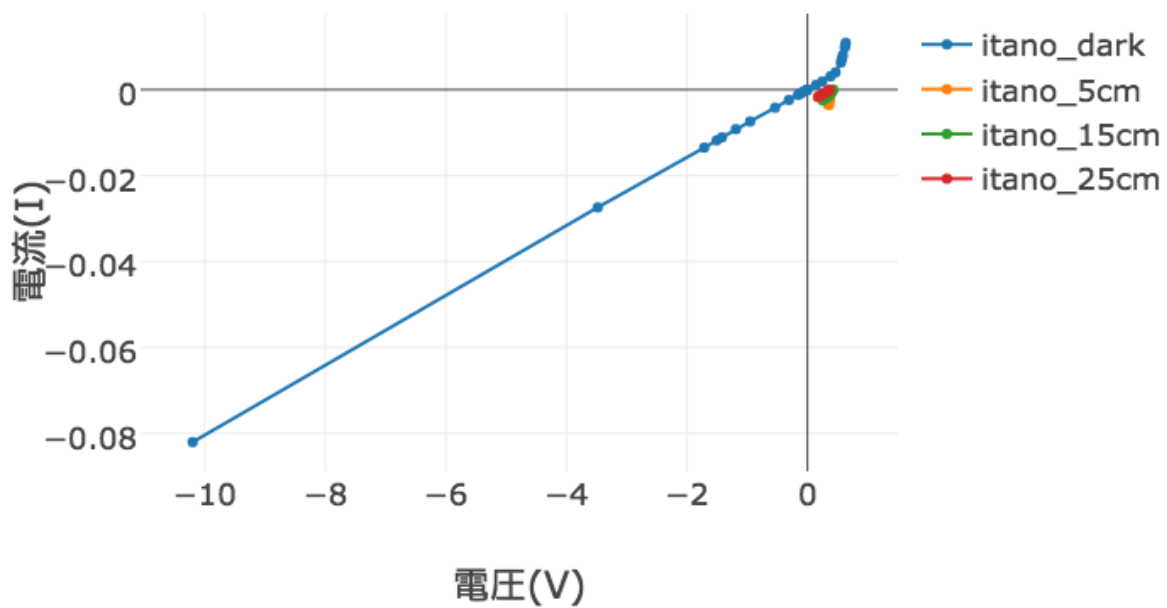


図7 板野の太陽電池の特性

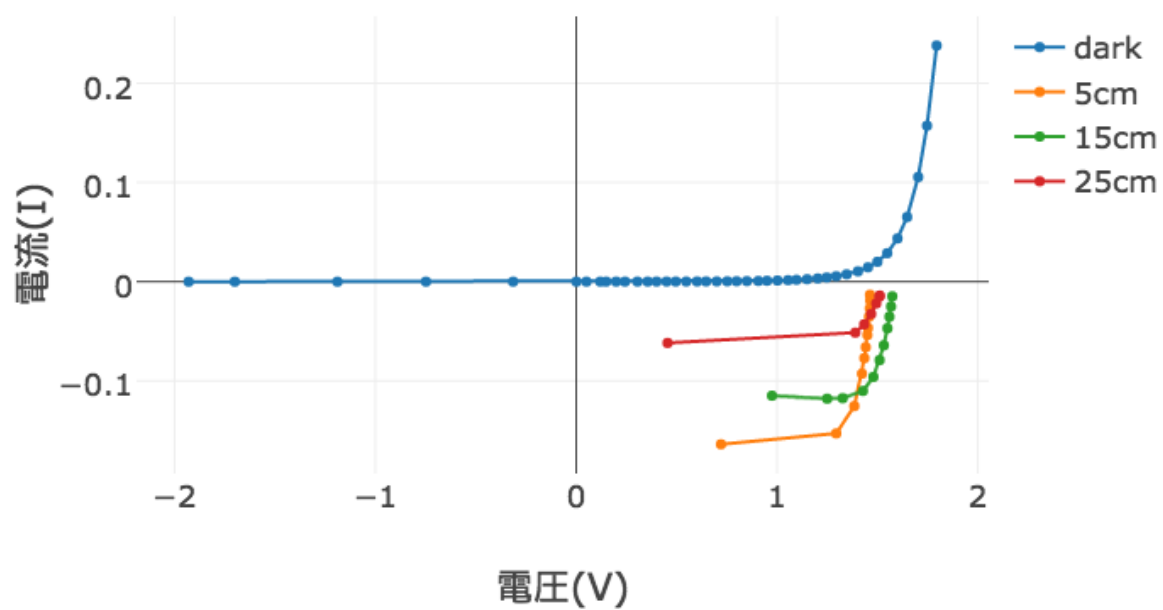


図8 市販の太陽電池の V-I 特性

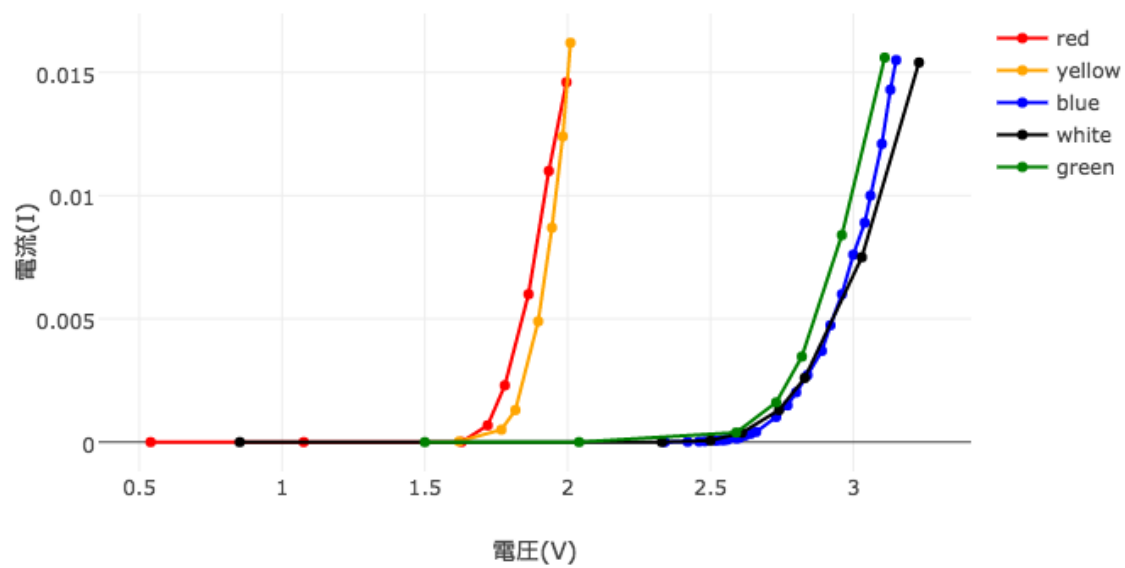


図9 LED の特性



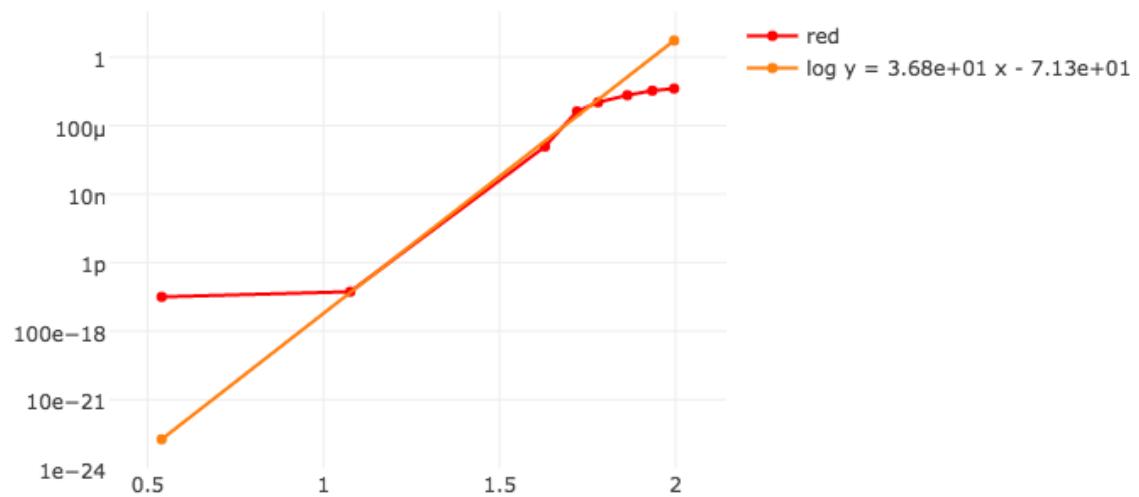


図 10 赤色 LED の特性 (片対数)

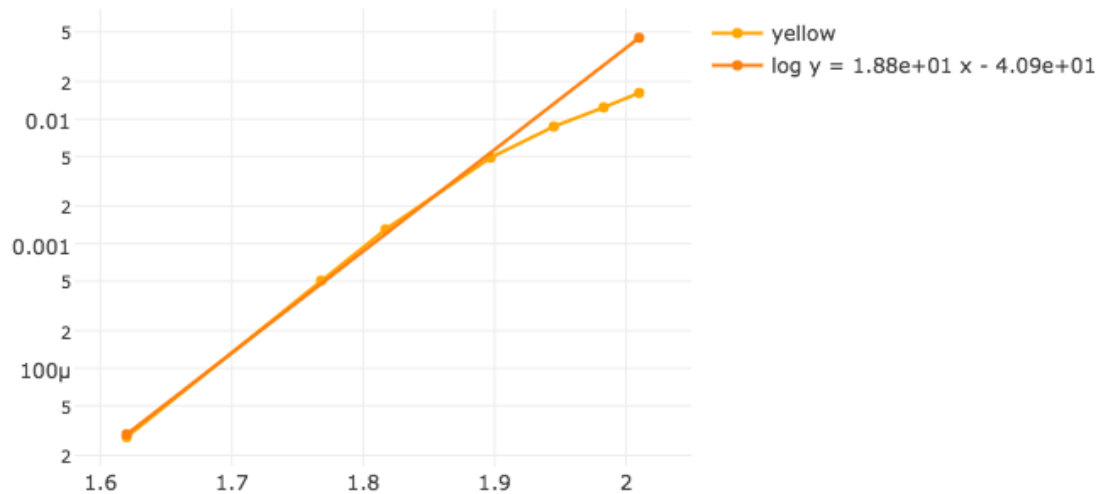


図 11 黄色 LED の特性 (片対数)

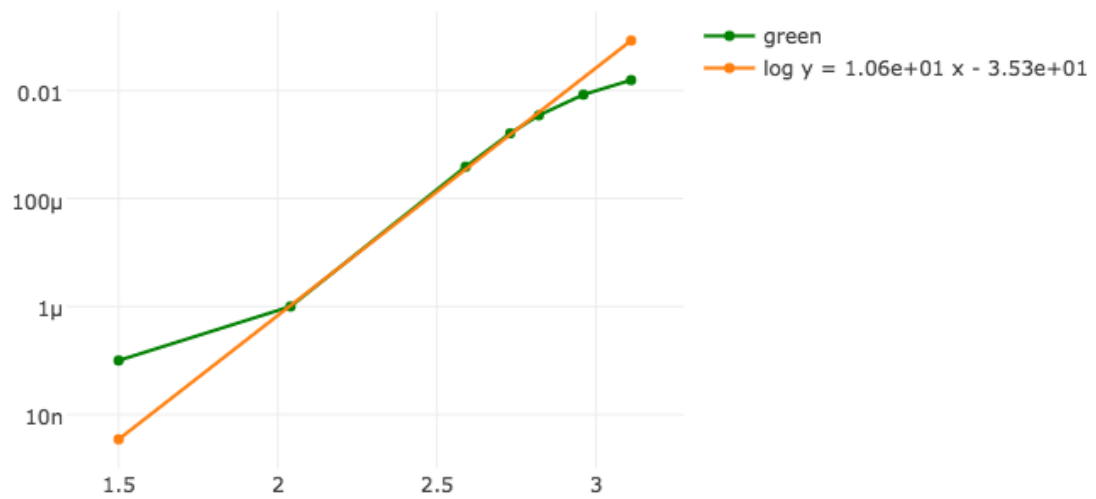


図 12 緑色 LED の特性 (片対数)

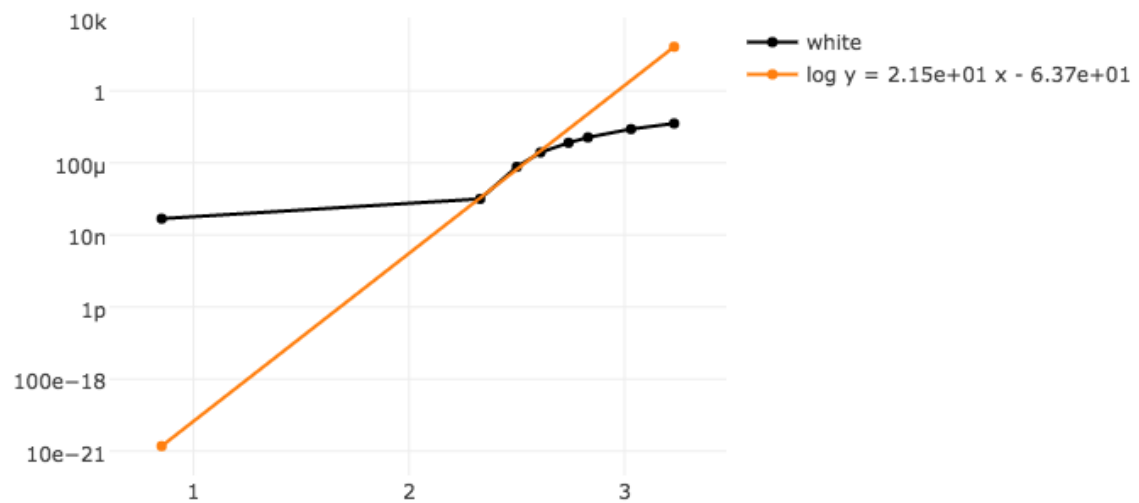


図 13 白色 LED の特性 (片対数)

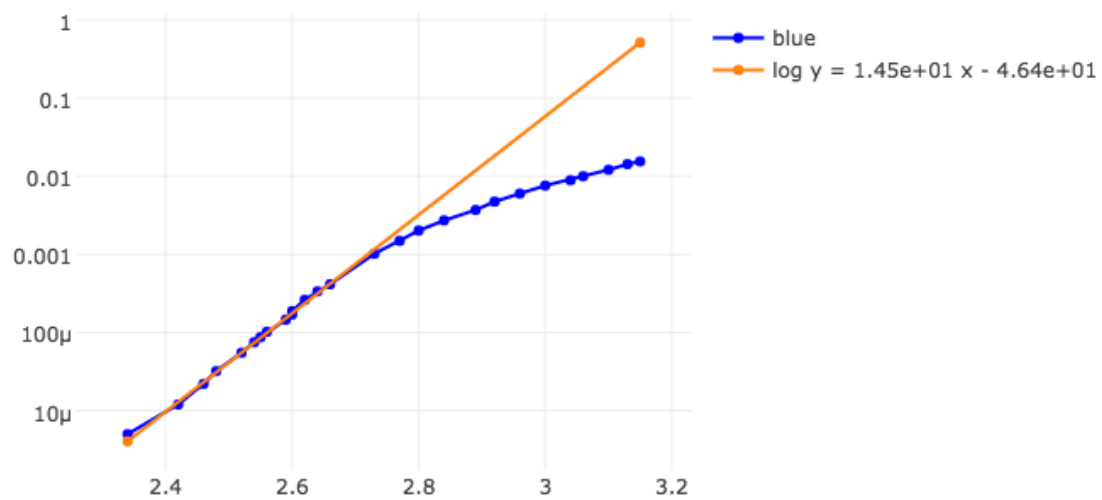


図 14 青色 LED の特性 (片対数)

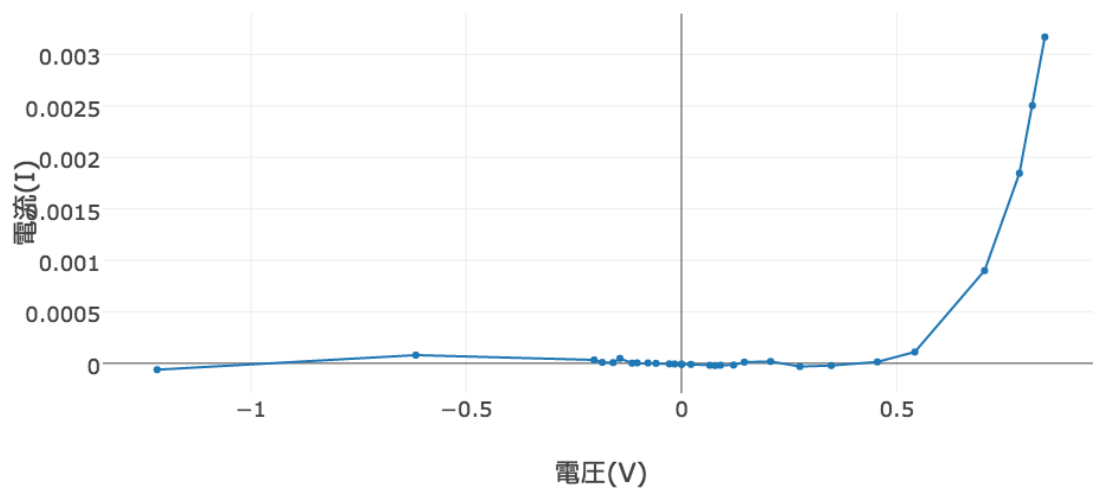


図 15 中川の太陽電池のダイオード部のみの特性 (暗所)

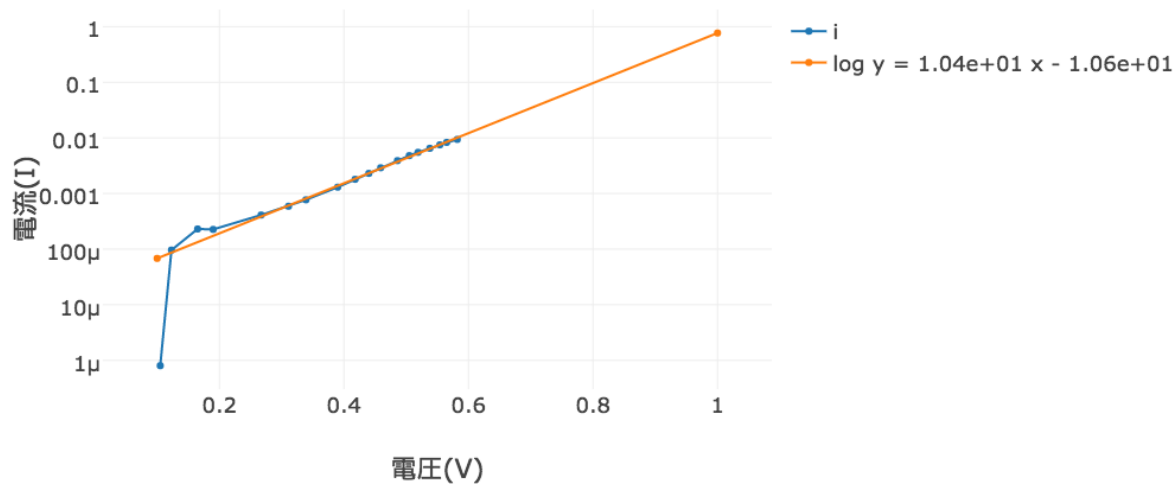


図 16 三軒家の太陽電池の特性 (片対数)

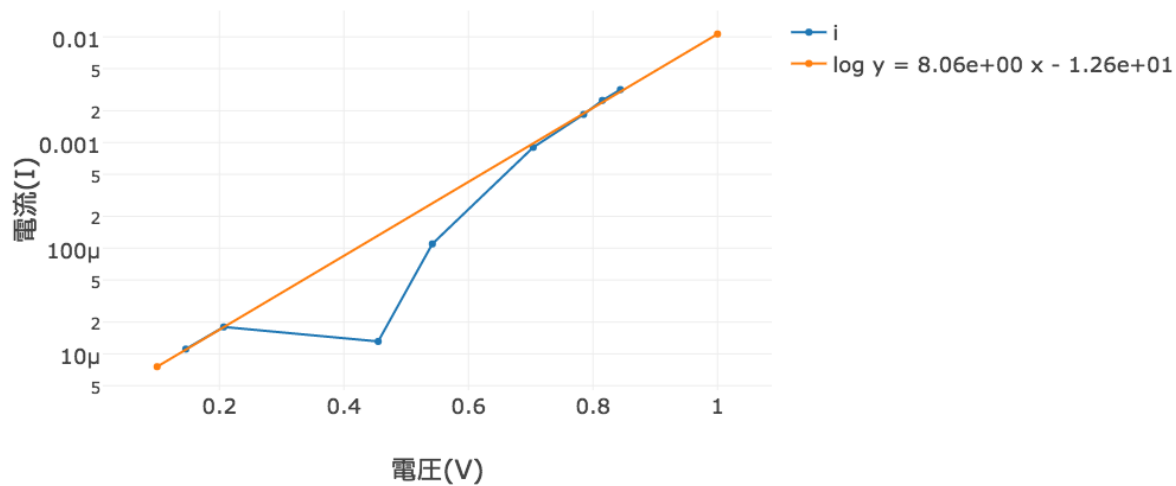


図 17 中川の太陽電池の特性 (片対数)

あるにせよ、きれいな直線になっていることから、トラップの効果も  $V$  に対する指数関数で表されることが必要と考えられるが、実際にそうであるのかは調べてもわからなかった。

## 5.2 課題 2

開放電圧  $V_{oc}$  は表 1、短絡電圧  $I_{sc}$  は表 2、変換効率  $\eta$  は表 3、曲線因子 FF は表 4 のようになった。ただし、 $I_{sc}$  については、各光量の場合について、電圧が最小であるような点の電流を  $I_{sc}$  と

した。また、最適動作点については、測定された各点について出力を計算し、最大となった電圧と電流の組を最適動作点としたところ、表5のようになった。

また、太陽電池に入力された光のエネルギーは、太陽電池の  $n^+$  の部分が  $8mm \times 8mm$  の正方形であったと考えて計算した結果から、以下のものであったとした。

高さ 5cm のとき 67.2(mW)

高さ 15cm のとき 27.2(mW)

高さ 25cm のとき 17.3(mW)

name	5cm(V)	15cm(V)	25cm(V)
sanganya	0.416	0.374	0.361
nagura	0.350	0.320	0.339
nakagawa	0.322	0.350	0.314
itano	0.422	0.428	0.370

表1 開放電圧  $V_{oc}$

name	5cm(I)	15cm(I)	25cm(I)
sanganya	3.00e-03	1.45e-03	1.20e-03
nagura	1.80e-03	9.40e-04	4.66e-04
nakagawa	2.45e-03	2.40e-03	1.56e-03
itano	3.38e-03	2.50e-03	1.70e-03

表2 短絡電流  $I_{sc}$

name	5cm(%)	15cm(%)	25cm(%)
sanganya	1.379	1.064	1.256
nagura	0.500	0.548	0.476
nakagawa	0.901	2.118	1.417
itano	1.902	2.325	1.745

表3 変換効率  $\eta$

### 5.3 課題3

図8を図4～図7と比較すると、市販の太陽電池の以下のような特長が見て取れる。

name	5cm	15cm	25cm
sangenya	0.232	0.533	0.501
nagura	0.237	0.496	0.520
nakagawa	0.730	0.686	0.500
itano	0.443	0.591	0.479

表 4 曲線因子 FF

name	5cm(V, I)	15cm(V, I)	25cm(V, I)
sangenya	(0.309, -3.00e-03)	(0.263, -1.10e-03)	(0.270, -8.04e-04)
nagura	(0.224, -1.50e-03)	(0.213, -7.00e-04)	(0.249, -3.30e-04)
nakagawa	(0.247, -2.45e-03)	(0.240, -2.40e-03)	(0.157, -1.56e-03)
itano	(0.359, -3.56e-03)	(0.253, -2.50e-03)	(0.201, -1.50e-03)

表 5 最適動作点

1. 立ち上がり電圧が高い
2. 最適動作点の電圧が高い
3. 降伏電圧がより低い（降伏し難い）
4. より多くの電流が生じている

このうち、1,2,3 については、市販の太陽電池は、3つの小さな太陽電池を直列に接続した構造をしていることから説明できる。1 と 3 については、太陽電池全体に印加した電圧の 3 分の 1 しか個々の太陽電池に電圧が印加されないことから説明できる。2 については、全体の出力電圧は個々の太陽電池の出力電圧の和になると考えられることから説明できる。

また、4 については、太陽電池の面積の違いから説明できる。すなわち、市販の太陽電池は光を受ける面積が大きいため、電池内により多くのキャリアが励起され、大きな電流が流れると考えられる。

## 6 発電コンテンツについて

まず考えたのが、太陽電池を 1 つからだんだんと増やしていき、それぞれの場合について、いろいろな接続方法を試してみよう、ということだった。このときに測定した特性をグラフにしたのが、図 18 である (s は series の略、p は parallel の略)。この測定から分かったのは、須田先生が言っていたとおり、全部直列にしても全部並列にしても、どちらにしても成績が悪く、直列と並列を組み合わせたほうが成績が良くなるということだった。

これが分かったので、今度はより成績の良い組み合わせ方を模索するべく、3 × 3 などの接続方法を試していたが、すべての接続方法を試す前に時間切れになった。

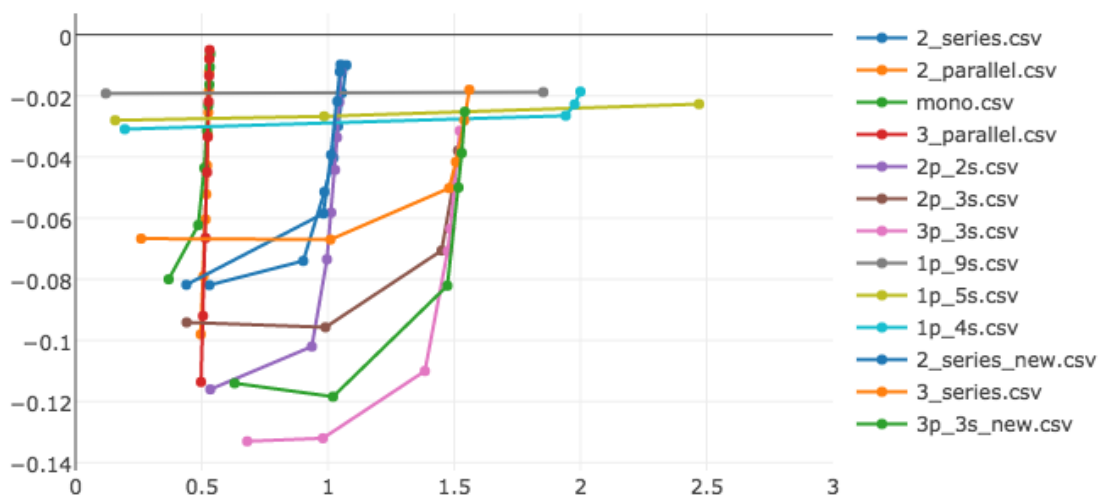


図 18 太陽電池のつなぎ方による特性の変化

また、この測定中、回路のつなぎ方に関係なく、太陽電池が正方形に近い形になるように配置して測定を行っていた。これは、電球の真下の一番光が強い場所になるべく近いところで発電させれば、より大きな出力が得られると考えたからである。

こうやればよかったと思ったことは主に2つある。1つは、結果論ではあるが、まず先に当て勘で  $2 \times 5$  や  $5 \times 2$  や  $3 \times 3$  などの、成績が良さそうな組み合わせを試してから、数が少ないときの傾向を調べたほうが良かったということである。時間切れになることは予測できたと思う。もう1つは、ダイオードの特性の温度依存性を利用するために、太陽電池を温めたり冷やしたりして発電量の変化を見て、最適な温度を探すということである。

## 7 LED について

### 7.1 色によって立ち上がり電圧が違うのはなぜか

LED から放射される光の波長は、用いる半導体のバンドギャップに反比例する。そのため、光の波長を変えるには、異なるバンドギャップを持つ半導体を用いる必要がある。ところで、ダイオードの V-I 特性の式 (1) の  $I_0$  は、バンドギャップ  $E_g$  を用いて、

$$I_0 = A \exp(-a \times E_g)$$

のような式で表される ( $A, a$  は正の定数)。  $I_0$  の変化は、立ち上がり電圧の変化として観測されるため、色が異なる LED の立ち上がり電圧は互いに異なるのである。

図 9 の赤・黄と青・緑・白がそれぞれ同じぐらいの立ち上がり電圧になっているのは、赤色は黄色 LED の光を、緑色・白色は青色 LED の光をそれぞれ利用することで実現されているからである。詳細は 7.3 に譲る。

## 7.2 $n$ 値はどのぐらいか

図 10～図 14 の傾きから  $n$  値を求めると、

赤	$n = 1.07$
黄	$n = 2.10$
青	$n = 2.72$
白	$n = 1.84$
緑	$n = 3.74$

のようになった。

## 7.3 白色 LED の原理

大まかには 2 つの方式がある。

1 つは、補色関係にある青色と黄色の光を組み合わせることで白色の光を作る方式である。黄色の光から青色の光を作ることはできないので、青色 LED と、その光を受けて発光する黄色蛍光体で実現される。

もう 1 つは、光の三原色 (赤・緑・青) の光を組み合わせる方式である。これには、三色の LED を別に用意する方式と、紫外線を放射する LED と、紫外線を受けて赤・緑・青に発光する 3 つの蛍光体を用いる方式がある。

## 8 全体に関する考察、感想、提案など

ロームの会社見学はとても面白かった。しかし、欲を言うと、ウェーハや CAD が展示してあった部屋はもっとじっくり見たかったし、展示物に関する質問ももっとしたかった。また、研究職の OB の方とお話する時間が設けられていたが、開発職の方ともお話してみたかったと思う。

全体として楽な実験だった。このぐらいのほうが考えながら進められるので良いと思う。ただ、LED のくだりなどは、実験の本題 (集積回路の作製プロセス) から外れているように感じた。もう少し実験の本題に近いテーマのほうが良かったと思う。



## 9 参考文献

- 高橋清/山田陽一，(2013) 『半導体工学 半導体物性の基礎』
- 東芝ライテック株式会社『白色 LED の発光方式』 ([http://www.tlt.co.jp/tlt/lighting\\_design/proposal/led\\_basics/led\\_w\\_emission.htm](http://www.tlt.co.jp/tlt/lighting_design/proposal/led_basics/led_w_emission.htm))