

# 第 11 週レポート

10 班 山村優太

2024 年 12 月 26 日

## 1 目的

さまざまなダイオードの電流電圧特性を測定し、ダイオードの動作原理や理想的・非理想的な特性、半導体の物性についての理解を深める。

## 2 原理

### 2.1 pn 接合ダイオード

pn 接合ダイオードは、pn 接合を利用した 2 端子素子である。p 型半導体と n 型半導体を接合すると、両者のフェルミ準位が一致するように互いのエネルギーが変化し、接合界面近傍にはキャリア（電子や正孔）がほとんど存在しない空乏層が形成される。バイアスを加えない場合は、空乏層に相当する拡散電位が障壁となり電流はほとんど流れない。ここで、順方向（p 型領域が正、n 型領域が負）にバイアスを加えると、この電位障壁が低下することで p 型領域から n 型領域に正孔が、n 型領域から p 型領域に電子がそれぞれ流れ込む。一方、逆方向にバイアスをかけると電位障壁がさらに高くなるので電流はほとんど流れない。pn 接合ダイオードの電流電圧特性は以下の式で表される：

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

ここで、 $e$  は電気素量、 $V$  は印加電圧、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $I_0$  は逆方向飽和電流である。また、 $n$  は接合係数（理想係数）と呼ばれる無次元量であり、キャリア密度の不均一性に起因する拡散電流成分と、空乏層中で電子と正孔が再結合することに起因する再結合電流成分の割合で決まる。前者が支配的であるときは  $n$  が 1 に近づき、後者が支配的であるときは  $n$  が 2 に近づく。

ダイオードの順方向電流電圧特性を測定した結果を横軸に印加電圧  $V$ 、縦軸に電流  $I$  の常用対数をとってグラフに描いたとき、 $n$  の値は次のようにして求めることができる。順方向特性では指数関数の項が支配的になるため、

$$I = I_0 \exp \left( \frac{eV}{nk_B T} \right) \quad (2)$$

と表される．両辺の常用対数を取ると，

$$\log_{10} I = \log_{10} I_0 + \frac{eV}{nk_{\text{B}}T} \log_{10} \exp(1) \quad (3)$$

となる．片対数グラフの直線の傾き  $a$  を用いて， $n$  は以下の式で表される：

$$n = \frac{e}{ak_{\text{B}}T} \log_{10} \exp(1) \quad (4)$$

以上より，グラフの傾きから  $n$  を求めることができる．

## 2.2 発光ダイオード

発光ダイオードはダイオードの一種であり，順方向に電圧を加えた際に発光する半導体素子である．pn 接合からなる発光ダイオードでは，電子と正孔が再結合する際に放出されるエネルギーが光として放出される．このとき放出されるエネルギー  $E$  はバンドギャップ  $E_{\text{g}}$  と等しく，以下の式で表される：

$$E = E_{\text{g}} = h \frac{c}{\lambda} [\text{J}] \quad (5)$$

ここで， $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  はプランク定数， $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$  は光速， $\lambda$  は発光波長である． $\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$  を上式に代入すると，

$$E = E_{\text{g}} = \frac{1240}{\lambda} [\text{eV}] \quad (6)$$

と変形できる．バンドギャップ  $E_{\text{g}}$  は物性値であり， $E_{\text{g}}$  が大きいほど波長が短く，小さいほど波長が長くなる．

## 3 方法

### 実験 5.2

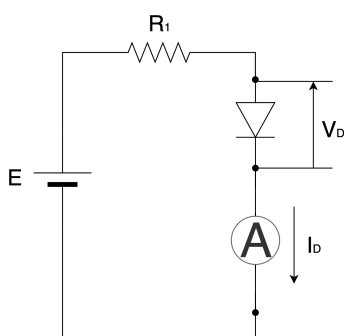


図 1 ダイオードの順方向電流電圧特性を測定する回路

1. 図 1 に示した測定回路をブレッドボード上に作成する。抵抗  $R_1$  は  $1\text{k}\Omega$  とする。
2. シリコン pn 接合ダイオードおよびゲルマニウムショットキーダイオードを接続し、それぞれのダイオードの順方向電流電圧特性を測定する。
3. ダイオードの電圧  $V_D$  はテスタを用いて測定し、電流  $I_D$  はデジタルマルチメータ (HIOKI DT4253) を使用して読み取る。
4. 測定電流範囲は  $1\mu\text{A}$  から  $5\text{mA}$  までとする。
5. 得られたデータをプロットし、順方向電流電圧特性を図示する。対数グラフを使用して接合係数  $n$  を求める。
6. ダイオードの立ち上がり電圧を求め、ダイオードごとの違いについて考察する。
7. 実験結果が理論的な電流電圧特性の式からずれる場合、その原因について考察する。

## 実験 5.4

1. 図 1 に示した測定回路をブレッドボード上に作成する。抵抗  $R_1$  は実験 5.2 と同様に  $1\text{k}\Omega$  とする。
2. 青色発光ダイオードおよび赤色発光ダイオードを接続し、それぞれの順方向電流電圧特性を測定する。測定方法は実験 5.2 に準ずる。
3. 得られたデータをプロットし、順方向電流電圧特性を図示する。対数グラフを使用して接合係数  $n$  を求める。
4. ダイオードの立ち上がり電圧を求め、ダイオードごとの違いについて考察する。

## 4 使用器具

- 直流電源 PA18-1.2B
- テスター DE-200A
- デジタルマルチメータ HIOKI DT4253
- シリコン pn 接合ダイオード 1S1588
- ゲルマニウムショットキーダイオード 1N60
- 抵抗  $1\text{k}\Omega$
- ブレッドボード
- ジャンパーワイヤー, コード, アダプター各種

## 5 結果

### 実験 5.2

シリコン pn 接合ダイオードおよびゲルマニウムショットキーダイオードの電流電圧特性のグラフを、それぞれ図 2, 3 および図 4, 5 に示す. 図 2, 4 は、横軸に電圧 (V), 縦軸に電流 (mA) を、いずれも線形スケールで示したものである. 図 3, 5 は、横軸に電圧 (V), 縦軸に電流 ( $\mu\text{A}$ ) を、縦軸を対数スケールで示したものである. グラフの作成には MATLAB を用いた.

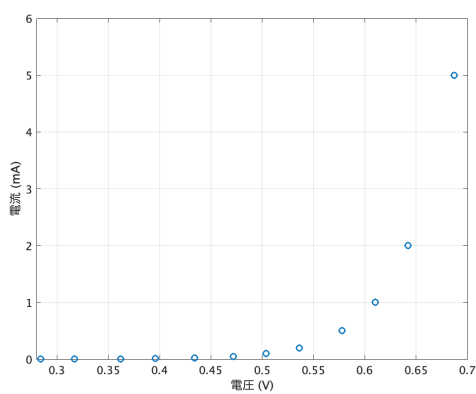


図 2 シリコン pn 接合ダイオードの電流電圧特性

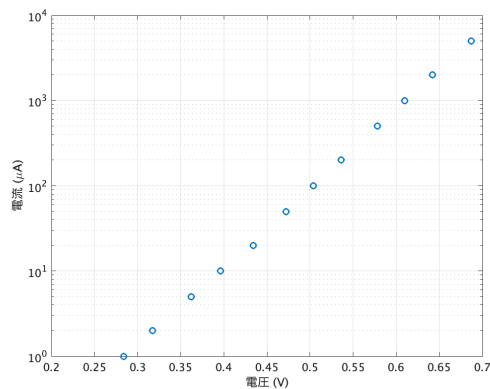


図 3 シリコン pn 接合ダイオードの電流電圧特性 (片対数グラフ)

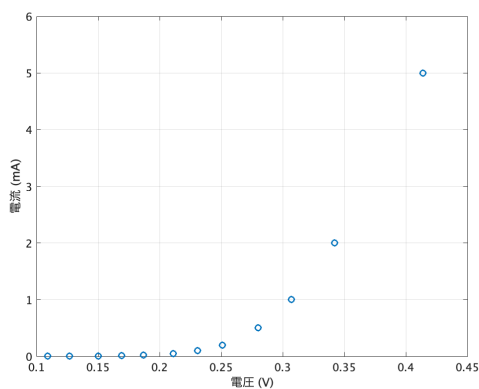


図 4 ゲルマニウムショットキーダイオードの電流電圧特性

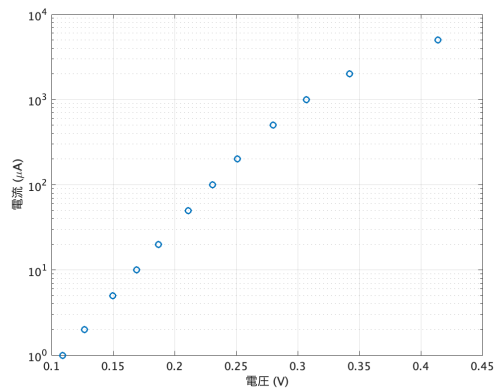


図 5 ゲルマニウムショットキーダイオードの電流電圧特性 (片対数グラフ)

いずれのダイオードについても、リニアプロットは指数関数の、片対数グラフは線形の電流電圧特性を示した. シリコン pn 接合ダイオードの電流電圧特性について、最小二乗法により回帰直線を求めると  $\log_{10} I = 9.24V - 2.64$  であり、 $R^2$  値は 0.9997 であった.  $a = 9.24$  とおき式 (4) から接合

係数  $n$  の値を求めると,  $n = 1.82$  となった. 一方, ゲルマニウムショットキーダイオードの電流電圧特性について, 最小二乗法により回帰直線を求めると  $\log_{10} I = 12.90V - 1.15$  であった.  $R^2$  値は 0.9665 であり,  $a = 12.90$  とおき式 (4) から接合係数  $n$  の値を求めると,  $n = 1.30$  となった. 電流が 1 mA 以上の領域においては, 電流電圧特性に曲線的な特性が見られたため, 最後の 3 点を除外して再計算を行ったところ, 回帰直線は  $\log_{10} I = 15.93V - 1.70$  となった.  $R^2$  値は 0.9988 より, より良い精度で回帰直線に近似されることがわかる.  $a = 9.24$  とおき式 (4) から接合係数  $n$  の値を求めると,  $n = 1.05$  となった. 電流値が 1.0 mA となる電圧値を立ち上がり電圧と定義すると, シリコン pn 接合ダイオードの立ち上がり電圧は 0.610 V, ゲルマニウムショットキーダイオードの立ち上がり電圧は 0.307 V となった.

## 実験 5.4

青色発光ダイオードおよび赤色発光ダイオードの電流電圧特性のグラフを, それぞれ図 6, 7 および図 8, 9 に示す. 図 6, 8 は, 横軸に電圧 (V), 縦軸に電流 (mA) を, いずれも線形スケールで示したものである. 図 3, 5 は, 横軸に電圧 (V), 縦軸に電流 ( $\mu A$ ) を, 縦軸を対数スケールで示したものである.

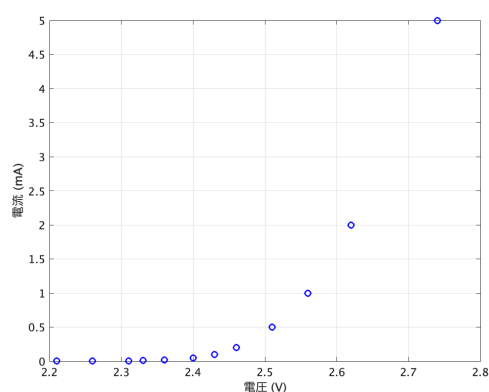


図 6 青色発光ダイオードの電流電圧特性

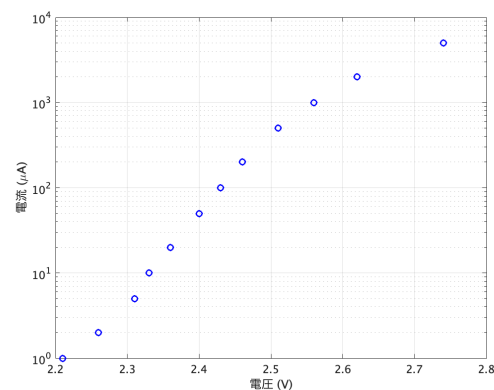


図 7 青色発光ダイオードの電流電圧特性  
(片対数グラフ)

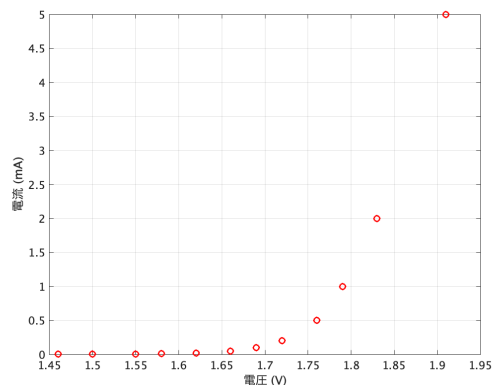


図 8 赤色発光ダイオードの電流電圧特性

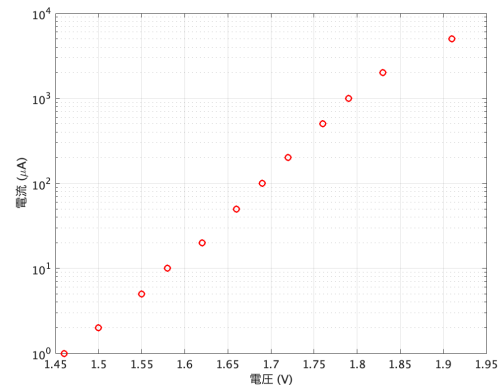


図 9 赤色発光ダイオードの電流電圧特性  
(片対数グラフ)

いずれの発光ダイオードについても、リニアプロットは指数関数の、片対数グラフは線形の電流電圧特性を示した。青色発光ダイオードの電流電圧特性について、最小二乗法により回帰直線を求めると  $\log_{10} I = 7.64V - 16.76$  であり、 $R^2$  値は 0.9645 であった。  $a = 7.64$  とおき式 (4) から接合係数  $n$  の値を求めると、 $n = 2.20$  となった。電流が 1 mA 以上の領域においては、電流電圧特性に曲線的な特性が見られたため、最後の 3 点を除外して再計算を行ったところ、回帰直線は  $\log_{10} I = 9.46V - 13.45$  となった。  $R^2$  値は 0.9942 より、より良い精度で回帰直線に近似されることがわかる。  $a = 9.46$  とおき式 (4) から接合係数  $n$  の値を求めると、 $n = 1.78$  となった。一方、赤色発光ダイオードの電流電圧特性について、最小二乗法により回帰直線を求めると  $\log_{10} I = 8.77V - 12.83$  であり、 $R^2$  値は 0.9939 であった。  $a = 8.77$  とおき式 (4) から接合係数  $n$  の値を求めると、 $n = 1.92$  となった。実験 5.2 と同様に、電流値が 1 mA となる電圧値を立ち上がり電圧と定義すると、青色発光ダイオードの立ち上がり電圧は 2.56 V、赤色発光ダイオードの立ち上がり電圧は 1.79 V となった。

## 6 考察

### 実験 5.2

シリコン pn 接合ダイオードの接合係数は  $n = 1.82$  であることから、再結合電流成分が支配的であることが分かる。一方で、ゲルマニウムショットキーダイオードの接合係数は  $n = 1.30$  であることから、拡散電流成分が支配的であることが分かる。立ち上がり電圧はシリコン pn 接合ダイオードの方が高く、これはシリコンのバンドギャップがゲルマニウムのバンドギャップよりも大きいためである。シリコンのバンドギャップは約 1.12 eV、ゲルマニウムのバンドギャップは約 0.67 eV であり、この差が立ち上がり電圧の違いとして現れる。

式 (2) より、ダイオードの順方向における電流電圧特性は指数関数の形で表される。また、式 (3) より、電流を対数スケールにしたときの電流電圧特性は直線で近似される。実験結果より、いずれの

ダイオードについてもほぼ理論に一致したグラフが得られた。ゲルマニウムショットキーダイオードについて、低電圧領域では理論と一致したグラフが得られたが、一方で高電圧領域においては直線から外れて曲線となる領域が見られた。原因としては、ダイオードの寄生抵抗やドリフト電流による影響が考えられる。図 10 に示すように、実際のダイオードは直列に寄生抵抗が、並列に寄生容量が接続されている。

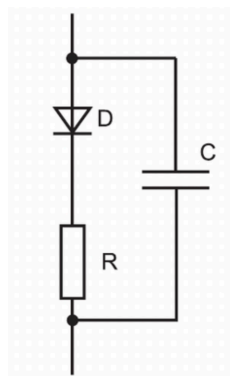


図 10 実際のダイオード

抵抗による電圧降下はオームの法則  $I = V/R$  に従うため、電流電圧特性の片対数プロットは電圧の常用対数  $\log_{10} V$  に比例して変化する。一方、ドリフト電流は半導体内の電場によりキャリアが移動することで生じる電流であり、抵抗による電圧降下と同様にオームの法則  $I = en\mu V$  に従う。ここで、 $e$  は電荷素量、 $n$  はキャリア密度、 $\mu$  はキャリアの移動度である。したがって、電流電圧特性の片対数プロットも同様に電圧の常用対数  $\log_{10} V$  に比例する。ダイオードに印加された電圧は空乏層両端に加わるため、電位障壁が十分低くなるまでは中性領域に電界が生じない。このため、ドリフト電流は高電圧領域で顕著になり、直線からの乖離を生む要因になっていると考えられる。

## 実験 5.4

いずれの発光ダイオードについても、式 (2), (3) に示した理論とほぼ一致している。実験 5.3 のゲルマニウムショットキーダイオードと同様に、高電圧領域においては直線から外れて曲線となる領域が見られたが、原因については実験 5.3 の考察と同様であると考えられる。いずれのダイオードについても接合係数  $n$  は 2 に近い値を示しており、再結合電流成分が支配的であることが分かる。これは理論に示したとおり、発光ダイオードの発光はキャリアの再結合に起因するためである。また、立ち上がり電圧が青色発光ダイオードの方が高いのは、バンドギャップが青色発光ダイオードの方が大きいためである。これは、青色の波長が赤色の波長よりも短いことから、式 (6) により容易に説明できる。

## 7 感想

本実験を通して、ダイオードの動作原理や特性について理解を深めることができた。また、半導体の物性については、授業では曖昧にしか理解していなかった部分があったものの、教員の方にバンド図を描いて説明していただいたことで、より明確に理解することができた。やはり、理論を定着させるには、実験を通じて実際に体感することが最も効果的であると実感した。