

1 目的

ダイオードに正方向電圧を加え電流を測ることにより、ダイオードの電流-電圧特性と閾値電圧を求める。また、トランジスタについて、コレクタ-エミッタ間電圧とコレクタ電圧の関係、コレクタ電流とベース電流の関係を測定し、直流電流増幅率、小信号電流増幅率などを決定する。

2 原理

2.1 ダイオード

p 型半導体と n 型半導体を接合したものを pn 接合ダイオードまたはダイオードと呼ぶ。ダイオードは順方向に電圧を加えると電流が流れ、逆方向に電圧を加えてもほとんど流れないという整流特性をもつ。

ダイオードを流れる電流 I と電圧 V の関係は次のように表せる。

$$I = I_s(e^{qV/nkT} - 1) \quad (1)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 q は電子の電荷である。 I_s は飽和電流、 n は理想係数と呼ばれ、1~2 の値をとる。

式(1)より、ダイオードを流れる電流は、下の図 1 に示すようにある閾値電圧 V_s から急激に大きくなることがわかる。シリコンダイオードでは $V_s = 0.5 \sim 0.6V$ 程度であることが知られている。

図 1. ダイオードの直列電圧特性

図 2. 2SC1815

2.2 トランジスタ

トランジスタにはダイオードを 2 つ組み合わせたバイポーラ型と電界効果型の 2 種類のトランジスタがある。本実験ではバイポーラ型を取り扱ううえ、以下ではトランジスタはバイポーラ型トランジスタを指すものとする。

トランジスタは n 型と p 型の半導体を npn また h pnp の 3 層構造とした増幅作用を有する 3 端子素子である。前者には 2SCxxxx(高周波用)または 2SDxxxx(低周波用)と型番を付け、後者には 2SAxxxx(高周波用)または 2SBxxxx(低周波用)という型番がつけられている。3 本はベース(B)、コレクタ(C)、エミッタ(E)と呼ばれる。

次の図 3 のエミッタ接地回路を考える。コレクタに流れる電流 I_C は、

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad (2)$$

で与えられる。式(2)は負荷線(直流負荷線)と呼ばれる。

そこで、トランジスタの任意のベース電流 I_B に対して $I_C - V_{CE}$ 特性を調べ、これと式(2)を重ね合わせて、負荷曲線との交点がトランジスタの動作点となる。

動作点が、図 4 の A ではベース電流が十分大きい場合、B-C 間の pn 接合の順方向に電流が流れ、コレクタ電流は飽和状態にある。これは「飽和領域」と呼ばれる。動作点が B の場合、 $I_B = I_C = 0$ であり、遮断領域とよぶ。動作点が A~B である領域を能動領域(活性領域)とよび、アナログ信号の増幅では動作点をこの領域にあるように設計する。

図 3 トランジスタのエミッタ接地回路

図 4 動作点に関する回路

3 実験の手順

3.1 ダイオードの I-V 特性

1. 図 5 にしたがって回路をブレッドボードに組み立て、電流測定レンジは最初最大にし、必要に応じて小さくしていく。
2. 可変電流の出力電圧を変え、ダイオードに加わる電圧 V およびダイオードを流れる電流 I を測定した。ちなみに、 $I = 3, 2.5, 2, 1.5, 1, 0.8, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 \text{mA}$ となるように測定した。また、データを測定するごとに、横軸に電圧、縦軸に電流をとってプロットした。
3. ダイオードの向きを変えて逆方向電圧について $-1\text{V}, -2\text{V}$ のときの電流値を求めた。

図 5 ダイオードの直流電圧特性測定回路

3.2 トランジスタの特性

3.2.1 トランジスタの I_C - V_{CE} 静特性

1. 次ページの図 6 のようにエミッタ接地回路を組み立てた。ちなみに可変電圧の CH1 をベース側につなぎ、可変電源の CH2 はコレクタ側につないだ。 R_B は $270\text{k}\Omega$ とした。
2. 可変電源 V_B を、ベース電流 I_B が $10\mu\text{A}$ となるように調整し、可変電源 V_C の電圧を $5, 4, 3, 2.5, 2, 1, 0.7, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0.05\text{V}$ と変えて、その都度を測定した。そのデータを、横軸に電圧、縦軸に電流をとってプロットした。
3. 次にベース電流 I_B が $20\mu\text{A}$ 、 $0.001\mu\text{A}$ となるように可変電源 V_B を調整して、先ほどと同様の測定を繰り返し行った。また、プロットも同様に行った。

3.2.2 トランジスタの直流増幅率

1. 図 6 の回路を用いた。
2. 電圧計の値が 5 V になるように可変電源 V_C を設定した。
3. 可変電源 V_B の電圧を調整して、ベース電流 I_B を 0~60 μ A の範囲で変えて、その都度 I_C を測定した。そのデータは横軸にベース電流、縦軸に電流をとってグラフにプロットした。

図 6 トランジスタの測定回路

4 実験結果

4.1 ダイオードの I-V 特性

先ほど述べた手順のとおり測定を行い、得られた測定値を以下の表にまとめた。

表 1. ダイオードについての測定値

出力電圧/V	ダイオード I/mA	ダイオード V/V
4.152	3.0	0.647
3.558	2.5	0.638
2.964	2.0	0.628
2.365	1.5	0.614
1.763	1.0	0.595
1.518	0.8	0.584
1.271	0.6	0.571
1.146	0.5	0.562
1.018	0.4	0.552
0.888	0.3	0.538
0.752	0.2	0.519
0.601	0.1	0.486
-1.000	0.0	-1.000
-2.000	0.0	-2.000

この測定結果を方眼紙に、横軸に電圧、縦軸にダイオードに流れる電流をとってプロットした。これを図 7 として次に添付した。

これに近似した曲線をひき、電流-電圧特性曲線を導けた。このグラフより、電流が流れ始めるときの立ち上がり電圧 V_S は、

$$V_S = 0.538V$$

と導くことが出来た。

4.2 トランジスタの特性

4.2.1 トランジスタの I_C - V_{CE} 静特性

先ほど述べた手順により測定を行った。

まず、可変電源 V_B をベース電流 $I_B = 10\mu\text{A}$ となるように調整したとき、 $V_B = 3.42\text{V}$ となった。同様に、ベース電流 $I_B = 20\mu\text{A}$ のときは $V_B = 6.03\text{V}$ 、ベース電流 $I_B = 0.001\mu\text{A}$ のときは $V_B = 0.0476\text{V}$ となった。

次に、可変電源 V_C を変化させていき、得られた測定値を以下の表にまとめた。

表 2. トランジスタについての測定値

V_C / V	$I_B = 0.001\mu\text{A}$ のときの I_C / mA	$I_B = 10\mu\text{A}$ のときの I_C / mA	$I_B = 20\mu\text{A}$ のときの I_C / mA
5	0.002	1.450	2.882
4	0.002	1.446	2.868
3	0.002	1.440	2.855
2.5	0.002	1.438	2.849
2	0.002	1.437	2.846
1	0.002	1.430	2.823
0.7	0.002	1.427	2.819
0.5	0.002	1.426	2.813
0.3	0.002	1.420	2.798
0.2	0.002	1.332	2.597
0.1	0.001	0.414	0.838
0.05	0.000	0.071	0.151

これより、方眼紙に横軸に電圧を、縦軸に電流をとりプロットし、次に図 8 として添付した。

また、飽和領域と能動領域について調べたところ、次のようにあった(※注)。

・飽和領域

電源電圧が一定であれば、ベース電流をいくら増やしても負荷線上から先はコレクタ電流が増えなくなり、コレクタ・エミッタ間の電圧は最小となる。この領域はスイッチとしてのオン状態である。

・飽和領域

負荷線上 b を中心に適切なベース電流である入力信号の変化を、大きなコレクタ電流の変化としてひずみなく増幅することができる領域。

これを参考にし、飽和領域と能動領域を図 8 に書き込んだ。

得られた測定結果より、 $V_{CE} = 2.5V$ における直流電流増幅率 h_{FE} を求める。

ベース電流 $I_B = 20\mu A$ のとき、

$$h_{FE} = \frac{2.849 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} = 142.5$$

ベース電流 $I_B = 10\mu A$ のとき、

$$h_{FE} = \frac{1.438 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-6}} = 143.8$$

ベース電流 $I_B = 0.001\mu A$ のとき、

$$h_{FE} = \frac{0.002 \times 10^{-3}}{0.001 \times 10^{-6}} = 200.0$$

また、そのときの 2 つのベース電流値 $I_B = 20\mu A$ 、 $10\mu A$ における小信号電流増幅率 h_{fe} は、

$$h_{fe} = \frac{2.949 \times 10^{-3} - 1.438 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6}} = 151.1$$

と導けた。

4.2.2 トランジスタの直流増幅率

先ほど述べた手順に従って測定を行った。

まず、電流計の値が 5V になるように可変電源 V_B を調節したところ、 $V_B = 5.498\text{V}$ となった。次に、 I_B を変化させ、そのとき得られた I_C の値を以下の表にまとめた。

表 3. トランジスタの直流増幅に関する測定値

$I_B / \mu\text{A}$	I_C / mA
0.00	0.002
10.00	1.452
20.00	2.920
30.00	4.393
40.00	5.906
50.01	7.416
60.01	8.913

これらより、方眼紙に横軸にベース電流、縦軸にカウンタの電流をとりプロットしたものを、図 9 として次に添付した。

また、 $I_C = 5.906\text{mA}$ での直流電流増幅率 $\beta = h_{FE}$ および小信号電流増幅率 h_{fe} は、

$$\beta = h_{FE} = \frac{5.906 \times 10^{-3}}{40.00 \times 10^{-6}} = 147.7$$

$$h_{fe} = \frac{7.416 \times 10^{-3} - 5.906 \times 10^{-3}}{50.00 \times 10^{-6} - 40.00 \times 10^{-6}} = 151.0$$

と導けた。

5 考察

5.1 ダイオードの I-V 特性

原理より、整流作用とは、ダイオードに正方向に電圧を加えると電流が流れ、負方向に電圧を加えてもほとんど流れないという性質だ。これは図 7 や表 1 をみれば成り立つことは明らかである。正方向に電圧を加えたときは、始めは少しだが、立ち上がり電圧を境に流れる電流はうなぎのぼりになる。また、負方向に電圧を加えたときは、始めはわずかに流れるが、-1V ではもう全く電流は流れなくなっている。

5.2 トランジスタの特性

5.2.1 トランジスタの I_C - V_{CE} 特性

結果でも述べた通り、飽和領域では電圧の増加に伴い流れる電流も増え、能動領域では電圧が大きくなっても電流はほとんど変化しない。このことはきちんと確認できたと思う。

直流電流増幅率 h_{FE} に関して、 $I_B = 20\mu A$ 、 $10\mu A$ のときの値は、差はその値の 1 % 以内であり、ほぼ同じであったといえる。これより、電流がいかなる大きさでも直流電流増幅率は同じ値になるのだと考えた。しかし、 $I_B = 0.001\mu A$ のときだけ大きく値が異なる。おそらく測定できる値が小さすぎたため、誤差が大きく影響してしまいそのようになってしまったのだと思われる。また結果より、直流電流増幅率 h_{FE} と小信号電流増幅率 h_{fe} に関して、1 % 程の値のずれはあるが、こちらに関しても、どの電流値についてもほぼ同じ値をとると考えられる。

5.2.2 トランジスタの I_B - I_C 特性

I_B と I_C という 2 つの値に関しては、図 9 を見ればわかるように比例関係がある。また、直流電流増幅率 h_{FE} と小信号電流増幅率 h_{fe} に関して、先ほどと同様にこちらもどの電流値についてもほぼ同じ値をとるのだと考えられる。

6 感想

今回の実験から電子回路の分野になり、理解が追いつかなくなってきた。残り 2 回の実験が不安だ。

※注 飽和領域と能動領域について、以下の HP を参照した。

ルネサスエレクトロニクス株式会社 2018/01/12 閲覧

URL: <https://support.renesas.com/hc/ja/articles/210901508-FAQ>