

ダイオードとトランジスタの基本特性

[目的]

ダイオードの直流での順方向の電流—電圧特性を測定し、ダイオードの基本特性を理解する。また、バイポーラトランジスタのエミッタ接地静特性を把握するとともに、エミッタ接地の概念を得る。

[準備事項]

- 持ってくるもの：1mm 方眼紙、片対数グラフ、電卓
- 予習：課題を事前に調べてくること。

(I) ダイオードの基本特性

[解説]

1. PN 接合

半導体では、価電子に起因するバンドである価電子帯から電子が励起されてその上の伝導体にあがるとそれと同数のあな（空席）が価電子帯にできる。このあなは、正の電荷と正の有効質量を持つ粒子であるかのように振る舞うので、これを正孔またはホールという。不純物を含む半導体で電子の数が正孔より多い半導体をN 型半導体、一方、正孔の数が電子より多い半導体をP 型半導体という。一つの半導体単結晶で一部がP型半導体、他の部分がN 型半導体になっているものをPN 接合という。PN 接合面は、結晶に固定されたものでなく、電流、光、温度などによって少し移動する。PN 接合はダイオードなどに利用されるだけでなく、その特性は多くの半導体デバイスを理解する基礎として非常に重要である。

2. 理想的なPN 接合の電流—電圧特性

PN 接合の両側に電位差 V を与えた時、P 型の方を正にする順電圧の場合には電流がよく流れるが、N 型の方を正にする逆電圧の場合にはほとんど流れない。このように、PN 接合には電流を一方向にしか流さない作用がある。これを整流作用という。伝導電子および正孔のエネルギー分布は、(1)式のように近似的にボルツマン分布で表されるので、順電圧をかけた場合は、ある一定のポテンシャル以上のエネルギーを持つ電子数も正孔数も $\exp(qV/kT)$ に比例して変わる。ここで、 $q[C]$ は電子の電荷、 k はボルツマン定数であり、 $T[K]$ は温度である。PN 接合の電圧が $V=0$ のときは、P 型半導体とN 型半導体との間を流れる電子数も正孔数もお互いに等しく釣り合っている。したがって、電圧 V をかけたときにPN 接合に流れる電流 I は、電圧の低い範囲では(1)式で表されるように非線形となる。

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

逆電圧を大きくしたときに流れる逆電流は、飽和電流 I_0 に近づく。

多くのダイオードでは、順電圧が約1 V 以下、逆電圧が2~5 V までの電流—電圧特性は(1)式のようになる。結合係数 n は、理論的には $n=1$ であるが、PN 接合面におけるポテンシャル障壁の高さや空乏層の厚さが一定でないために一般には $n>1$ となる。

3. 大きな順電圧での電流－電圧特性

ダイオードにかかる順電圧が大きいときには、ダイオードに流れる電流 I は近似的に (1)式から(2)式になる。

$$I \approx I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2)$$

ダイオードに大きな順電流が流れた場合、PN 接合にかかる電圧と比べてP 型半導体の中とN 型半導体の中にかかる電圧が無視できなくなる。P 型半導体とN 型半導体の抵抗の和を R_s とすると、電流が大きいときの電流－電圧特性は、(2)式で表される特性を持った理想的ダイオードと直列に内部抵抗 R_s がついたものとみなすことができる。理想的ダイオードにかかる電圧 V_D は、

$$V_D = \frac{nkT}{q} \log_e \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

となるため、実際のダイオードにかかる電圧 V は、(4)式のようにになる。

$$V = \frac{nkT}{q} \log_e \frac{I}{I_0} + R_s I \quad (4)$$

4. 逆電圧での電流－電圧特性

逆電圧では、流れる電流が順電圧の場合に比べて非常に小さい。つまり、ダイオードは整流作用を示す。逆電流は、空乏層内で捕獲中心から発生するキャリアによる電流であるので、理想的なダイオードの電流－電圧特性を表す(1)式とは異なり、(5)式のようにになる。

$$I = I_0' (-V)^m \quad (5)$$

さらに、逆電圧を高くしていくと、ある電圧で逆電流が急激に増加する。その先はほぼ電圧が一定の直線的特性曲線になる。これをツェナー効果という。

[使用器具]

微小電圧電流計、デジタル・マルチメーター、直流電圧源

[実験方法]

図1 のような回路でダイオードの電流－電圧特性を測定する。($R_p = 150 \Omega$)

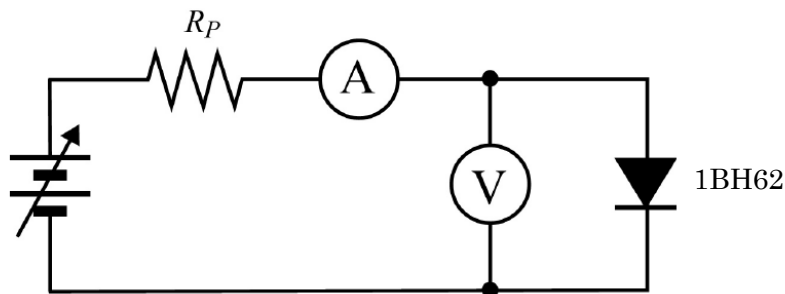


図1 測定回路図

1. 整流比の測定

±5 V での電流を測定し、整流比（順方向電流／逆方向電流）を求める。

2. 順電圧での電流－電圧特性の測定

順電圧での電流－電圧特性を0.1 V から1 V まで0.1 Vおきに測定する。

測定値をグラフに描きながら詳細な電流－電圧特性を測定する。描いたグラフから測定データを解析する。

[研究課題 1]

1. ある測定値 y が、変数 x と $y = b \exp(ax)$ の関係がある場合、1mm 方眼、片対数グラフ、両対数グラフのうちどのグラフを用いるのが適切か考えよ。また、グラフから定数 a 、 b をもとめる方法を説明し、 a 、 b をもとめよ。

2. 電流－電圧特性が(4)式で表される場合、 $I-V$ グラフから R_s をもとめる方法を説明し、 R_s をもとめよ。

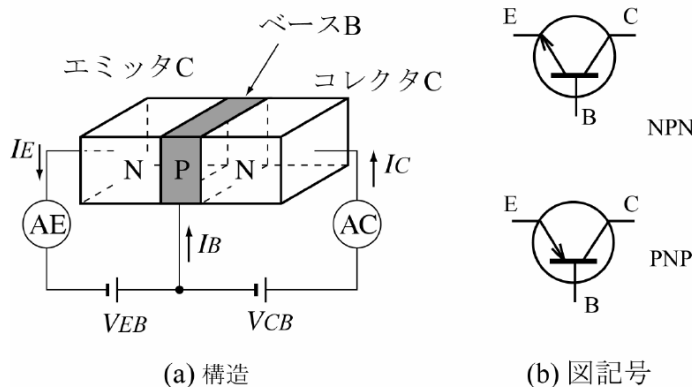
[考察]

1. 順電圧での電流－電圧特性を考察せよ。

(2) トランジスタの静特性の実験

[原理]

二つのPN 接合を、図1のように背中合わせにした構造で、中央のP 領域（ベース）の幅を $10\mu\text{m}$ 以下にし、N 領域（エミッタ）の不純物濃度をP 形ベース領域のそれよりも十分に高くしたものが、NPN 接合形トランジスタである。P とN を入れ換えたPNPトランジスタもある。



接合形トランジスタの構造と図記号

図1 接合形トランジスタの構造と図記号

図1 のようなトランジスタの入力側の接合（エミッタ接合）に、順バイアス（P形ベースに正の極性の電圧） V_{EB} を加えると、かなり大きなエミッタ電流 I_E が流れる。この電流は、主としてエミッタからベースに流れ込む電子からなっている。ベースに注入された電子は、ベース幅が十分に狭いので、再結合で失われることなく、ほとんど減衰なしに出力側の接合（コレクタ接合）に到達する。この到達する割合は、ベース接地電流増幅

率と呼ばれ、 α で表わす。

コレクタ接合に、逆バイアス（出力側のN領域（コレクタ）に正の極性に電圧） V_{CB} を加えると、接合に到達した電子はすべてコレクタに集められて、出力電流となる。

コレクタ接合には、このほかに逆飽和電流 I_{CBO} も流れ、コレクタ電流 I_C は

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (1)$$

となる。

I_E 、 I_C 、 I_B は

$$I_E = I_C + I_B \quad (2)$$

また、 I_C と I_B の関係について、(2)式より、

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \quad (3)$$

I_{CBO} が小さいとき、

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B \cong \beta I_B \quad (4)$$

となり、 β をエミッタ接地電流増幅率と呼ぶ。

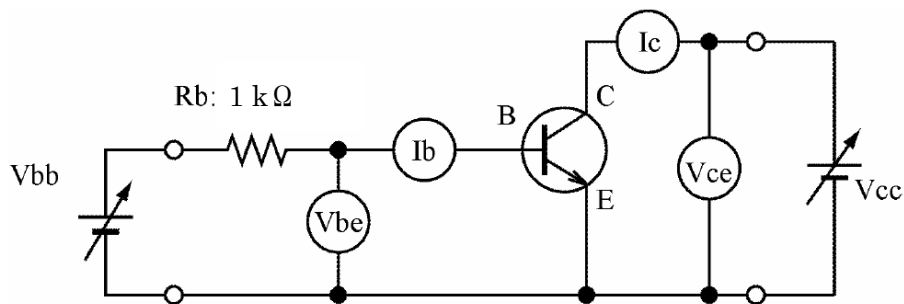


図2 NPN形(エミッタ接地)静特性測定回路

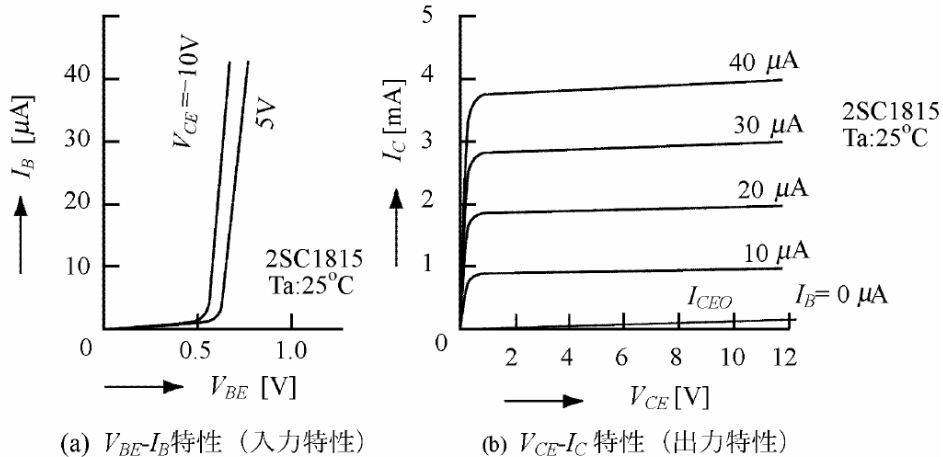


図3 エミッタ接地トランジスタの静特性

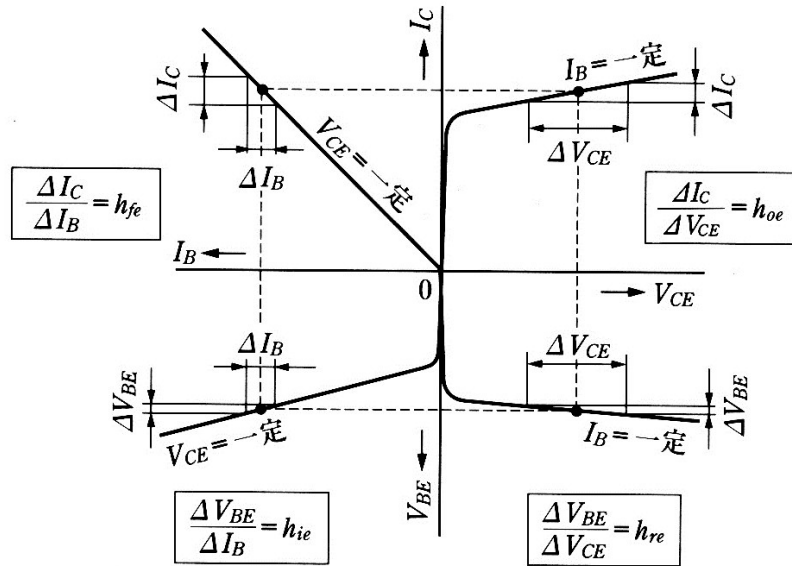


図4 静特性曲線と h 定数

図2 の回路でエミッタ接地トランジスタの静特性を測定すると、図3, 図4のようになる。また、実験に使用するトランジスタ2SC1815 の外形図・電気的規格を図5 に示す。

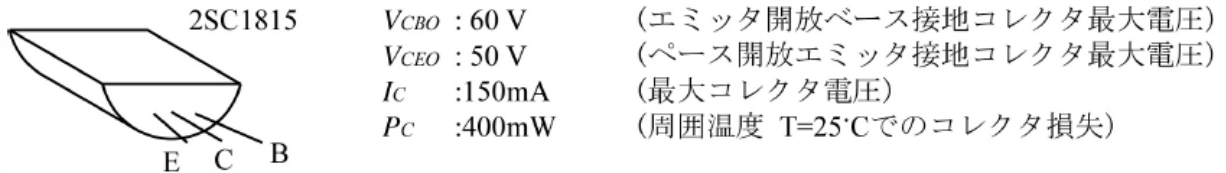


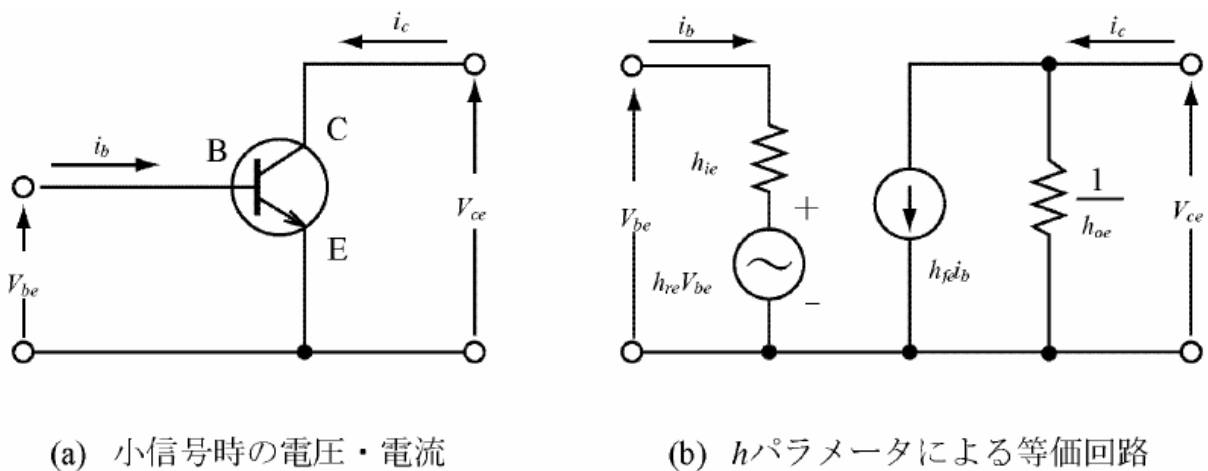
図5 2SC1815 の規格

トランジスタの電圧、電流の小信号成分を図6 のように定めたとき、各変数の間に次式が成立する。

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \quad (5)$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \quad (6)$$

ここで、定数 h_{ie} 、 h_{fe} 、 h_{re} 、 h_{oe} を h パラメータという。



(a) 小信号時の電圧・電流

(b) h パラメータによる等価回路

図5 小信号時のエミッタ接地の等価回路

各 h パラメータの値は実験で得られたトランジスタの静特性 (図3) より、次式を用いて得られる。また、 h_{fe} はエミッタ接地電流増幅率 β とほとんど同じ値になる。

$$h_{ie} = \left. \frac{\Delta v_{be}}{\Delta i_b} \right|_{v_{ce}=\text{const}} \quad (7)$$

$$h_{re} = \left. \frac{\Delta v_{be}}{\Delta v_{ce}} \right|_{i_b=\text{const}} \quad (8)$$

$$h_{fe} = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \right|_{v_{ce}=\text{const}} \quad (9)$$

$$h_{oe} = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{ce}} \right|_{i_b=\text{const}} \quad (10)$$

[実験方法]

1. 入力特性 ($V_{BE}-I_B$ 特性)

パラメータであるコレクタ電圧 V_{CE} を一定 (1V) とし、ベース電流 I_B を $0\mu\text{A}$ から $100\mu\text{A}$ まで $10\mu\text{A}$ おきに変え、ベース電流 I_B に対するベース電圧 V_{BE} ($V_{BE}-I_B$ 特性)、ベース電流 I_B に対するコレクタ電流 I_C (I_B-I_C 特性、電流伝達特性) を調べ、グラフに書く。

電流 I_B を変化させるため、図 2 の V_{bb} には DC_corrent を用いなさい。

2. 出力特性 ($V_{CE}-I_C$ 特性)

パラメータであるベース電流 I_B を $25\mu\text{A}$ (一定) とし、コレクタ電圧 V_{CE} に対するコレクタ電流 I_C を測定する。(コレクタ電圧 V_{CE} は $0.2, 0.4, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\text{V}$ とする)。同時に、電圧帰還特性 ($V_{CE}-V_{BE}$ 特性) を調べ、グラフに書く。

I_B を $50\mu\text{A}$ 、 $75\mu\text{A}$ として同様の測定を行う。

最大コレクタ電流 I_C 、最大コレクタ電圧 V_{CE} の積 ($I_C \times V_{CE}$) が最大電力 P_{Cmax} (最大コレクタ損失) を超えないように注意して測定すること。

[研究課題 2]

1. 実験方法より得られた入力特性および出力特性を図示せよ。
2. 実験結果から、 h パラメータを求めよ。

[考察]

1. 得られた h パラメータの定数より等価回路に変換して図示せよ。