

まえがき

現代社会において必要不可欠なコンピュータや通信機器などの電子機器の構成要素の一つが電子回路であり、電子機器の設計・運用をするためには電子回路を理解することが必要になる。そのため、電気電子系の技術者教育におい

て重要な科目として位置付けられている。また、電子機器の発展と普及に伴い、他の分野の技術者にとっても電子回路の基本的な知識は必要になっている。本書は電子回路の基本的な動作を理解し、技術者として必要な知識を修得できることを目標とする。読者としては、電気回路と半導体デバイスに関してある程度の知識を有する人を想定している。また、大学や高専の電気電子系学科で学んでいる学生が電子回路に関する理解を深めたいときにも使えるようにした。なお、本書を読むうえで微積分の基礎知識を有していることが望ましいが、電力増幅回路の電力効率の計算を除いては、微積分を知らなくても大きな不都合は生じないように記述した。

電子回路に関して既に数多くの書籍が出版されているので、以下の点で従来の書籍と異なる特色が出るように工夫した。まず、電子回路の解析において解析を簡単にするために使われる様々な仮定、ブラックボックス化および特性の近似がどこで使われているかを、できる限り明示するようにした。また、バイポーラトランジスタを用いた回路と MOSFET を用いた回路の両方をできる限り対等に扱うようにしている。さらに、電気回路と半導体デバイスに関しては記述の簡素化を行い、詳細については他の書籍にゆだねる方針を取った。

本書は 3 部から構成されている。第 1 章から第 4 章までの第 I 部は導入編として、電子回路を学ぶための前提となる知識

と、最低限の電子回路の動作の解説をしている。第 5 章から第 8 章までの第 II 部は基礎編として、増幅回路を中心に基本的な電子回路の解析を行っている。第 9 章から第 13 章までの第 III 部は展開編として、より発展的な話題を取り上げている。第 I 部の第 1 章では前提となる知識のうち、全般的なものを記述した。第 2 章及び第 3 章では電気回路と半導体デバイスに関して必要な事項について簡単に記述した。第 4 章では解析が簡単になるような仮定をしたうえで、電子回路の動作を記述している。第 II 部の第 5 章では基本動作として小信号動作への移行を念頭に直流的な入出力特性を解析している。第 6 章では以後の解析に必要な等価回路、特に小信号等価回路の導出をしている。第 7 章ではバイアス回路についての解説と設計方法を記述している。第 8 章では小信号等価回路を用いた特性量の導出を中心に基本増幅回路の動作を記述している。第 III 部の第 9 章では各種の応用的な回路に関する解析を行っている。第 10 章では演算増幅器を用いた回路のうち簡単なものの解析を行っている。第 11 章ではデジタル回路の例として TTL インバータおよび CMOS インバータの解析を行っている。第 12 章では周波数特性の基礎として、基本増幅回路の周波数特性の簡単な解析を行っている。第 13 章では実際の回路作製において重要な回路シミュレータの概要を説明している。

本書で扱えなかった話題として、帰還増幅回路、回路の安定性、回路の雑音、高周波増幅回路、発振回路、変復調回路、電源回路、非線形演算回路、アクティブフィルタ、インターフェース回路 (AD 変換, DA 変換) などがある。これらに関しては、他の書籍を参考にしてほしい。

最後に、本書の出版にあたってお世話になった電気書院の田中和子様に感謝します。

おおまめうだ
としあき
大豆生田 利章

第 3 章

半導体デバイス

半導体デバイス（半導体素子）は材料として半導体を用いて作製された回路素子であり，電子回路の主要な構成要素である．本章では電子回路で用いられる代表的な半導体デバイスに関して，本書で必要な事項を説明する．半導体デバイスの動作は素子内部の電子の状態により決定されるが，ここでは外部から見た電圧と電流の関係のみ取り扱う¹．詳細に関しては半導体デバイスあるいは電子デバイスに関する書籍を参考にしてほしい．

3.1 半導体

半導体は導体と絶縁体の中間の抵抗率を持つ物質である．半導体の例として，シリコン（ケイ素，Si），ガリウムヒ素（GaAs）やゲルマニウム（Ge）がある．半導体は不純物を添加することにより電氣的性質が大きく変化する．不純物を加えることにより負の電荷²が移動するようになったものを **n** 形半導体，正の電荷³が移動するようになったものを **p** 形半導体という．半導体の持つ電氣的・光學的性質を利用して様々な素子が作られている．以下では，基本的な半導体デバイスを取り上げる．

¹ 1.2 節で述べたブラックボックスの考え．

² 実体は電子である．

³ 正孔と呼ばれる．

3.2 ダイオード

図 3.1 に示す原理的構造を持つ半導体デバイスを **pn 接合ダイオード** と呼ぶ。pn 接合ダイオードは単に **ダイオード** と呼ばれることが多い。ダイオードの 2 つの端子は **アノード (A)** および **カソード (K)** と呼ばれる。

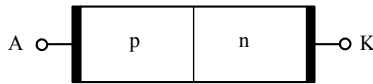


図 3.1 ダイオードの原理的構造

ダイオードは図 3.2 (a) に示す図記号で表される。ダイオードに加える電圧の向きには図 3.2 (b) のように電流が流れる向きと、図 3.2 (c) のように電流が流れない向きがある。電流が流れる方向を **順方向**、電流が流れない方向を **逆方向** と呼ぶ。このように電流が一方向にしか流れない特性を **整流特性** と呼ぶ。順方向に電圧を加えることを **順バイアス**、逆方向に電圧を加えることを **逆バイアス** と呼ぶ。

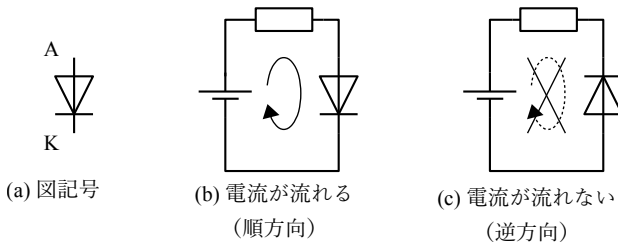


図 3.2 ダイオードの図記号と整流特性

ダイオードの端子間電圧 V_D とダイオードを流れる電流 I_D の関係、すなわちダイオードの電圧電流特性の例を図 3.3 に示す。ダイオードは電圧と電流が比例しない非線形素子⁴である。

⁴ 19 ページ参照。

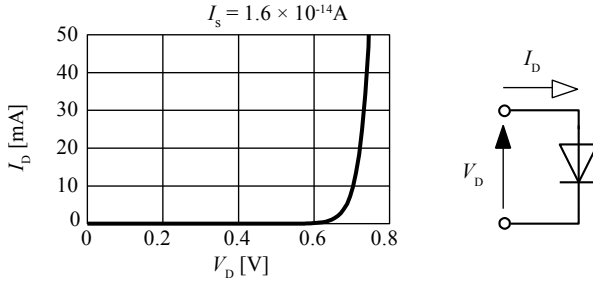


図 3.3 ダイオードの電圧電流特性 (例)

構造によるダイオードの分類には接合ダイオードのほかに、ショットキーバリアダイオード (あるいはショットキーダイオード) , 点接触ダイオードなどがある。また, 特殊なダイオードとして発光ダイオード (LED⁵) , 定電圧ダイオード⁶ や可変容量ダイオードがある。

ダイオードの電圧電流特性は理論的には以下の式で与えられる。

$$I_D = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

ここで, q は電気素量⁷, k はボルツマン定数⁸, T [K] は絶対温度⁹である。特に断らないときは, 絶対温度は 300 K であるとする。また, I_s は逆方向飽和電流と呼ばれる量である。式 (3.1) の電圧電流特性は V_D がある程度以上大きいときは¹⁰, 以下の式で近似できる。

$$I_D \cong I_s \cdot \exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) \quad (3.2)$$

たとえば, V_D が 0.1 V のときは,

⁵ light emitting diode

⁶ ツェナーダイオードとも呼ばれる。

⁷ 電子の電荷の大きさ。おおよそ 1.60×10^{-19} C。

⁸ おおよそ 1.38×10^{-23} J/K。

⁹ 0 K = -273.15°C

¹⁰ おおよそ 60 mV 以上のとき。

$$\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) \cong 47.5 \quad (3.3)$$

であるので、式 (3.2) を用いたことによる誤差は約 2.1% になる。

ここで、熱電圧と呼ばれる量 V_T を以下の式で定義する。

$$V_T \triangleq \frac{kT}{q} \quad (3.4)$$

熱電圧 V_T を用いると、ダイオードの電圧電流特性の近似式は以下のようになる。

$$I_D \cong I_s \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \quad (3.5)$$

絶対温度が 300 K のときの熱電圧 V_T はおよそ 25.9 mV になり、特に断らないときはこの値を用いる。

定電圧ダイオードは図 3.4 のように逆方向に電圧 V を加えたときに、降伏電圧と呼ばれるある電圧 V_B を越えると急激に電流が流れるダイオードである。この性質を用いて一定な電圧を得るために用いられる。

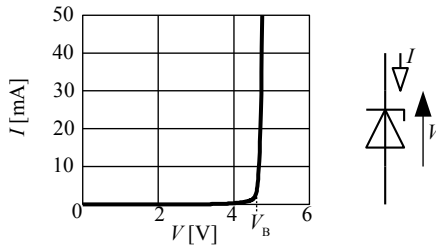


図 3.4 定電圧ダイオードの電圧電流特性 (例)

3.3 バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタは図 3.5 に示す原理的構造を持つ半導体デバイスであり、3つの電極はベース (B)、エミッタ (E) およびコレクタ (C) と呼