

はじめて学ぶ
半導体のしくみ

①半導体物性の基礎

執筆 / 蛭田陽一

株式会社 コガク

講座のねらい

半導体は電子機器の制御のためあらゆる機器に搭載されており、現代の高度情報化社会を支えるインフラとして必要不可欠な存在となっています。半導体が不足することにより自動車や家電の生産が滞り、需要があるにも関わらず製品を販売できないという状況も耳に新しいことでしょう。かつては日本における半導体の開発と生産は世界をリードし、高いシェアを誇っていましたが、東アジア諸国にお株を奪われる状況が続いていました。ところが近年になり、経済安全保障を鑑み十分な半導体の供給を継続的に確保するためにも、再び日本において半導体製造に設備投資する動きが活発になりはじめました。その一方で、半導体の開発と製造に関わる人材が決定的に不足していることが課題となっています。

本講座は、半導体についてはじめて学ぶ技術者のリスキリング、半導体を扱う商社の方の基礎学習などのために、電子の動きを中心としてどのような原理で動作し、どのような機能を果たすか、また半導体関連の専門用語を理解できるよう、可能な限り数式等を使用せず定性的に解説します。そして半導体業界外の方が新規参入するのを手助けできるよう初学者にもわかりやすく指導します。

目次

第1分冊 学習のねらい	1
第1章 私たちの生活と半導体	3
1.1 私たちの生活の中の半導体	4
1.1.1 半導体素子はどこで使われるの？	4
1.1.2 電子部品と半導体素子	5
1.1.3 半導体素子の種類	7
1.1.4 半導体素子の中身	8
1.1.5 半導体素子ができるまで	9
1.1.6 半導体素子が役に立つのはなぜ？	10
1.2 電気と電子	12
1.2.1 電流はなぜ流れるの？	12
1.2.2 電気を表す電圧、電流、抵抗の関係	14
1.2.3 いろいろな物質の電気的な性質	16
1.2.4 電子の性質と電気抵抗	17
1.2.5 電子の電荷	19
付録	20
まとめと練習問題	24
第2章 物質の性質を表現する	27
2.1 物質とエネルギー	28
2.1.1 エネルギーって何？	28
2.1.2 熱のエネルギー	29
2.1.3 位置のエネルギー	30
2.1.4 電気のエネルギー	31
2.1.5 電子のエネルギー	33
2.1.6 光のエネルギー	34
2.2 元素の化学的な性質と周期表	35

2.2.1	元素の性質を表す周期表	35
2.2.2	外殻電子が決める元素の性質	37
2.2.3	半導体と周期表の関係	38
付録		42
まとめと練習問題		43
第3章	半導体の特性と特徴	45
3.1	半導体の特徴を知ろう	46
3.1.1	半導体の電気的な特徴	46
3.1.2	半導体の光感受性	47
3.2	電子が担う半導体の特徴	49
3.2.1	半導体の結晶構造	49
3.2.2	電子配列が決める半導体の振る舞い	52
3.2.3	価電子が作る共有結合	53
付録		56
まとめと練習問題		59
第4章	絶縁体と導体の間にある半導体と不純物の働き	61
4.1	結晶が作るエネルギーバンド	62
4.1.1	半導体の結晶性とバンドの形成	62
4.1.2	真性半導体は絶縁体？	68
4.1.3	不純物の存在・不純物半導体	73
4.1.4	半導体のバンド理論と電気伝導	75
4.1.5	不純物半導体のキャリア数と伝導率	77
4.1.6	半導体のバンド理論と光感受性	79
4.2	半導体内のキャリアの移動が電流	81
4.2.1	電界による移動	81
4.2.2	キャリアの移動と抵抗	83
4.2.3	拡散による移動	84
4.3	キャリアの生成と消滅	85
4.3.1	多数キャリアと少数キャリアの生成	85

4.3.2 電子とホールが会う再結合	87
付録	89
まとめと練習問題	91
参考文献	93
練習問題の解答	95

学習のねらい

本分冊では、半導体について基礎的な理解を得るため、半導体が私たちの生活にどう関わっているのかを知った上で、半導体の特徴や特性を理解します。まず、半導体の特性を理解するために必要な科学的な基礎知識について確認します。そのうえで、半導体の特性が元素を構成する原子や電子の振る舞いと密接に結びついていることを理解します。

第1週では、私たちの暮らしと密接に結びついている半導体がどこで使われているかを説明し、半導体素子の電子部品としての働きとその機能を理解する上での電気的な基礎知識を復習します。

第2週では、物質の性質を表現するためのエネルギーについて解説し、周期表を基に半導体物性の理解を進めます。

第3週では、半導体が持っている材料としての特徴を知り、その特徴が結晶構造に関連したエネルギーバンド構造から説明できることを理解します。

第4週では、真性半導体と不純物半導体について解説し、エネルギーバンド構造から半導体に電流が流れる仕組みを理解します。

■ 第 1 章 ■

私たちの生活と半導体

【学習のポイント】

第 1 章では、私たちの生活にはなくてはならないものになっている半導体が私たちの生活とどう関わり、どこに使われているかを把握します。さらに半導体素子の中身を理解したうえで、半導体の電気的特性を理解するための基礎となる電気と電子についておさらいします。

1.1 私たちの生活の中の半導体

1.1.1 半導体素子はどこで使われるの？

私たちの身の周りにはいわゆる電気製品があふれています（図 1.1）。

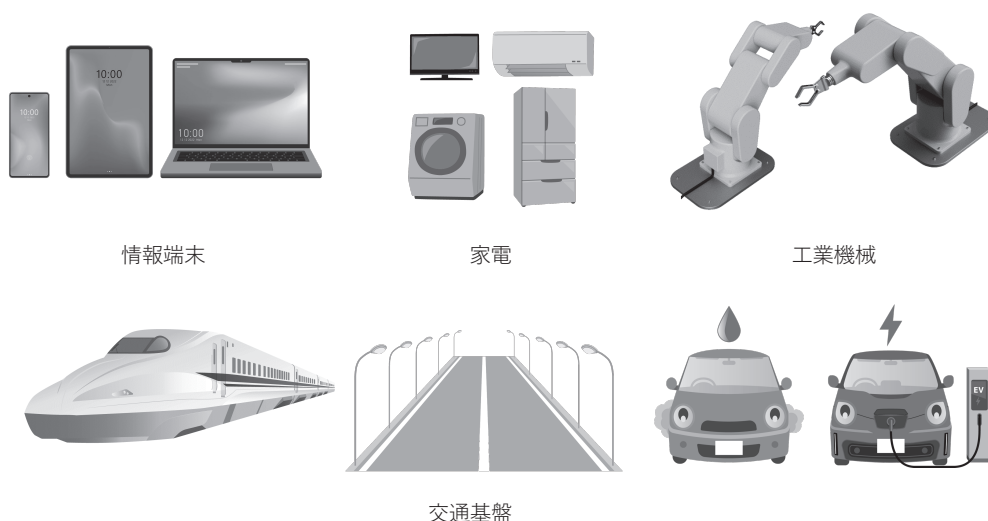


図1.1 身の回りの電気製品

家庭の電気製品であるテレビや冷蔵庫、コンピュータ、スマートフォン、エアコンなどは全て電気で動きます。街の中でも、街路灯や各種ディスプレイには電気が必要ですし、銀行や駅の改札で使われる IC カードや電車も電気で動いています。自動車もハイブリッド車や EV（Electric Vehicle）車の動力は電気で動くモーターですし、いろいろな工場の中で使われる産業用ロボットや工作機械も電気で動きます。この電気は、発電所で発電され変電所や送電線を経て各家庭や工場に届けられます（図 1.2）。発電所で発電された電気を確実に各家庭や工場に届けるため、また届いた電気で電気製品としての動作をさせるためには、電子部品を使って様々な電子機器や電気製品を制御する必要があります。この電子部品の中で重要な位置を占めているのが半導体素子です。

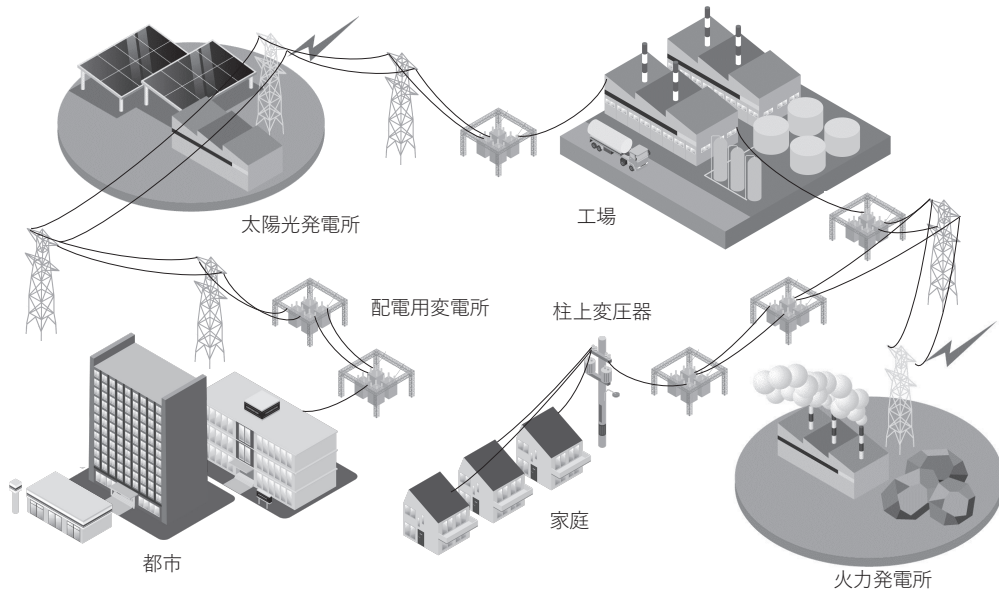


図1.2 電気は発電所から送電線で工場や家庭に送られる

テレビやラジオでは、映像や音声は電波に乗せて運ばれます。電波を放送局から送り出したり家庭で受信したりするためにも半導体素子が必要です。電波の送受信という意味では、人工衛星との通信にも半導体が必要です。このように、現代では半導体素子がなければ私たちの生活が成り立たないほど半導体素子は広く使われているのです。

1.1.2 電子部品と半導体素子

半導体素子の具体的な例として、コンピュータの中を覗いてみましょう。図 1.3 にコンピュータの内部の写真を示します。写真の上部には電源とハードディスクが配置されています。それ以外の部分はほぼ回路基板が占めています。回路基板の上にさまざまな電子部品が並んでいます。中央の右には CPU（中央演算装置 Central Processing Unit）とよばれるコンピュータの心臓部の半導体素子を取り付けられています。また、回路基板の手前は、記憶用のメモリーが複数個搭載されたメモリーモジュールがメモリスロットに差し込まれています。これら以外にも基板上には白枠で囲った数多くの半導体素子が搭載されています。

※白枠内は主な半導体素子

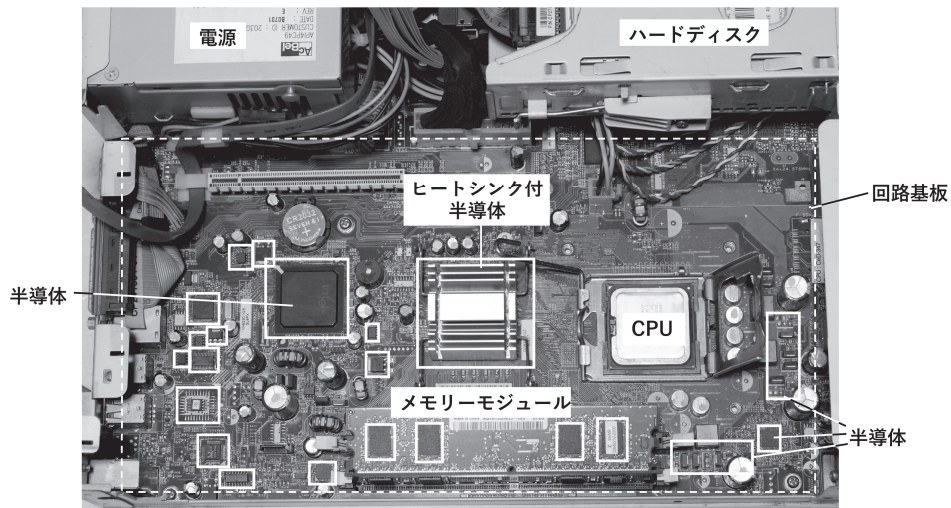


図1.3 回路基板上の電子部品と半導体素子

回路基板は各種の電子部品を電氣的に接続して電気回路を作るための基板です。回路基板の役割を理解するために、回路基板断面の模式図を図1.4に示します。

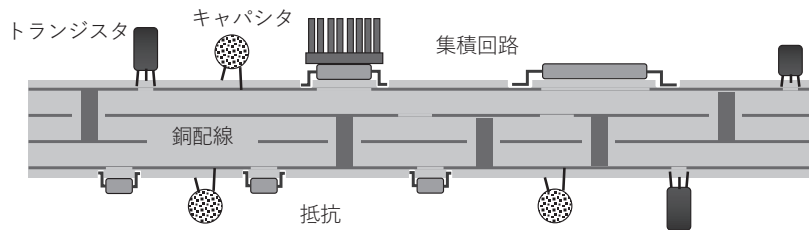


図1.4 回路基板の断面

回路基板には、絶縁体（電気を通さない材質）に挟まれた複数の銅による配線が作り込まれ、これらの配線が半導体素子と各種の電子部品を接続しています。多くの電子部品の中で自ら電気制御を行えるのは半導体素子だけで、他の抵抗やキャパシタにはできません。この意味で半導体素子を能動部品、抵抗やキャパシタを受動部品とよぶことがあります。図1.3の上部の箱は電源でコンピュータ用に直流の電源を生み出しています。この電源の中にも半導体素子が使われています。この図からも一つの電気製品の中にいかに多くの半導体素子が使われているか分かるでしょう。

コンピュータ以外でも、テレビや冷蔵庫、スマートフォンの中には、必ず回路基板が入っていてその上には半導体素子が載っています。今日半導体素子と無関係に働く電気製品を探し出すとしたら、白熱電球くらいかも知れません。白熱電球も半導体であるLED（発光ダイオード:Light Emitting Diode）にとって代わられつつあります。

1.1.3 半導体素子の種類

図 1.3 のように半導体素子（半導体、半導体デバイス、半導体装置ともよばれる）にはさまざまな種類があることが分かります。ここで、半導体素子の種類をまとめておきましょう。図 1.5 は、半導体素子を機能から分類したものです。

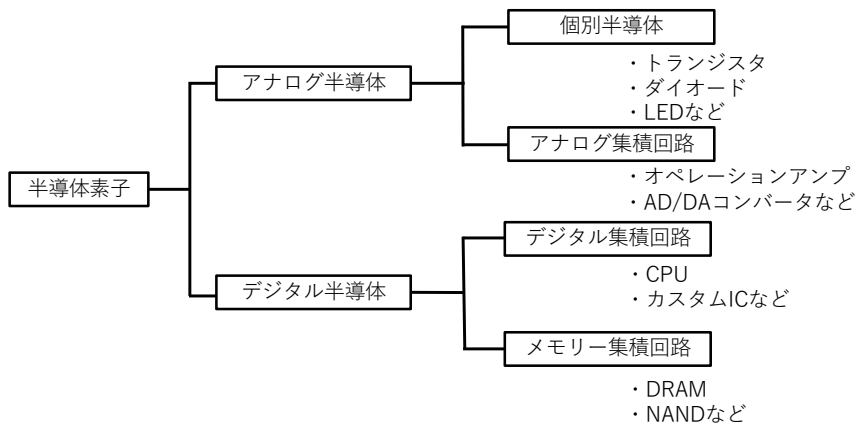


図1.5 半導体素子の機能分類

機能から分けると、半導体素子にはアナログ半導体とデジタル半導体があります。アナログ半導体は、電流や電圧を制御したり整流したりするための半導体素子です。電波の送信や受信にもアナログ半導体が使われます。高電圧、大電流を扱うパワー半導体もアナログ半導体の一種です。アナログ半導体は、たった一つの素子からできている個別半導体と複数の素子を集積したアナログ集積回路に分けられます。デジタル半導体には、デジタル信号を処理し演算を行うCPU（中央演算装置 Central Processing Unit）などの集積回路とデータを記憶するメモリー集積回路があります。デジタル半導体はその機能の複雑さから半導体素子を多数集積する必要があり、集積回路化されています。各種制御用のMCU（Micro Control Unit）や演算処理用の