

まえがき

皆さんは、最近「なるほど！」と思ったことがどのくらいあるだろうか？すでに記憶の彼方^{かなた}ではあるが、著者の経験では比較的「なるほど！」が多かった中学あるいは高校時代に比べて、大学の電気電子系分野に進んでしばらくの間はその経験がほとんどなく、記憶力という観点ではすでに退化が始まっている脳みそに鞭打^{むち}って、試験直前に一所懸命覚えたっけ…、という記憶しか残っていない。当然、そんな一夜漬けで覚えたものなんて、試験が終わってしまえばすっかり忘却の彼方。いまの時代でいえば、ネットで調べた電話番号に電話した後の電話番号それ自体みたいなものといえ、その状況はご理解いただけるかと思う。

本書は、かつて読者の皆さんとまったく同じ立場の受講者であり、いまはそれを教える立場に立っている著者が、電子回路や電子物性などの講義の経験を通じて、それらをどのように説明すれば初学者である読者が理解しやすいかを念頭に置いて書かれたものである。ベースとなっているのは、自分自身の学生時代（それもその大半は大学院に進学してから）、「そういうことだったのか！なるほど！」と思った内容、すなわち理解できたときの思考過程である。我々がものを理解できるか否かは、基本的にはそれまでの実体験に基づいていると著者は信じている。それを筆者はあえて「幼児体験」と呼んでいるが、例えば高校課程において力学は比較的理解しやすい。それは、高いところからモノを落としたほうが、低いところから落とすより、落ちた先にあるつま足は痛いという幼児体験があるからこそ、 $mgh = mv^2/2$ という式が比較的スムーズに頭に入ってくるものと考えられる。しかしながら、 $V = IR$ をはじめとする電気電子

分野に関する諸式および物理現象は、そのベースとなる幼児体験は皆無と
いってよい。本書は、半導体物性やそれを使ったダイオード、トランジスタ、
および、それらを用いる増幅回路などにおける各素子の動作を、でき得る限
り、我々が有する実体験をベースに解説し、読者の皆様にできるだけ多くの
「なるほど!」を満喫してもらうことを目的としている。

2013年3月

著 者

目 次

0. 電気をイメージする —— 電気の可視化 ——

0.1 オームの法則の可視化	2
0.2 交流の可視化	4
0.3 ドライヤのパワー	6
0.4 ま と め	9

1. 電子の動きを理解する

1.1 電 流 の 実 際	10
1.2 「モノ」の移動と「電子」の移動	12
1.3 「ヒト」の移動と「電子」の移動	15
1.4 電流の2要素 —— ドリフト電流と拡散電流 ——	16
1.5 ま と め	17

2. 電子にとっての位置エネルギーと力学的位置エネルギーの比較

2.1 原 子 の 構 造	18
2.2 「モノ」が落ちる現象と力学的位置エネルギー	21
2.3 宇宙から「モノ」を落とす？	23
2.4 ばねの伸びと力学的位置エネルギー	26
2.5 電子にとっての位置エネルギー	29
2.6 ま と め	33

3. 固体における電気伝導——エネルギーバンドの形成——

3.1 単原子, 2原子, N 原子固体における電子のエネルギー(ナトリウム) ……	34
3.1.1 単原子ナトリウム ……	35
3.1.2 2原子ナトリウム ……	37
3.1.3 N 原子ナトリウム ……	41
3.1.4 ナトリウムにおけるエネルギーバンド形成のまとめ ……	44
3.2 単原子, 2原子, N 原子固体における電子のエネルギー(シリコン) ……	45
3.2.1 単原子シリコン ……	45
3.2.2 2原子シリコン ……	46
3.2.3 N 原子シリコン ……	48
3.2.4 シリコンにおけるエネルギーバンド形成のまとめ ……	50

4. 半導体はなぜ「半・導体」か？

4.1 新しい概念の導入 ……	52
4.2 フェルミ・ディラック分布関数の形 ……	53
4.3 フェルミ・ディラック分布関数の意味と特徴 ……	55
4.4 金属, 半導体, 絶縁体 ……	58
4.5 ま と め ……	59

5. 半導体におけるキャリア生成の考え方——自由電子とホール——

5.1 実際の構造とエネルギーバンド図との対比 ……	61
5.2 自由電子と正孔(ホール) ……	64
5.3 真性キャリア密度 ……	72
5.4 ま と め ……	76

6. 半導体における不純物とは？

6.1 n 型半導体 ……	78
6.1.1 実際の構造とエネルギーバンド図との対比 ……	78
6.1.2 フェルミ準位の温度依存性——極低温から低温の領域—— ……	84

6.1.3	フェルミ準位の温度依存性 —— 室温から高温の領域 ——	88
6.1.4	n型半導体のまとめ	95
6.2	p型半導体	98
6.2.1	実際の構造とエネルギーバンド図との対比	98
6.2.2	フェルミ準位の温度依存性 —— 極低温から低温の領域 ——	104
6.2.3	フェルミ準位の温度依存性 —— 室温から高温の領域 ——	108
6.2.4	p型半導体のまとめ	115
6.3	ま と め	116

7. 真性, n型, p型各半導体のキャリア生成の考え方

7.1	キャリア生成の考え方	117
7.2	フェルミ準位	121
7.3	半導体の耐熱温度	122
7.4	ま と め	126

8. 固体結晶内におけるキャリア伝導の式

8.1	電界によるキャリアの動き (マイクロ版)	128
8.2	電界によるキャリアの動き (マクロ版)	135
8.3	ドリフト電流	137
8.4	拡散現象とそれに伴う電流	139
8.5	全電流の式とアインシュタインの関係	144
8.6	ま と め	145

9. 電磁気学の教えるところ —— ポアソン方程式 ——

9.1	電磁気学の教えるところ	146
9.2	ポアソン方程式を使った解析例	153
9.3	平行平板コンデンサのエネルギーバンド図表現	155
9.4	各種電荷分布によって生じる電界・電位差	157
9.4.1	電荷分布の例 (1)	157
9.4.2	電荷分布の例 (2)	158

9.4.3	電荷分布の例 (3)	160
9.5	ま と め	162

10. pn 接合ダイオードとその電気特性

10.1	理想ダイオードの回路図記号・特性とその意味	163
10.2	現実のダイオードの特性例	164
10.3	シリコン pn 接合ダイオードの構造とエネルギーバンド図	166
10.4	順バイアス印加	173
10.5	逆バイアス印加	177
10.6	ま と め	178

11. 金属 - 半導体接触

11.1	仕事関数	179
11.2	金属 - 半導体接触の組合せパターン	181
11.3	金属 - 半導体接触 (1) —— 金属 A, B/p 型半導体, 金属 A/n 型 半導体のパターン ——	182
11.4	金属 - 半導体接触 (2) —— 金属 C/p 型半導体, 金属 B, C/n 型 半導体のパターン ——	188
11.5	ショットキー障壁 (ショットキーバリア)	195
11.6	金属 - 半導体接触の実用上の問題と解決法	199
11.7	ま と め	201

12. バイポーラトランジスタとその電気特性

12.1	バイポーラトランジスタの詳細構造と各端子の役割	203
12.2	特性グラフを読む	205
12.3	特性を生じさせる要因	206
12.4	増幅とは	211
12.5	ま と め	213

索 引	214
-----------	-----

電気をイメージする —— 電気の可視化 ——

この本を手にする人は、すでに電圧、電流、電界などの言葉は耳にしており、抵抗 R に電圧 V を与えたときに流れる電流 I はオームの法則によって $I = V/R$ と表されることを学んでいるであろう。また、 $mgh = mv^2/2$ なる力学の式も学んでおり、すでに数多くの演習問題をこなしてきているはずである。

一方、それぞれの式が表す意味となると、前者は後者ほど理解されていない。著者が思うにこの理由は単純明快であり、それは後者が幼児体験ですでに定性的に会得している物理現象を（単に）定式化している（だけな）のに対し、前者はそのような幼児体験なしに天下り的に覚え込まされたものだからである。

2乗の関係になるかどうかは別として、高いところから落とした石は、低いところから落とした石よりも足の上に落ちてきたときのスピード（すなわち痛み）が大きいということは、幼児体験を経たものであれば必ず知っていることであろう。しかし、抵抗 R を小さくすると電流 I が増えるという現象は、少なくとも幼児体験では得られないはずである。

ここに、電気電子分野の難しさがあると著者は考えている。逆にいえば、電気電子分野で扱う電圧、電流、電界、…、その他の物理量を、幼児体験で我々が会得しているものに置き換えて考えることができれば、おのずから定性的な現象は理解済みということになり、あとはそのイメージに添った形の式を追っていけばよいだけになるだろう。

本書では第一に、頭の中で電気（電圧、電流、電界）をイメージすることを目的とし、それをベースに電子物性工学やアナログ・デジタル各電子回路といった大学の電子工学分野で初めて学ぶ内容を理解できる土壌を作ることとを目的としている。

0.1 オームの法則の可視化

さて、小学生あるいは中学生時代から学ぶオームの法則と、それを可視化してみたものをあわせて図0.1に示す。そもそも電池という言葉は「電」気の「池」という漢字があてはめられていることから、図のような「電気」なるものがたくさんたまっているものと考えられるだろう。まずは第一段階として高いほうの池を電池の+極、低いほうの池を-極と仮決めしてみよう。電圧はいわゆるその「電気」なるものがたまる場所の位置の差であり、電池が満タンの場合はすべての「電気」が電圧の値だけ高い位置にある池にたまっており、低いほうの池が「カラ」の状態とイメージできる。電圧は**電位差**とも呼ばれるが、まさしく「電」気的な「位」置の「差」を表している。さて、この電池に抵抗が接続されているということを、高い位置にある池と低いところの池が管によってつながれていると考えてみよう。すると、その管の太さを表す尺度（正確には管の太さの逆数）が抵抗 R と考えられる。言い換えれば、その管の、「電気」の移動を妨げる程度を表すパラメータが抵抗 R となるであろう。そこを通過して「電気」が下に落下する。その際に管を通る「電気」の量が「電」気の「流」れ、すなわち電流である。この可視化されたオームの法則から容易に推測できることは、管が太くなればそれだけ「電気」の移動を妨げる程度が

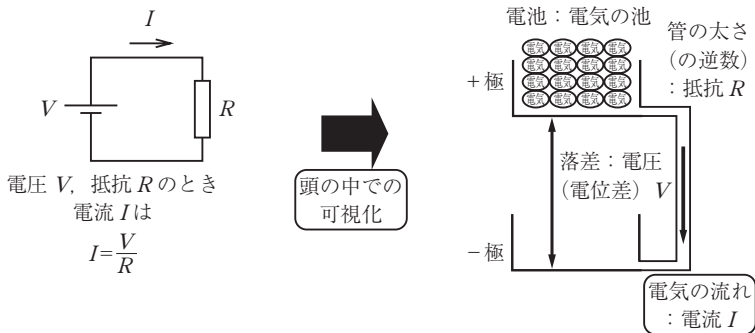


図0.1 オームの法則

小さくなり、その結果「電気」の流れが多くなることであり、抵抗 R が小さくなることによる電流 I の増大が直観的にわかるはずである。

ではここに、管を並列に追加した場合に流れる「電気」の量はどうなるであろうか？ 図 0.2 にその可視化した図を、一般の回路図とともに示す。通路の細い管と通路の太い管が仕切りを挟んで並べられており、その両通路を通して「電気」が流れることができる。細い管は流れに対する抵抗が大きく、太い管はその抵抗が小さいので、図に示したようにたくさんの電気が、スムーズに通れる太い管を通じて流れるだろう。ここで大切なことは、二つの管を流れる「電気」の総量は、太い管（抵抗が小さい管）を流れる量でほぼ決定されているということである。

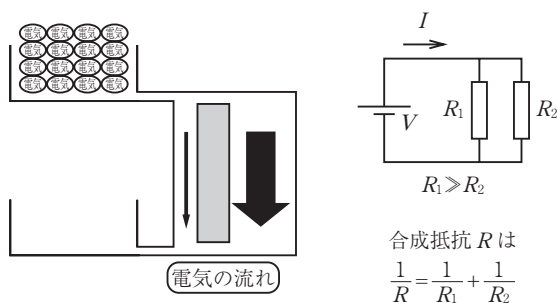


図 0.2 並列回路

一方、右上のような見慣れた回路図が掲載されている、これまで学んだ教科書等では、抵抗 R_1 と R_2 とが並列に接続されている場合（可視化した図の大小関係に抵抗値を合わせるとすれば、管の太さの逆数が抵抗値であるから $R_1 \gg R_2$ となる）、合成抵抗 R は

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (0.1)$$

という値で示されると記載されているのが一般的である。もちろん、式 (0.1) は演習問題を解いていく過程で記憶されてしまうものではあるが、この式の本質は、「抵抗の並列接続における合成抵抗値は、小さい値のものに引きずられる」、すなわち、式 (0.1) の右辺の $1/R_1$ と $1/R_2$ とを比べたとき、分母の小さ

いもののほうが和に寄与する割合が大きく、結果として得られる合成抵抗値は小さな値に近く、かつそれよりもさらに少しだけ小さな値となる、ということ物語っているということである。ここで具体的な例を挙げてみよう。 $R_1=10\ \Omega$ 、 $R_2=1\ \Omega$ とした場合、式(0.1)を用いて合成抵抗値 R を求めれば、 $R=10/11\ \Omega \approx 0.91\ \Omega$ となる。この値は確かに、小さな抵抗値である R_2 ($1\ \Omega$)に近く、かつそれよりもさらに少しだけ小さな値になっていることは明らかであろう。このような観点で再び可視化した図における電気の流れを眺めてみたとき、仮に、細い管と太い管の間の仕切りをなくし、それぞれの管をまとめて1本の管にしてしまっても、流れる総量は変わらないはずであり、まとめて1本にした管の太さは広い管よりほんの少しだけ太いので、その逆数である抵抗値は太い管のそれよりほんの少しだけ小さくなるのが容易に想像できるであろう。なお、コンデンサ C の直列接続においても、合成容量を求める式は、式(0.1)と同様の形になっており、上記と同様、「容量の直列接続における合成容量値は、小さい値のものに引きずられる」という結論を導き出すことができる。

0.2 交流の可視化

家庭で日常用いる電化製品、すなわちテレビや冷蔵庫、ドライヤなどは、その電源をコンセントから得るのが一般的であろう。実際に、現在この文章を書いている著者の机の上を見てみたとき、パソコンやモニタ、プリンタ、はたまた

た電話の充電器まで、たくさん電源コードがコンセントあるいはコンセントから延長したテーブルタップに所狭しと差し込まれている。このコンセントの電圧は、これまでに電気回路関連の講義で学ん

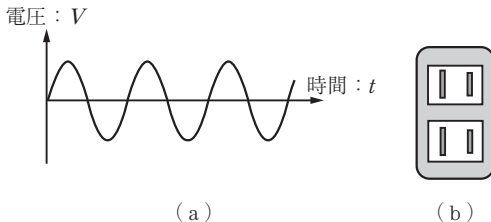


図0.3 コンセントの電圧とコンセント

だように、**図 0.3** (a) のような正弦波波形になっているということをこの本の読者はすでに知識として知っているであろう。ただし、この波形が**図 (b)** に示した実際のコンセントの何に対応しているのかという質問を投げかけても、近年、なかなか答えが返ってこないのは残念なことである。

図 (a) に示した電圧波形は、横軸が時間、縦軸が電圧となっていて、時間とともに電圧の値が時々刻々と

変化していることはわかる。この縦軸の値こそ、コンセントの左右それぞれの差込口の内部にある金属端子間の、それぞれの時間に対応した電圧すなわち電位差を表している。これを可視化した図として具体的に**図 0.4** に示そう。コンセントの電圧波形とは、コンセントの左側の金

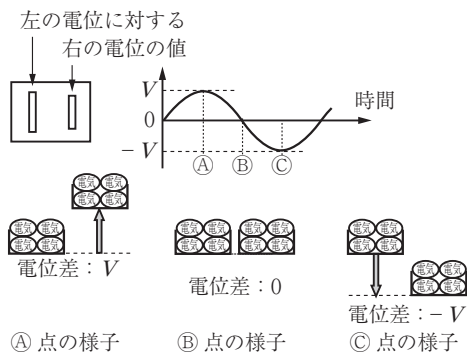


図 0.4 コンセントの電圧変化の様子

属端子の「電気」的な「位」置すなわち電位を基準に、コンセント右側の端子の電位が相対的にどのくらいのところに位置するかを各時間ごとに示したものである。電圧波形の①点の時間的瞬間には、左側端子の電位に対して、右側端子の電位が①点のところのグラフの縦軸値 V に対応した分だけ高いことを示しており、③点の瞬間には、左側の電位に対して、右側の電位がそのグラフの縦軸値分 $-V$ だけ高い（表現を変えれば、 V だけ低い）ことを示している。このように左右の電位の差が時々刻々と変わり、その上下関係さえも逆転するコンセントに、例えば電気スタンドをつないだとしよう。電気スタンドの電球も、**図 0.1** に示した抵抗のようなものと考えられるから、左右の電気の池の間を、抵抗値の逆数の太さを持つホースでつなぐようなイメージになるであろう。この場合も、電源の電位差に応じて「電気」が上から下へ落下し、電球はその際に「電気」が失う位置エネルギーを受け取り、熱や光として放出する。この場合、先の**図 0.1** と異なる点は、電位差が時間とともに変化すること

から、電流の向きと大きさが時々刻々と変化し、その瞬間瞬間に受け取る電気のエネルギの値が異なることである。実際、図 0.4 における ⑩ 点では、コンセント左右の電位差が 0 となり、この瞬間は電気の落下は起こらず、エネルギー放出は 0、すなわち電球は消えているはずであるとの予測がつく。

図 0.3、図 0.4、あるいは、それらよりも現在この本を読んでいる読者の最も身近にある実際のコンセントの形状を注意深く見てほしい。左右の差込口の長さに違いがあることに気付くであろう。電位差を得るという観点ではその相違を意識する必要はまったくないが、実際には、長いほうをアース（earth；地球、大地、地面）電位とするように決められており、いわゆる地面の電位と同じ電位となっている。余談ではあるが、感電という現象は例えば、指先と地面に接している足との間に大きな電位差が生じたとき体内を貫通する電流によって生じる衝撃であるが、仮に手に金属製クリップを持ったまま、誤ってコンセントのどちらかにそのクリップを突っ込んでみたとしても、1/2 の確率で感電は免れるということの意味している（もちろん読者の方々には、運試しに自分の命を犠牲にするリスクを負うまねはしないでいただきたい。さらに、長いほうならば…、と安易にこの本を信じないでほしい。君が触ろうとしているそのコンセントを設置、配線した方を知っていて、彼が本当に信頼できる人間だったとしても、その後、夜中に建築現場に忍び込んで逆につなぎ変える悪人がいるかもしれない…。本当にどちらかの端子がアース電位と同電位かどうかを調べるために、この本の読者であればテスタというものが世の中に存在することを知っているであろう…。なお、図 0.4 に示したコンセント電圧のピーク値 V は $100\sqrt{2}$ V であるが、一般にはこれを実効値で表し、AC 100 V と表現することはご存知であろう。

0.3 ドライヤのパワー

「もっと強力なパワーのドライヤってないの？私、髪の毛が多いから普通のじゃあ乾かすのに時間がかかってしょうがないんだよね。」「はあ、当店で扱

いはここにあるものだけでございまして…」」。あるとき著者は、家電量販店の店頭で女子生徒と彼女に詰め寄られた店員とのやり取りを耳にしたことがある。こういう答え方をすると、電気のことますますわからなくなってしまうのである。「1500 W なんてケチなことはいわずに、特別注文をしていただければ2000 W でも3000 W でも作ることはできます。ただ、あなたの家が火事になる可能性があります、それでもよろしいですか？」という答えをすべきなのである（しかし、このような答え方をすれば、ますます電気が嫌いになることは必定であるが）。ここで W というのは電力の単位であり、一般に実効値で表した電圧×電流で求められる量と考えてよい。多分この女子生徒は、ドライヤはコンセントに挿して使うことを前提としていて、よもや専用電源を用意しようとは考えていないであろうとの著者の勝手な推測に基づいて話を進めたい。コンセントの電位差は前述のようにピーク値 $\pm 100\sqrt{2}$ V と定まっておき、実効値は100 V であるから、ドライヤのヒータ部分を太くするなり短くするなりして抵抗値を下げれば、それだけ流れる電流量を増やすことができ、結果として3000 W のドライヤを作ることはできる。したがって、ここで求められる電流実効値は30 A ということになるであろう。

一方、先ほど0.2節で見た実際のコンセントをさらに注意深く見てもらえれば、15 A 125 V との記載を見つけ出すことができるだろう。この場合大事なのは15 A との表記のほうで、このコンセントには15 A までしか流してはいけませんという意味である。裏を返せば、我々はやりようによっては、そのコンセントに15 A 以上の電流を流すことができるということである。けっきょく、コンセントに挿す機器は我々が任意に選べるので、抵抗値の小さな、いわゆる管の太さが太い機器を接続することは原理上可能であり、結果としてコンセントに多大な電流を流すことが可能である。図0.5に示すような配電盤（各家庭のブレーカが設置されて

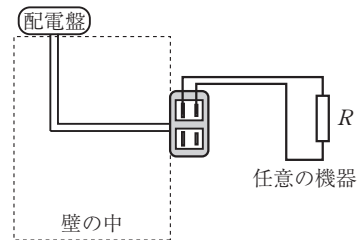


図0.5 コンセント以前とコンセント以降

いるもの) から壁の中を通してコンセントまで来ている電線は、基本的に 15 A までの使用を前提とした金属線が使われている。これは、電線の金属にもきわめて小さいながらも抵抗があり、その値を R' とすれば I^2R' の電力が消費され、結果として壁の中の電線が多少なりとも暖まることになるという事実に基づいている。図 0.5 に示したように、コンセントに挿す機器は任意のものが選べるので、機器の抵抗 R の値によって、壁の中の電線で消費される電力を調整可能である。すなわち、市販の機器のような、コンセントに記載された電流までしか流さないように（正しく）設計されたものなら、 I^2R' の電力が熱として壁の中に放出されてもたいした影響はないが、特別注文の機器を用いることで電流値が倍になれば電力は 2 乗で効いてくるので発熱量も無視できなくなる。実際に普通に市販されているドライヤでも、長時間使っているとドライヤに接続されている電源コード自体が温まってくるのを体感したことがある読者もいるだろう。なるべく安物のドライヤのほうがそれを感じやすいが、その原因の一つとして、安物は電源コードも安いものを用い（通常、そのコードの中には比較的安価な銅が電線として使われているが）、さらにコストを下げるべく銅自体の使用量を極力抑えるため細い電線が用いられていることが多く、実際に抵抗値が大きく発熱を体感できる (?) のである。

金属の配線にも抵抗があるということを踏まえた、電源から配線、およびヒータを含めてドライヤの系全体を可視化してみたものを図 0.6 に示す。図 (a) は、通常市販のドライヤの場合であり、図 (b) は女子生徒の要望に応じ

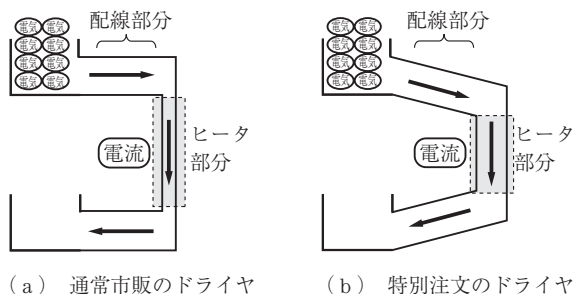


図 0.6 電源からドライヤまでの可視化イメージ

て作った特別注文のドライヤを用いた場合である。いずれもコンセントから供給される電圧を電源として用いているのであるから、実際には電源の高さの差は $\pm 100\sqrt{2}$ Vをピーク値として時々刻々と変わるのであるが、紙の上ではアニメーションは使用できないので、図にはある時間瞬間の様子を例として示している。

さて、図(a)の場合は、ヒータ部分の抵抗が比較的大きく管の太さが細いので、電源から与えられたある電位差によって流れる電流値はかなり制限されることになる。一方、図(b)の場合は、ヒータ部分の抵抗を小さくする、すなわち管の太さを太くすることで、同じ電位差でたくさんの電流が流れるように設計されている。ここで重要なことは、たくさんの電流が流れる場合には、金属の抵抗 R' の存在が、それが使われている配線部分に無視し得ない程度の電位差($V=IR'$)を生じさせ、結果としてヒータ部分だけでなく、電源コードおよび壁の中の配線部分も暖まってしまうことになる。

実際にはもちろん、万が一特別注文のドライヤを入手できたとしても、配電盤から各コンセントへつながるところには、家全体のブレーカとは別にそれぞれ小さい容量のブレーカ(20 Aが一般的)が取り付けられており、壁の中が火事になる前に、そのブレーカが電流を遮断してくれる。

0.4 ま と め

電圧(電位差)、電流、抵抗といった、目に見えないものをこれまで一所懸命学んできた読者の方々に、ぜひそれらを可視化することによる理解のしやすさを実感していただくために、あえて「0章」を作ってみた。読者の方々が、以前より視界が晴れたと実感してくれたのであれば、とりあえず0章を作った目的が達せられたと思う。

索引

【あ行】	コンセント	4	電位差	2, 13	
アインシュタインの関係	145	【さ行】	電界	1, 13	
アクセプタ密度	116	再結合	169	電荷中性	35, 61
アース	6	仕事関数	179, 180	電子雲	36
イオン化不純物散乱	134	質量作用の法則	76, 120	電束	149
位置エネルギー	18, 21	自由電子	60, 67	電束密度	149
移動度	136	順バイアス状態	165	電池	2
イレブンナイン	60	少数キャリア	118	伝導帯	50
運動エネルギー	21	状態密度	45, 74	電流	1
エネルギーギャップ	50	状態密度関数	119	電力	7
オーミック接触	187	ショットキー障壁高さ	195	凍結領域	124
オームの法則	1	ショットキー接触	187	ドナー密度	116
【か行】	シリコンイオン	62	ドリフト速度	136	
拡散係数	142	真空準位	43	ドリフト電流	16, 136
拡散電流	16, 139	真性キャリア密度	72	【な行】	
活性化	78	真性半導体	60	内蔵電位	176
価電子帯	50	真性フェルミ準位	91	熱平衡状態	187
逆バイアス状態	165	真性領域	125	濃度勾配	142
逆方向飽和電流	165	正孔	60, 69	【は行】	
キャリア	16	正バイアス状態	165	波束	200
——の散乱	134	整流性	163	ばね	26
境界条件	153	接触電位差	180	ハミルトニアン	37
共有結合	61, 63	絶対温度	54	パンチスルー現象	211
禁制帯	82	増幅	204	バンドギャップ	50
金属-半導体接触	158	【た行】		万有引力	23
空間電荷	83, 104	第二宇宙速度	32	比誘電率	150
空乏層	172	多数キャリア	118	標高差	12
クーロン力	29	立上り電圧	165	フェルミ準位	43, 54, 121
格子散乱	134	中性領域	172	フェルミ準位 (の再定義)	57
合成抵抗	3	抵抗	2	フェルミ・ディラック分布	
合成容量	4	抵抗率	58	関数	53
勾配	12	電圧	1	不確定性原理	36

不純物	77	ホール	60, 69	溶融シリコン	97
不純物準位	82	ボルタ効果	180	【ら行】	
負バイアス状態	165	ボルツマン定数	54		
平衡状態	171	ボルツマン分布	120	粒子保存則	143
ベース幅	209	【や行】			
ポアソン方程式	153				
飽和領域	124	有効質量	132		



【B】		【M】		p 型半導体	98
Boltzmann 分布	120	MOS 構造	161	【S】	
【F】		【N】			sp ³ 結合性軌道
Fermi-Dirac 分布関数	53	n 型半導体	78	sp ³ 混成軌道	61
【I】		【P】		sp ³ 反結合性軌道	48
I-V 特性	163	pn 接合	160	【数字】	
					3s バンド

— 著者略歴 —

- 1986年 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業
1988年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）
1991年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了（電気工学専攻）
工学博士
2007年 東京農工大学准教授（工学部電気電子工学科）
現在に至る

わかりやすい電子物性

— はじめて学ぶ電子工学 —

Introduction to Electronic Materials

— Electronic Engineering for Beginners —

© Tomo Ueno 2013

2013年 4月30日 初版第1刷発行



検印省略

著者 うえの ともお 雄
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 ・ 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00848-7 (横尾) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします