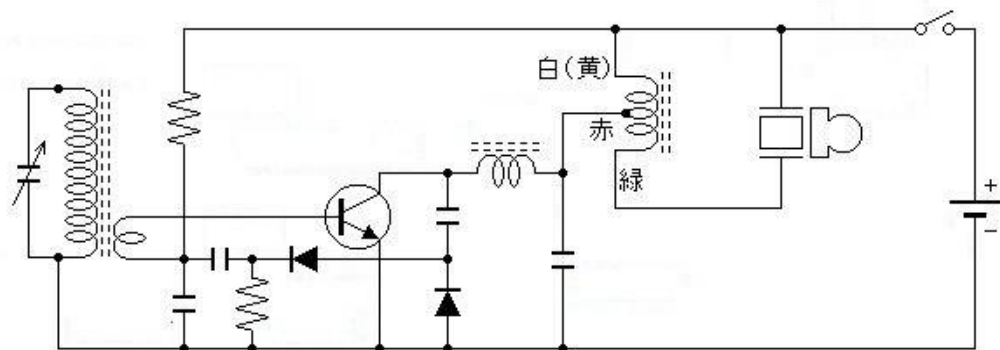
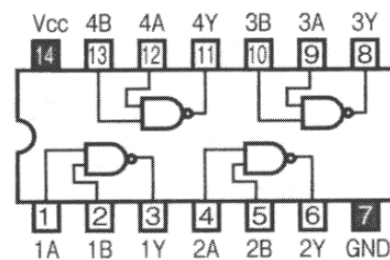


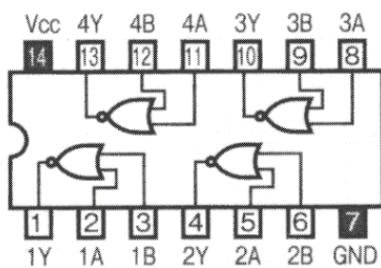
***** 電子情報編 *****



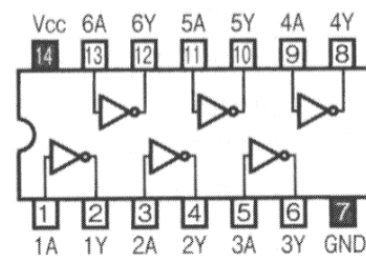
論理式： $Y = \overline{A \cdot B}$



論理式： $Y = \overline{A + B}$

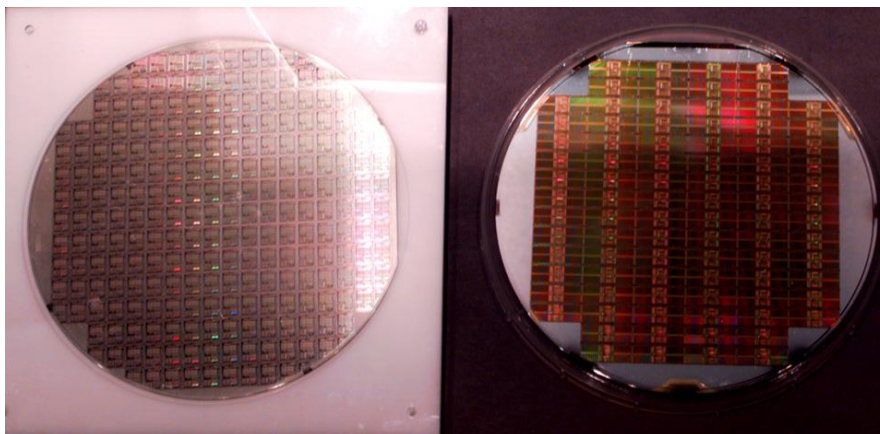


論理式： $Y = \overline{A}$



電子情報編

1 章 導体と半導体



回路が作られた状態のシリコンウエハ

半導体は、現在の電子機器を構成する最も重要な部品の材料である。
半導体とはどのようなもので、どんな特徴があるのだろうか。半導体のしくみ
だけでなく、その歴史や製造に関わる技術、将来の展望などについても考
えていこう。

【理科との関連】

学習項目	理科(物理)の学習単元			
	科目名	大単元	中単元	小単元
1、導体とは何か	物理基礎	様々な物理現象とエネルギーの利用	電気	物質と電気抵抗
2、半導体とは何か	物理基礎	様々な物理現象とエネルギーの利用	電気	物質と電気抵抗
3、真性半導体とN形半導体	物理	原子	原子と原子核	原子とスペクトル
4、P形半導体とN形半導体	物理	原子	原子と原子核	原子とスペクトル

1 章 導体と半導体

1－1 導体とは何か

私たちは経験から、電気の流れやすい物質と流れにくい物質があることを知っている。電気の流れやすいものを導体という。電気製品で使われている銅線をはじめ、金・アルミニウムなどがそうである。水は不純物が混入していると電気が流れ、純水では電気が流れない。導体の物質に共通するものは何だろうか。

1869 年、ロシアの科学者メンデレーエフが、原子を原子量順に並べると似た性質の元素が『周期的』に現れるということに気づいた。これを表にしたのが周期表である。現在使用されている周期表を図 1－1（a）に示す。周期表からわかるように、銅・銀・金は同じ 1 1 族にある。したがって、銅や銀・金は同じ性質を持っていると考えられる。

族/周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 1.008																	2 He ヘリウム 4.003
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012											5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16	9 F フッ素 19	10 Ne ネオン 20.18
3	11 Na ナトリウム 22.99	12 Mg マグネシウム 24.31											13 Al アルミニウム 26.98	14 Si ケイ素 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95
4	19 K カリウム 39.1	20 Ca カルシウム 40.08	21 Sc スカンジウム 44.96	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.94	24 Cr クロム 52	25 Mn マンガン 54.94	26 Fe 鉄 55.85	27 Co コバルト 58.93	28 Ni ニッケル 58.69	29 Cu 銅 63.55	30 Zn 亜鉛 65.39	31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ゲルマニウム 72.61	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.96	35 Br 臭素 79.9	36 Kr クリプトン 83.8
5	37 Rb ルビジウム 85.47	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.91	40 Zr ジルコニウム 91.22	41 Nb ニオブ 92.91	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム [99]	44 Ru ルルチウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	57-71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム 178.5	73 Ta タンタル 180.9	74 W タングステン 183.8	75 Re レニウム 186.2	76 Os オスミウム 190.2	77 Ir イリジウム 192.2	78 Pt 白金 195.1	79 Au 金 197	80 Hg 水銀 200.6	81 Tl タリウム 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 209	84 Po ポロニウム [210]	85 At アスタチン [210]	86 Rn ラドン [222]
7	87 Fr フランシウム [223]	88 Ra ラジウム [226]	89-103 アクチノイド															
	* ランタノイド		57 La ランタン 138.9	58 Ce セリウム 140.1	59 Pr プラセオジム 140.9	60 Nd ネオジム 144.2	61 Pm プロメチウム [145]	62 Sm サマリウム 150.4	63 Eu ユークリウム 152	64 Gd ガドリニウム 157.3	65 Tb テルビウム 158.9	66 Dy ジスプロシウム 162.5	67 Ho ホルミウム 164.9	68 Er エルビウム 167.3	69 Tm ツリウム 168.9	70 Yb イタリウム 173	71 Lu ルルチウム 175	
	** アクチノイド		89 Ac アクチニウム [227]	90 Th トリウム 232	91 Pa パラドキシム 231	92 U ウラン 238	93 Np ネプツニウム [237]	94 Pu プルトニウム [239]	95 Am アメリシウム [243]	96 Cm キュリウム [247]	97 Bk バークリウム [247]	98 Cf カリフォルニウム [251]	99 Es エールビウム [252]	100 Fm フェルミウム [257]	101 Md メンデルビウム [258]	102 No ノーベリウム [259]	103 Lr ローレンシウム [260]	

図 1－1（a） 周期表

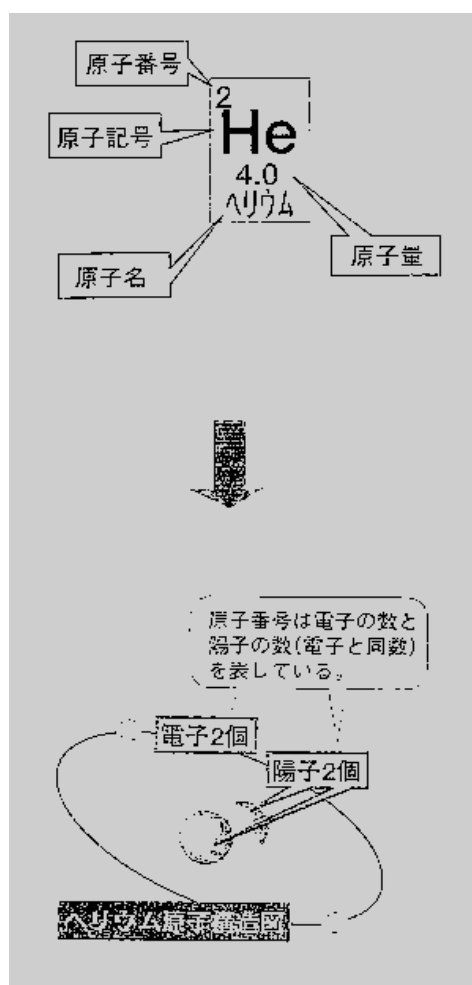


図1-1(b) 周期表の見方(ヘリウムの例)

原子の性質は原子構造で決まる。原子の構造は原子核とその周りを回る電子からなる。電子は勝手に原子核の周りを回っているのではなく、一定の軌道がある。この電子軌道のことを電子殻と呼び、図1-2に示すようにK殻・L殻・M殻・N殻と順番に電子の入る数が決められている。そして、一番外側を回っている電子の数で原子の性質が決まる。

電子殻	K殻	L殻		M殻			N殻			
副殻	1 s	2 s	2 p	3 s	3 p	3 d	4 s	4 p	4 d	4 f
電子数	2 個	2 個	6 個	2 個	6 個	10 個	2 個	6 個	10 個	14 個

※副殻で使用されているs・p・d・fは sはshape pはprincipal dはdiffuse fはfundamental の頭文字でアルカリ金属の原子スペクトル系列に由来するが、現在ではその本来の意味はない。

図1-2 電子殻と電子数

この電子軌道から、銅原子について考えると、銅の原子番号は29なので電子の数も29個である。電子は図1-3のようにK殻から順番に電子が入っていくので、M殻で28個の電子が入る。残りの1個の電子はN殻の4s軌道を回っている。(※注1)

電子はスクラムを組んだようにして安定する。銅の場合、たった1個の電子がN殻4sの軌道を回っているから、この電子については不安定な状態になり軌道から外れ浮遊しやすくなる。一番外側の軌道(最外殻)の電子が1・2個の場合は不安定な状態とみなされる。これが自由電子になりえる。

したがって、導体とは物質の中で自由電子が多く存在するものだといえる。自由電子がある方向へ動き出すとそれが電流となる。

(※注1) 電子と軌道の関係は複雑なところがあり、M殻3pまでは電子が規則正しく入っていくが、それ以降はN殻4sに電子が入ってからM殻3dに戻るという形をとる。銅の場合はM殻3dに10個の電子が入ってからN殻4sに1個の電子が入ることになる。

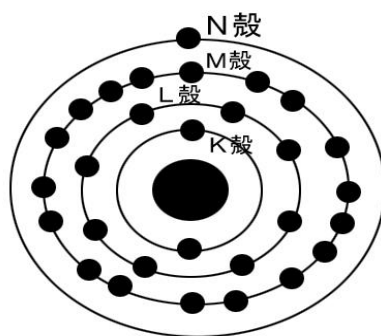


図1-3 銅の電子軌道

課題 13 族にあるアルミニウムの電子軌道を調べてみよう。

	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Ek	a	-	Rn									
	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	5s	5p	4f	5d	6s	6p	5f	6d	7s	7p
01 H	1																		
02 He	2																		
03 Li	2	1																	
04 Be	2	2																	
05 B	2	2	1																
06 C	2	2	2																
07 N	2	2	3																
08 O	2	2	4																
09 F	2	2	5																
10 Ne	2	2	6																
11 Na				1															
12 Mg				2															
13 Al		10		2	1														
14 Si	ネ	オ	ン	2	2														
15 P		核		2	3														

1-2 半導体とは何か

現在の電気回路(電子回路)は、電気が流れるか流れないかで区別された導体・絶縁体だけでは成り立たない。導体とも絶縁体とも異なり、ある程度電気を流すものを半導体と呼ぶ。

導体(conductor)・絶縁体(insulator)・半導体(semiconductor)を分けるめやすとして、電気を通す度合いを表す抵抗率(resistivity)が用いられる。抵抗率とはその物質の断面積 1 m^2 、長さ 1 m あたりの電気抵抗値をいう。 $[\Omega \cdot \text{m}]$ (オームメートル)が単位となる。さまざまな物質の抵抗率を図1-4に示す。

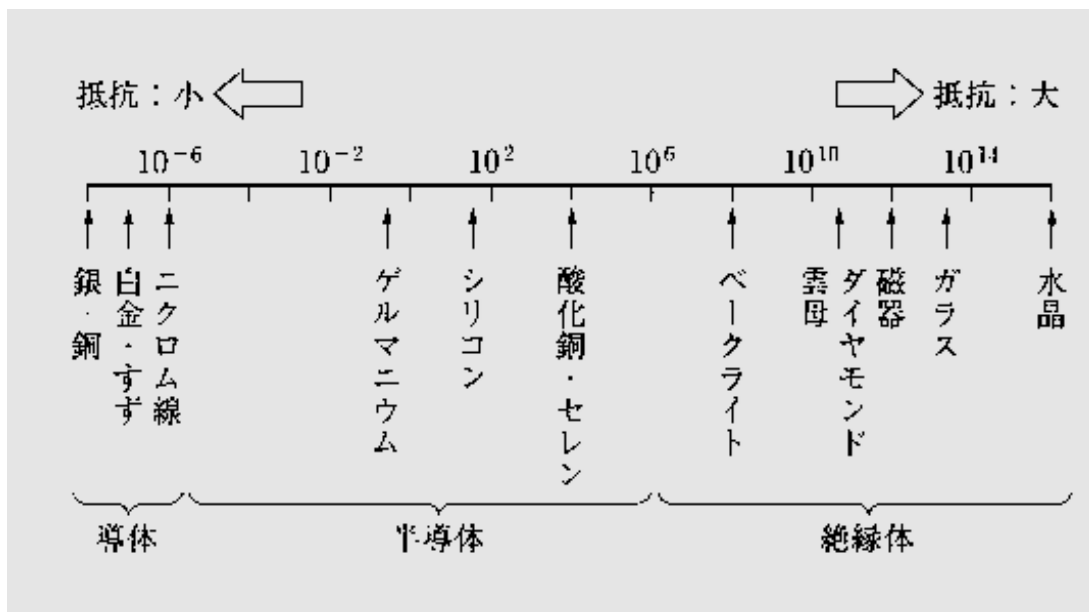


図1-4 いろいろな物質の抵抗率

1-3 真性半導体

導体と絶縁体の中間の性質を持っているのが半導体で、シリコンが現在一般的に使用されている材料である。半導体を電気材料として使用するには、ある条件で電気の流れる量を調整できるようにする。それにはまず純度の高い半導体を作る必要がある。これを真性半導体(intrinsic semiconductor)と呼ぶ。純度の高さは次のように示される。

真性半導体の純度 99.999999999[%]

これを、9が12桁続くので、トゥエルブナインとも呼ぶ。

シリコン(ケイ素)は最外殻での電子数が4個の4価の元素である。上記の純度で結晶を作ると図1-5のように結合することになる。このような結合を共有結合と呼ぶ。共有結合された真性半導体では電気を流すための自由電子はない。つまり、真性半導体の状態では電気伝導がない絶縁体になる(※注2)。電子部品で用いられる半導体は、この真性半導体を作る工程の途中で微量の不純物を入れる。混入する不純物によって、P形半導体やN形半導体のように性質の異なった半導体を作ることができる。また、性質の違う半導体を組み合わせれば条件によって電気の流れを制御することができるようになる。

(※注2) 真性半導体の場合は荷電子帯と伝導体の間の禁制帯が狭いので、常温になると熱振動によって荷電子帯から電子が飛び出して自由電子が生じる。しかし、このような状態では製品にできる安定した特性をもつ素子にはならない。

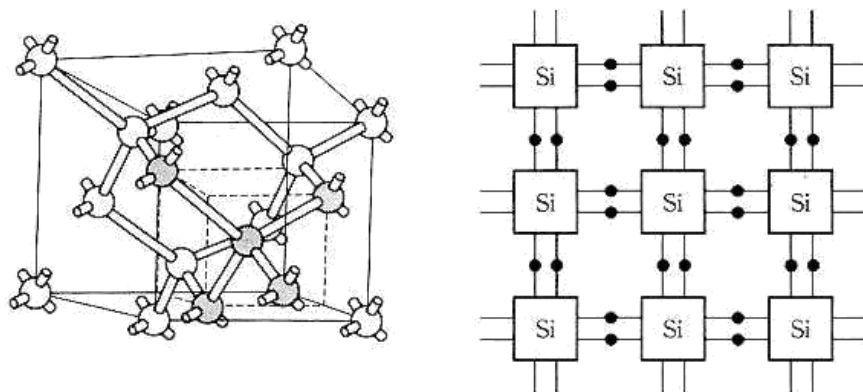


図1-5 真性半導体の原子結合

1-4 P形半導体とN形半導体

前項で示したように4価のシリコンを利用して真性半導体を作る。ただし、常温では自由電子がある。自由電子があるということは、外れた電子のところに穴が空くことになる。つまり、真性半導体の中には自由電子と外れた穴がある。

真性半導体の中に不純物を入れることで、自由電子だけの半導体や穴だらけの半導体を作ることができる。それがP形半導体とN形半導体である。

(1) N形半導体

シリコンの真性半導体を作る工程の途中で、原子価が5価の元素ひ素(As)、リン(P)、アンチモン(Sb)などを微量に混ぜて結晶を作る。たとえば、ひ素を微量に入れた場合は図1-6のようにシリコンの結晶の中にひ素が混ざって結晶化される。ひ素は5価だから電子が1つ余る。この余った電子(過剰電子)が自由電子となって結晶の周りを浮遊する。これを、電子を多くもつ半導体であることから、**negative**(電子はマイナスなので)のNを使ってN形半導体と呼ぶ。こうした過剰電子を生じさせる元素(ひ素やりん、アンチモンなど)をドナー(donor)と呼ぶ。またこのときのエネルギー準位をドナー準位という。

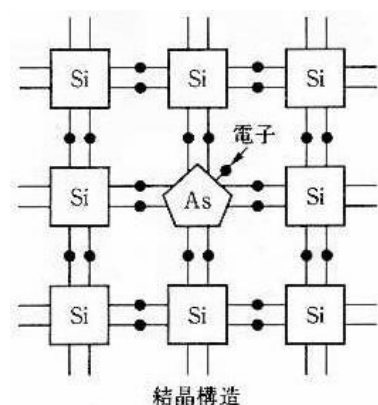


図1-6 N形半導体の原子結合

(2) P形半導体

3価の元素であるガリウム、ホウ素やインジウムなどをシリコン結晶の中に微量に混入させると、結晶が完成したときは電子が足りないので穴の空いたような状態になる(図1-7)。この

穴を正孔(せいこう)またはホール (hole) と呼ぶ。正孔を多くもつ半導体は **positive**(電子が足りないということはプラスなので)のPを使ってP形半導体と呼ぶ。また、正孔を作るための元素(ガリウム, ホウ素, インジウム等)をアクセプタ (acceptor) とい、このときのエネルギー準位をアクセプタ準位という。

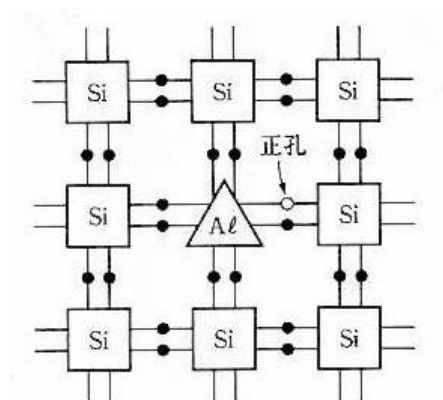


図1-7 P形半導体の原子結合

(3) キャリア

N形半導体には電子が、P形半導体には正孔が多数ある。この電子や正孔が電気を流す担い手となり、これをキャリアと呼ぶ。これらをまとめたのが表1-8である。

半導体の種類	電流の担い手		不純物の元素
	多数キャリア	少数キャリア	
N形半導体	自由電子	自由正孔	ドナー(5価の原子)
P形半導体	自由正孔	自由電子	アクセプタ(3価の原子)
真性半導体	同数のため区別せず		なし

表1-8 各半導体とキャリアの関係

練習問題

【問題 1-1】 次の文章において，[]に適当と思われる字句を入れなさい。

1. 電気が流れるとは，[①]が[②]に流れることをいう。この時，電気が流れやすいか流れにくいかを判断するのに[③]が用いられる。その単位は[④]である。この値が 10^{-6} 以下を[⑤]といい， 10^6 以上を[⑥]と呼ぶ。また，この中間にあたるのが[⑦]と呼ばれるもので，現在の電子機器では無くてはならない素子の材料である。
2. 半導体として利用される物質は，現在[⑧]である。これを純度[⑨]%で結晶化したもので[⑩]と呼ばれる。しかし，これは電気を流す担い手となる[⑪]を持っていないので，微量の[⑫]を混入することによって，[⑬]や[⑭]を作る。
3. N形半導体は，不純物として，[⑮]価の物質を混入する。この不純物のことを[⑯]と呼ぶ。これにより，結晶の中に[⑰]が多く含まれる半導体となる。
4. P形半導体の場合は，不純物として[⑱]価の物質を混入する。この不純物を[⑲]と呼び，この結晶の中に[⑳]が多く含まれることになる。

参考

半導体が開発されるまでのビデオを観賞してみよう。

(NHK特集 「電子立国日本の自叙伝」 など)

電子情報編

2章 ダイオードの特性と回路



整流用ダイオード



発光ダイオード

半導体素子の基本的な性質は、ダイオードのはたらきとして使われている。ダイオードの非線形とよばれる性質は、物質の電氣的性質や回路の性質を理解するためにも重要である。

【理科との関連】

学習項目	理科(物理)の学習単元			
	科目名	大単元	中単元	小単元
1、ダイオード	物理	電気と磁気	電気と電流	電気回路
2、ダイオードの原理	物理	電気と磁気	電気と電流	電気回路
3、ダイオードの特性	物理	電気と磁気	電気と電流	電気回路
4、簡単なダイオード回路	物理	電気と磁気	電気と電流	電気回路
5、発光ダイオード	物理	電気と磁気	電気と電流	電気回路
6、整流回路	物理	電気と磁気	電気と電流	電気回路

2章 ダイオードの特性と回路

2-1 ダイオード

不純物を混入した半導体(ドナーの入ったN形半導体またはアクセプタの入ったP形半導体)を組み合わせ、電子部品で使用する半導体が作られている。

ダイオード(diode)とは、P形半導体とN形半導体を対(つい)にした半導体のことをいう。ダイオードのダイ di とは、対という意味である。図2-1に示すようなP形半導体とN形半導体の接合をPN接合(pn junction)といい、その境界を接合面という。

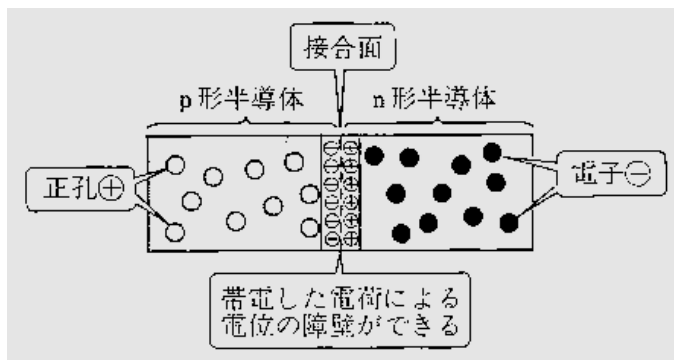


図2-1 ダイオードのPN接合

2-2 ダイオードの原理

(1) 外部電源が無い場合

PN接合したダイオードの内部ではどのようなことが起きているのだろうか。図2-2に示すように、P形半導体には正孔(ホール)が多数あり、N形半導体には電子が多数ある。この両者の半導体が接合されている接合面では、P形側ではN型にある電子と結びつこうとする。逆にN形側ではP形になる正孔と結びつこうとする。つまり、接合面の境界ではP形とN形の両者にある電子と正孔が結びついて中和する。そうすると、接合面の境界では正孔も電子もないエリアができる。このエリアのことを空乏層(depletion layer)という(※1)。そして、電源を接続しない状態では、ある程度、電子と正孔が結びついたところで安定する。

(※1 空乏のところにはP形には負の電荷、N形には正の電荷が発生している。)

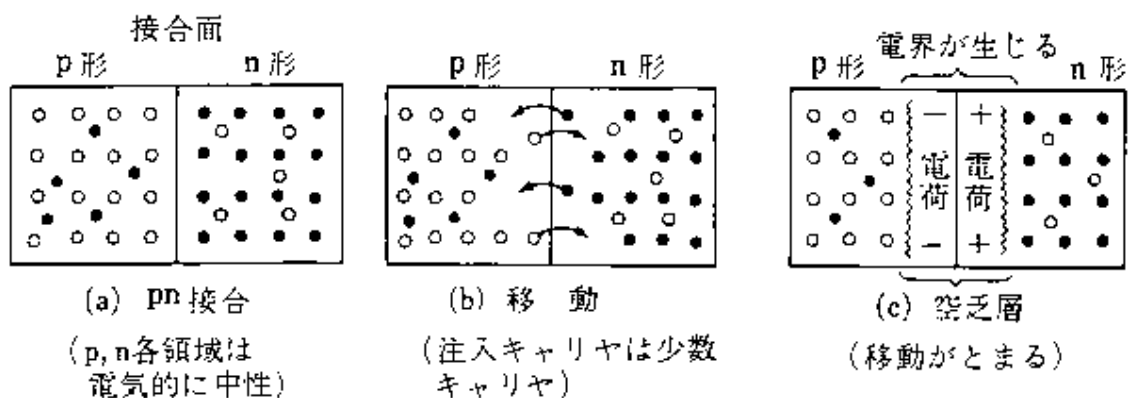
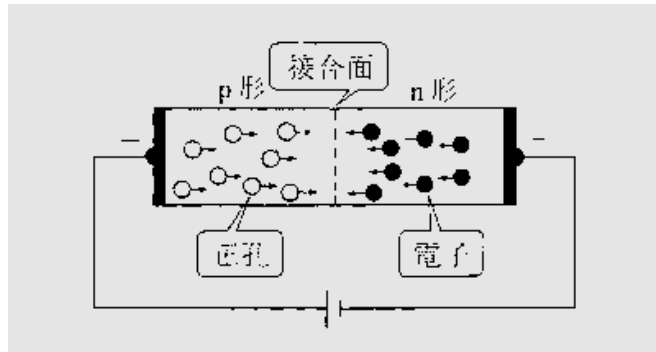


図2-2 外部電源なしのダイード

(2) 順方向電源の場合

図2-3に示すように、外部に電源を接続した場合を考える。P形半導体の方にプラス電源、N形半導体にマイナス電源を接続する。すると、N型になる自由電子は外部電源のマイナスと反発し、P形に接続されているプラスに引き付けられる。このとき、接合面にあった空乏層は薄くなり、N形にある自由電子はP形に入り込み外部電源のプラスまで進む。いっぽう、P形の方では電子が外部のプラスに引き付けられているから、正孔もN型の方へ移動する。



このように、P形にプラス、N形にマイナスの外部電源を接続すると、電気が流れるようになる。電流の流れやすくなる方向の接続を順方向という。またこの時の外部電源の電圧を順方向電圧と呼ぶ。

(3) 逆方向電源の場合

外部電源を(2)とは逆の方向に接続する。P形の方にマイナス、N形にプラスを接続すると、図2-4に示すようになる。N形にある自由電子は、外部の電源プラスに引き付けられる。また、P形でも同じように外部の電源マイナスに引き付けられる。したがって、P形とN形にあるキャリアは外部電源に引かれ両サイドに集まるので、接合面の空乏層の幅が広がって電気は流れなくなる。

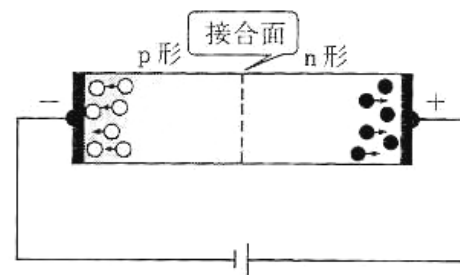


図2-4 逆方向電圧接続時のダイオード

このように、P形にマイナス、N形にプラスを接続しても、電気は流れない。こうした電気の流れない方向の接続を逆方向といい、この時の外部電源の電圧を逆方向電圧という。

このように、ダイオードは外部電源の接続する方向で電気が流れたり、流れなかったりする。

ダイオードを回路図記号で表すと図2-5のようになる。記号で分かるように、矢印の方向に電流が流れる。



混乱のないときは、
○を省略してもよい

図2-5 ダイオードの回路図記号

2-3 ダイオードの特性

電流を制限する素子を抵抗といい、その抵抗に電圧を加えた時に流れる電流についての関係をオームの法則という。

オームの法則
$$I = \frac{V}{R}$$

$$V = I \cdot R$$

$$R = \frac{V}{I}$$

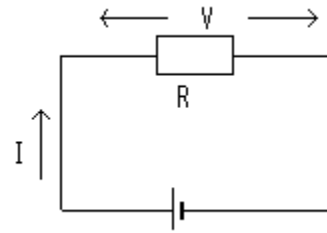


図2-6 抵抗回路

オームの法則から、電圧値Vを大きくすると、電流値もその電圧値に比例して大きくなる。つまり、抵抗の場合は電圧と電流の関係は比例関係になり、

図2-7のようなグラフになる。

しかし、ダイオードの場合、電流と電圧の関係が、抵抗の時のような比例関係にはならず、図2-8に示すような性質を示す。逆方向電圧には絶縁体の役目をするので、電圧を上げても電流は流れない。しかし、ツェナーダイオード場合はある電圧以上になると、電流が流れてしまう。この時の現象を降伏現象といい、その電圧を降伏電圧と呼ぶ。

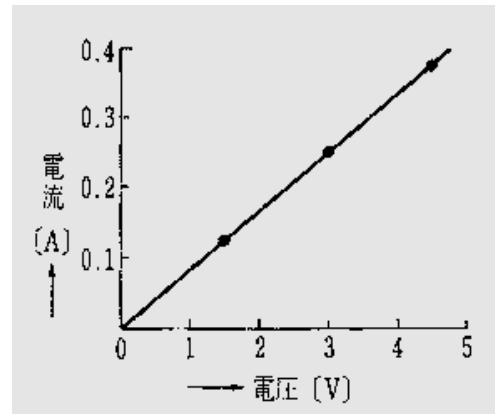


図2-7 抵抗の特性

順方向の場合は、電圧を上げれば電流も流れるが、直線的な比例関係にならない。このような性質を非線形と呼ぶ。

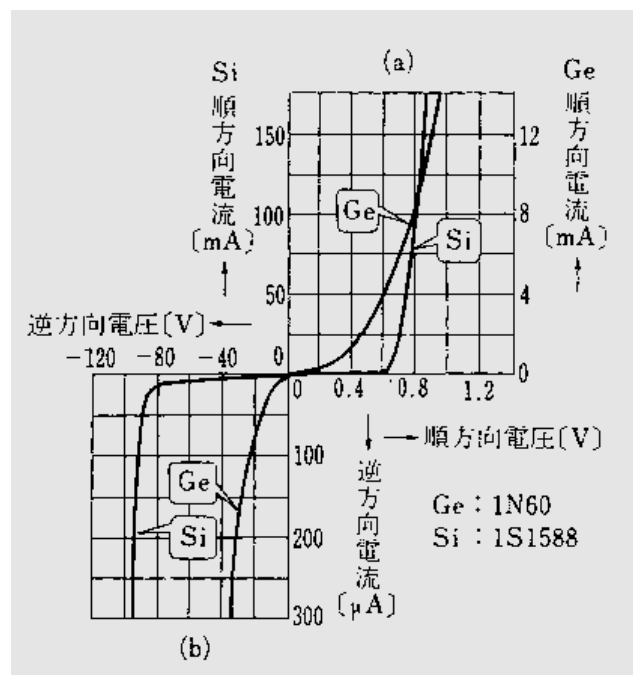


図2-8 ツェナーダイオードの電流・電圧特性

2-4 簡単なダイオード回路

ダイオードの性質をまとめると次のようになる。

- ① 電圧、電流の関係を示したグラフが直線にならない。
- ② 順方向でも、ある程度の電圧を加えなければ電流はほとんど流れない。

この性質を踏まえて、図2-9のように抵抗と直列に接続した回路について考えてみる。この回路で、全体に流れる電流と各部の電圧などについて調べる。ダイオードは上記①に示すように、電圧と電流の特性は非線形なので、一般に利用されるオームの法則をそのままで適用させることができない。

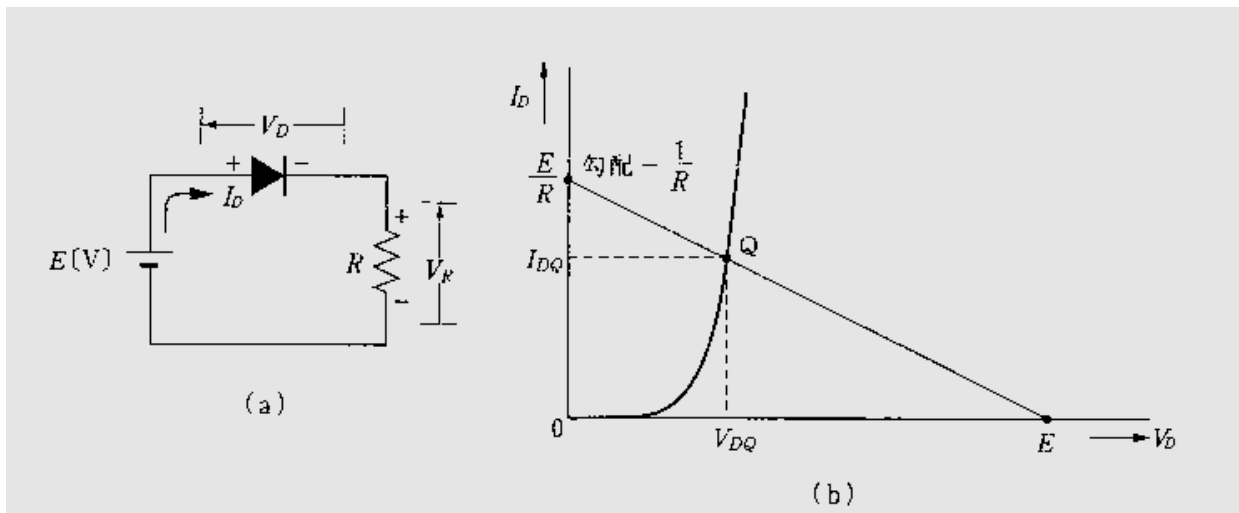


図2-9 ダイオードと抵抗の直列回路

ここで、電源電圧を E [V]、ダイオードと抵抗の端子電圧をそれぞれ V_D 、 V_R とし、回路に流れる電流を I_D [A]とすると、式2-1のような式が成り立つ。

$$\text{式 2-1} \quad E = V_D + V_R = V_D + R I_D$$

この式をグラフの中で表すと、図2-9 (b)に示す勾配 $-\frac{1}{R}$ の直線となり、 V_D と I_D はこの直線上の値をとらなければいけないことになる。一方、 V_D と I_D はダイオードの電圧・電流特性曲線上になければならない。したがって、両者が同時に成立する場所は、勾配 $-\frac{1}{R}$ の直線とダイオードの特性曲線との交点Qにおける、電流と電圧となる。この電流 I_{DQ} は回路全体に流れる電流値で、 V_{DQ} はダイオードにかかる電圧となる。この交点Qを動作点(operation)と呼ぶ。