

電子回路

何実V大学

平成21年2月6日

目次

1	講義について	2
1.1	目標	2
1.2	電子回路とは?	2
1.3	電子回路で使われる素子	2
2	半導体	3
2.1	バンド構造	3
2.2	ドーピング	4
2.3	電子に働く力	4
2.4	pn接合	6
3	ダイオード	7
3.1	整流作用	7
3.2	電圧電流特性	8
3.3	ダイオードの種類	8
4	バイポーラトランジスタ	9
4.1	構造	9
4.2	性質	9
4.3	電圧電流特性	10
4.4	バイポーラトランジスタの用途	10
4.5	トランジスタの種類	11

1 講義について

1.1 目標

この講義では電子回路で使われる基本的な素子について解説し、それがどのように利用されるのか、といった辺りまでの話をしようと思います。電子回路の範囲は非常に広く、扱うべき話題も多すぎるため、今回の講義では基礎的な部分をやろうかと思っています。

数式は極力避け、定性的な説明に終始していますが...式が入ると更に長くなるのでやめました。

1.2 電子回路とは？

電子回路（でんしかいろ、electronic circuit）とは、電子素子などを電気伝導体で接続し電流の通り道をつくり、目的の動作を行わせる電気回路である。大きく論理回路・デジタル回路・アナログ回路・アナログ-デジタル変換回路・デジタル-アナログ変換回路に分けられる。取り扱う周波数により、低周波回路・高周波回路という分け方をする場合もある。（以上、Wikipedia より）

このなかで、デジタル回路とアナログ回路は回路の方式をあらわしています。連続量を扱うのがアナログ回路、デジタル値（ほとんどの場合が1と0）を扱うのがデジタル回路です。また、アナログ-デジタル変換回路、およびデジタル-アナログ変換回路はそれぞれ連続量とデジタル値を変換する回路です。言葉のままですね。

論理回路は回路としての機能を表していて、ブール代数（AND、OR、EXORなどの論理演算など）を実現するための回路です。パソコンはこの回路で構成されています。

1.3 電子回路で使われる素子

電子回路で一般に使われる素子はダイオード、トランジスタなどです。この講義ではこの二つの素子の特性について調べてみます。

また、サイリスタという素子もありますが、今回は説明を省略します。

2 半導体

トランジスタやダイオードは半導体で作られています。まずは半導体の基本要素である pn 接合について調べてみましょう。

2.1 バンド構造

原子の周囲には電子がありますが、その電子のとりエネルギーはどんなものでもいいというわけではありません。電子がエネルギーを取れる範囲、取れない範囲、取れる範囲、取れない範囲...という風に交互に繰り返されていくわけです。これは図 1 を見ていただければわかると思います。帯が幾重にも重なっているように見えるのでバンド構造と呼ばれます。取ることのできないエネルギー範囲があるわけですが、この部分を禁制帯 (禁止帯) と呼びます。最外殻の電子が取れるエネルギー帯を荷電子帯と呼び、そのもうひとつ外のエネルギー帯を伝導帯と呼ばれます。また、禁制帯の幅をバンドギャップ (エネルギーギャップ) と呼びます。

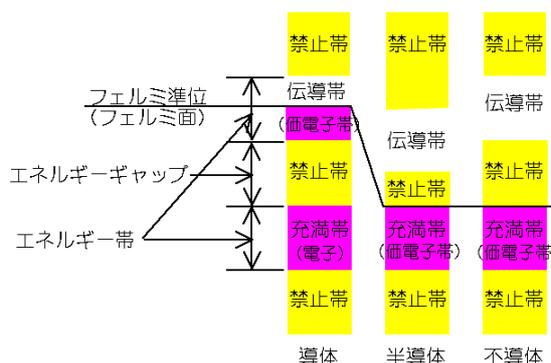


図 1: バンド構造

伝導帯にある電子は自由電子と呼ばれ、自由に動くことができる。自由電子があると電流は流れやすいです。ここで、動ける荷電粒子の事をキャリアと呼びます。

もう一度図 1 を見てみましょう。左から導体、半導体、不導体のバンド図です。導体は伝導帯に自由電子があるので電流が流れやすいわけです。では、半導体と不導体の違いは何でしょうか。荷電子帯 (ピンクの部分) の上の禁制帯に注目してみましょう。半導体は小さく、不導体は大きいです。熱的なエネルギーだけで小数ながらも半導体中の電子は伝導帯に励起することができるので電流がわずかながら流れます。一方で不導体では電子は伝導帯に励起されることはまずないので、電流は流れません。つまり、バンドギャップの大きさによって半導体と不導体が分けられるのです。

また、図中でのフェルミ準位とは、電子がそれ以上のエネルギーを持つ確率が50%となるエネルギーをさします。フェルミ準位以上のエネルギーを持つ電子は少ない、というイメージだけで結構です。

さて、半導体は4族元素(最外殻に4つの電子が存在する)であるというのは有名ですが、何故SiやGeなどが半導体と呼ばれ、同じ4族のCが半導体と呼ばれないかがこれでわかったのではないのでしょうか。炭素はバンドギャップが大きいいため不導体となるのです。

2.2 ドーピング

今まで述べたように、半導体はそのままでは自由電子の数が少ない。この状態の半導体は真性半導体といいます。

自由電子の数を増やすにはどうしたらいいでしょうか。一つには外から自由電子を増やしてやる方法があります。一般に原子は8個の電子で結合するので、5個の電子を持つ5族元素を入れれば、電子は一つあまり、これが自由電子となります。このように、不純物を混入することをドーピングと呼び、自由電子を供給するために混入された不純物をドナーと呼びます。また、自由電子が多い半導体をn型(negative)半導体といいます。

今度は逆の発想で、電子を一つ半導体から奪ってみましょう。するとその場所は電子が一つ足りないので、あたかも正の荷電粒子があるかのように見えます。これを正孔(ホール)と呼びます。正孔は自由に動き回ることができます。3族元素を加えると、半導体から原子を一つ奪い、正孔を生成し、これにより先ほど説明したキャリアが発生するので、電流が流れやすくなります。このように正孔を作る不純物をアクセプタと呼びます。また、自由正孔が多い半導体をp型(positive)半導体といいます。

ドーピングされた半導体のバンド図は図3のようになる。フェルミ準位が真性半導体の場合と比べて変化していることを確認してください。

2.3 電子に働く力

一般に半導体内で考えるべき電子(正孔)に働く力は二つあります。

一つは粒子の密度差によって起こる拡散という現象によるものです。人間も満員電車と空いている電車があれば満員電車から空いている電車に動きますよね。粒子も同様で、多いところから少ないところへ移動しようとしています。

もう一つは電界によるドリフトです。荷電粒子である以上、これは納得できると思います。

他にも磁界によるホール効果などもありますが、本講義の範囲では気にする必要はないでしょう。

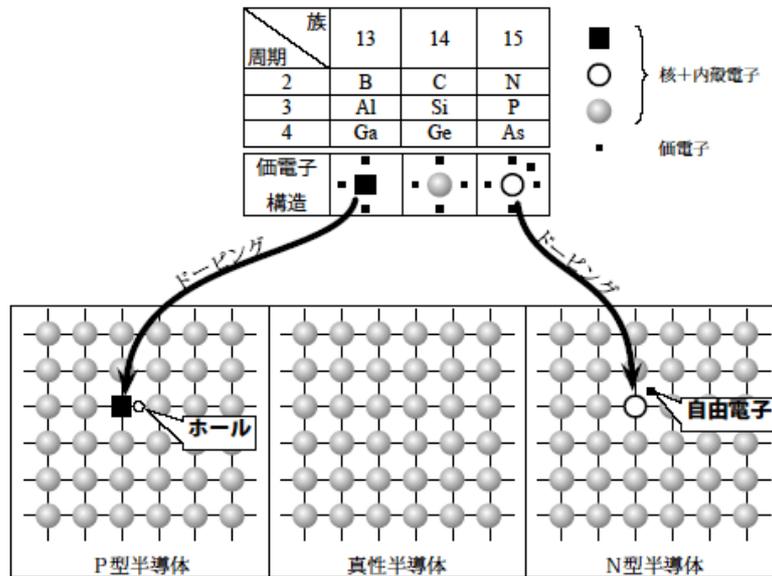


図 2: 半導体のドーピング

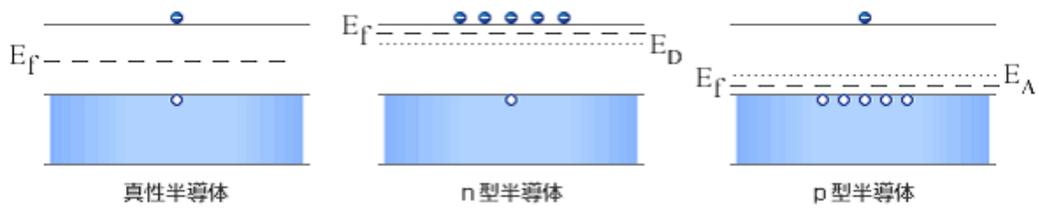


図 3: ドーピングされた半導体のバンド図

2.4 pn 接合

さて、p 型半導体と n 型半導体を接触させるとどうなるでしょう。p 型半導体では電子が多く、n 型では少ないので、上で述べたとおり拡散によって電子が p 型から n 型に流れ込んでいきます。逆に、正孔は n 型から p 型へ流れ込んでいきます。

電子、正孔が移動した後ではどうなるかを考えて見ましょう。n 型半導体の場合、電子が減少し、正孔が増えるので全体として正の電荷、p 型半導体はその逆で負の電荷が多くなります。すると、p 型半導体と n 型半導体の間には電界が発生することになります。先ほど述べたように、荷電粒子は電界によりドリフトしようとし、このときの力の向きは拡散による動きと逆方向になります。これらの二つの力がつりあうと電子、正孔は動かなくなります。

このようにして p 型半導体と n 型半導体を接触させることを pn 接合といい、pn 接合の接触面付近では電子や正孔がなくなる空間ができ、この部分を空乏層と呼びます。

図 4 を見ていただければイメージがつかめるかと思います。このような pn 接合のバンド図は非常によく使われます。

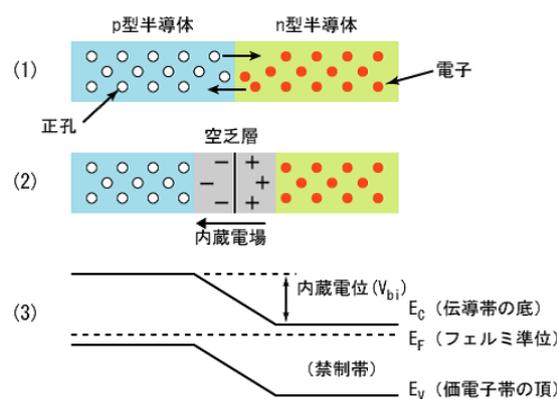


図 4: pn 接合

伝導帯 (上側の線) について考えてみると、右側から左側に移動しようとする、空乏層で傾斜がありますね。電子がこの傾斜を上りきるだけのエネルギーを持っていれば左側に移動できますが、そうでない場合は移動は起こりません。つまり、このとき空乏層は障壁となっているわけです。この障壁が小さければ左側への移動は多くなり、逆に障壁が大きければ移動は少なくなります。

3 ダイオード

先の項で紹介した pn 接合を利用したダイオードの特性について調べます。

3.1 整流作用

さて、ダイオードはある方向の電流を流し、逆方向の電流は流さない素子である、ということは知っている人も多いのではないのでしょうか。ダイオードは何故このような性質を持っているのでしょうか。

ダイオードは pn 接合を持つ半導体です。pn 接合は図 4 のようなバンド図構造をしています。では pn 接合に電圧をかけてみるとどうなるか考えてみましょう。

まず、p 型半導体に正の電圧をかけた場合の動作を考えます。電子は正の電圧がかかっている方向にひっぱられて動いていきます。今、n 型半導体にある電子は正の電圧のある方向、つまり p 型半導体に向かって進んでいきます。半導体内を電子が横断することができるので電流が流れるというわけです。

逆に、n 型半導体に正の電圧をかけてみます。n 型半導体にある電子はそのまま n 型半導体にとどまります。したがって電流は流れないのです。またかける電圧が大きくなると、空乏層の幅は広がります。

p 型半導体に正の電圧をかける場合を順方向、n 型半導体に正の電圧をかける場合を逆方向と呼びます。また、このように電流が流れる方向を制限する作用を整流作用といい、電子回路で重要な役目を果たします。

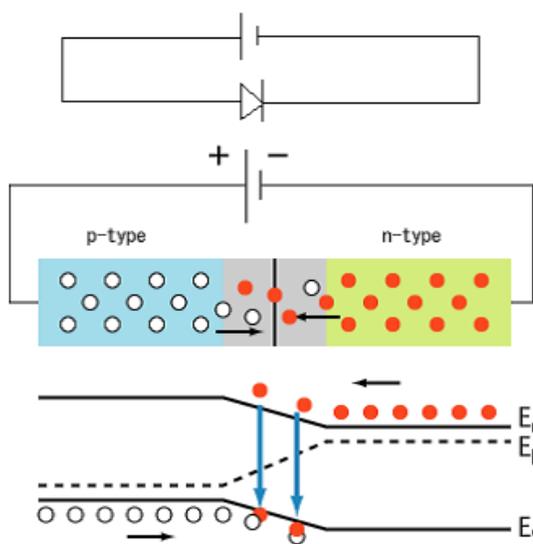


図 5: 順方向

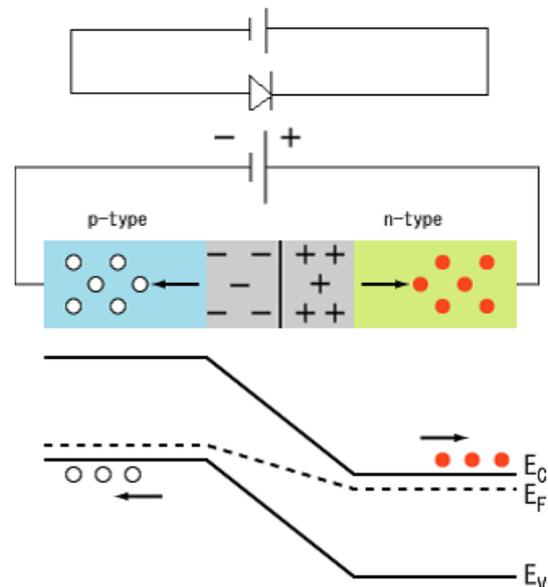


図 6: 逆方向

3.2 電圧電流特性

ダイオードにかける電圧とそこに流れる電流の大きさについて考えます。さて、順方向に電圧をほんのわずかでもかければ電流が流れ始めるのでしょうか。答えとしては、ある程度の大きさの電圧をかけなければ非常に小さい電流しか流れません。大きな電流を流すために必要な電圧の大きさ V_R を立ち上がり電圧と呼びます。

また、逆方向電圧をどれだけ大きくしても電流は流れないわけではなく、大きくしていくと電流が急激に流れ始めます。このときの電圧値 V_z を降伏電圧と呼びます。

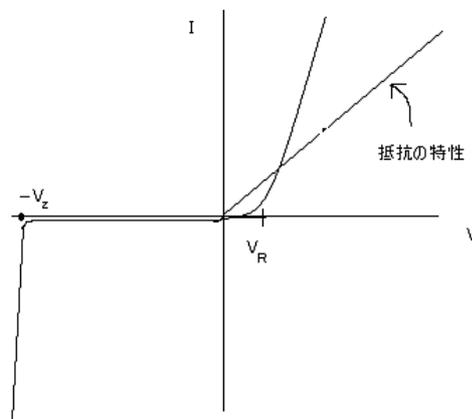


図 7: ダイオードの電流電圧特性

抵抗の特性と比較してみると、抵抗が直線的であるのに対しダイオードは複雑な特性曲線を描いています。抵抗のような素子を線形素子、ダイオードを非線形素子と呼びます。

3.3 ダイオードの種類

一般的な pn 接合によって作られるダイオードは整流用ダイオードと呼ばれる。

降伏電圧を利用して電流にかかわらず定電圧を得られるようにした素子をツェナーダイオードといいます。電圧の基準として電源回路にも組み込まれたりします。

逆方向電圧をかけると空乏層の幅が変化するというのは先に述べたとおりです。さて、空乏層の両端には電子、正孔があることを思い出してください。この構造はコンデンサに類似していますね。コンデンサの容量は極板間の距離に反比例します。したがって、ダイオードの逆方向電圧を変えることでコンデンサの容量を変えることができます。このような性質を利用したものが可変容量ダイオード（バリキャップ）です。

4 バイポーラトランジスタ

この項では pn 接合を利用したバイポーラトランジスタの性質について調べます。

4.1 構造

トランジスタは三層構造になっていて、中央の層と両側の層は半導体の極性が逆になっていて、p-n-p、あるいは n-p-n という構成になっています。このように二つの (bi) 極性 (polar) を持つトランジスタなのでバイポーラトランジスタと呼ばれます。また、三つの端子を持っているのですが、中央の層から出ているものをベース (B)、両端の一方をコレクタ (C)、もう一方をエミッタ (E) といいます。これらを回路記号で表すと図 8 のようになります。

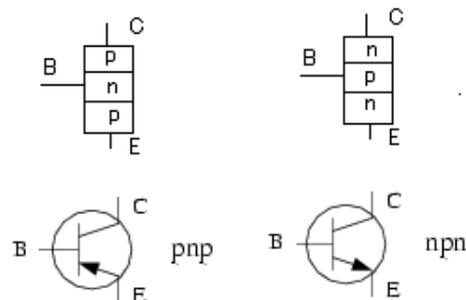


図 8: バイポーラトランジスタの構造と回路図

この図では B,C,E は全て同じ大きさで書かれていますが、実際には大きさが異なっていて、特にベースは薄く作られます。

4.2 性質

次にバイポーラトランジスタの性質を見てみましょう。nnp 型の性質を考えますが、pnp 型でも同様の議論が成り立ちます。

さて、図 8 のように接合した npn 型のトランジスタに電流を流すにはどうすればよいでしょうか。コレクタからエミッタへ電流を流すことを考えてみます。まず、コレクタに正の電圧をかけてみましょう。するとコレクタの電子は電極に引き寄せられ、エミッタの電子もコレクタに向かって進みます。しかし、エミッタとコレクタの間には p 型の層があり、ここで pn 接合が形成されています。このままではエミッタからコレクタに電子が進むことができず電流は流れません。

では、ベースに正の電圧を加えるとどうなるでしょうか。pn 接合の性質をもう一度思い出して見ましょう。ベースに正の電圧をかければ、エミッタの電子はベー

スに進むことができますね。また、ベースからコレクタへは障害となるものがないので、そのまま進むことができます。めでたくトランジスタに電流が流れました。

これをみてみると、ベースの電圧によって流れる電流を制御していると考えられます。

電流が流れる際のバンド図について、図9に示します。

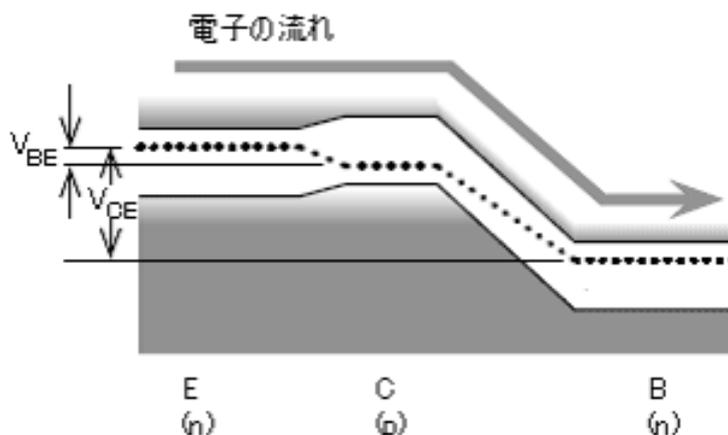


図9: バイポーラトランジスタのバンド図

4.3 電圧電流特性

エミッタ-コレクタ間の電圧 V_{CE} を変化させたときのコレクタ電流 I_C の変化は図10のようになります。また、ベースに流れる電流 I_B を変化させると、図に示したように、 I_B を大きくするほど I_C は大きくなります。また、直線的に I_C が増加している範囲を飽和領域、 I_C がほぼ一定となる範囲を能動領域といいます。

4.4 バイポーラトランジスタの用途

さて、 I_B を一定に保ったまま、 V_{BE} を飽和領域の範囲で動かすことを考えると、その変化は I_C に反映されますが、 V_{BE} と I_C の変化の大きさを考えると I_C の変化のほうが激しいことがわかります。これはつまり、変化が大きくなって現れたということです。このような効果を増幅と呼び、一般的にアナログ回路で使われます。

今度は V_{CE} を能動領域に入るように大きいまま保って、 I_B を変化させることを考えて見ます。すると、 I_B が流れているときは I_C が大きく、逆に I_B が0だと I_C も0となります。 I_B によって I_C の有無を決定しているわけですから、このときトランジスタはスイッチのような役目を果たしています。このような使い方をスイッチングと呼び、一般的にデジタル回路で使われます。

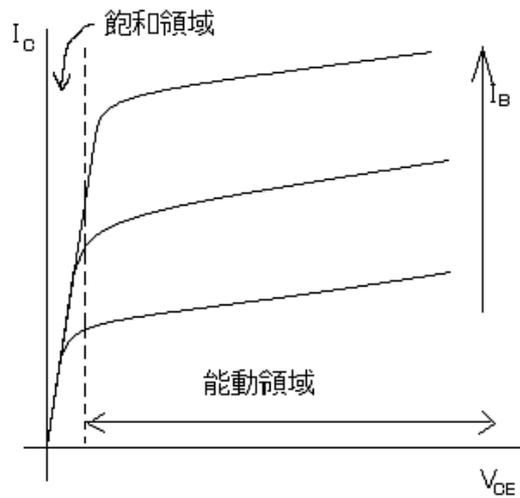


図 10: トランジスタの電流電圧特性

4.5 トランジスタの種類

トランジスタには大別してバイポーラトランジスタと電界効果トランジスタ (FET) があります。FET は今まで述べたような pn 接合を利用したトランジスタではなく、電界を利用して電流を制御するトランジスタです。また、キャリアを 1 種類しか用いないため、ユニポーラトランジスタとも呼ばれます。今回の講義ではこれについての解説は省略、あるいは簡略化するものとします。