

第3章 半導体の細胞 …MOSトランジスタ

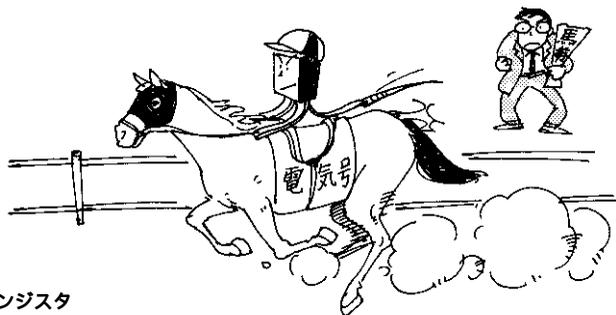
第1章でいろいろなICやLSIチップを見てきました。チップ上の回路はとても複雑そうに見えたかもしれませんが、ところがチップの中に入っている回路部品は、トランジスタと抵抗だけなのです。しかも複雑なLSIになればなるほど抵抗は使わず、トランジスタだけになってしまいます。

最先端のLSIはトランジスタだけで構成されたデジタル回路です。そこでこの章ではトランジスタ、特に出番が増えてきたMOS(Metal Oxide Semiconductor)トランジスタと呼ばれるデバイスについて調べてみることにします。

● なぜトランジスタが必要か

第2章に出てきたダイオードは半導体のpn接合そのもので、外へ出ているリード線は2本でした。そのほかの回路部品と呼ばれる抵抗、コンデンサ、コイルなども、大部分はリード線が2本です。こういう部品を一般に**受動素子**(passive components または passive device)と言います。

これに対してトランジスタには3本のリード線があるのですが、これは**能動素子**



電気を自由に制御するのがトランジスタ

(active componentsまたはactive device)と言われます。受動素子は「電圧がかけられたり、電流が流れたりするとその性質どおりに反応する」素子ですが、能動素子はその名のように「外部の電気エネルギーを使って自分で電圧、電流を作ったり、切ったり、変えたり、増幅できる」素子と言ってもよいでしょう。

エレクトロニクスは、人間が思ったとおりに電気を自由に操作することで発達してきたわけですが、電子回路の中で能動素子すなわちトランジスタがその電気を自由にコントロールする役目を果たしています。

簡単に「電気」と言いますが、非常に範囲が広く、電圧を考えても数 μV から数千Vと、 10^9 すなわち10億倍もの幅があります。この電圧を増幅、発振、減衰、整形、変圧、デジタル化、低電圧化などする必要があります。

また電流についても、数nAから数百A、周波数では直流から交流の数百GHzまで、さらにその波形も正弦波から矩形パルスまで取り扱い、どんな波形でも合成、分解が必要になり、回路の持っている特性、直線性、抵抗値なども自由に変えることが要求されます。

このような広範囲の仕事をこなすのはなかなかたいへんなことですが、トランジスタはこの膨大な役目をほとんど引き受けていて、その動作を全部説明するのはとても1冊の本では足りないほどです。そこで、ここではトランジスタの仕事として「スイッチング」に絞ることにします。スイッチングだとトランジスタの動作を理解するのが容易です。しかも、現在半導体LSIの中でトランジスタのもっとも大きな仕事がスイッチングなのです。スイッチングは身の周りのエレクトロニクス機器の動きに深く関与しています。

● スイッチングとは

スイッチングはとても簡単に理解できる動作です。パソコンにも、そのほかのどんな電気器具でもみな電源スイッチがあり、それを押すか上に上げるかだけで電源がONになります。回路的には電源の電線をつないだり離したりする動作です。

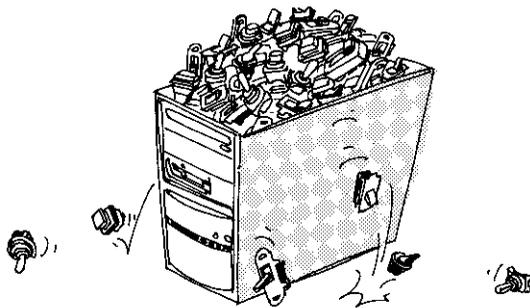
テレビの電源スイッチは手で入れることもできますが、このごろはリモコンを使うほうが多いようです。リモコンのスイッチは手の力を使いますが、テレビの中では、別のスイッチが入るのが感じられます。テレビの中に手を使わない、電気信号で動く**電子的スイッチ**があるからです。

同じように、パソコンの中にある回路の**スイッチ**を入れたいときはどうすればよいのでしょうか。手の代わりになんとかして電気信号の力でスイッチを入れてやる必要があります。

パソコンの動作は**デジタル回路**で組み立てられているのですが、デジタル回路とは実はたくさんのスイッチ動作の連続です。第4章でもっと詳しく説明しますが、デジタル回路では矩形の電気信号であるパルスを使ってスイッチング動作をさせます。電圧パルスがある回路の入力に入ったとき、その回路の出力電圧を低くします(これをスイッチONと呼ぶ)。また入力パルスがないときは出力電圧を高くします(これをスイッチOFFと呼ぶ)。こうして回路をONしたりOFFしたりすることで、数値の計算や論理動作が成り立っているのです。

しかもこのスイッチは何百、何千とつながって動作するのです。つまりデジタル回路では一つのスイッチを入れて、その結果出てくる出力のパルス電圧でまた次のスイッチを動かす必要があります。何千というスイッチを順々に動かしていくためには、スイッチを入れた後、次のスイッチを入れるために電力を強くしてやる必要があります。

一つのスイッチを入れるための電力はほんのわずかなものですが、何千というスイッチを通過するとだんだんとパルスの電圧が低くなり、雑音と区別できなくなってしまう。そのためスイッチをONするたびに電力を増幅してやる必要があります。電力を増幅してやることによってパルスの形はきれいになり、力も与えられます。別の言いかたをすれば、スイッチングするたびに外部から電力(エネルギー)を補給して、パルスに電力を与えるのです(電子回路的な言いかたでは、出



デジタル回路はスイッチでいっぱい



水を補給しないと最後までスイッチングができない

力のインピーダンスが低いため、次段のスイッチング回路を十分ドライブできるということである)。

この動作はよくバケツリレーにたとえられます。百人もの人がいっぱいになっているバケツの水を次々に手渡しでリレーしていくと、手渡すたびに水が少しずつこぼれて、最後にはなくなってしまうのと同じことです。途中で水を補給(増幅)して、いつもバケツを水でいっぱいにしておく必要があります。

ですから、デジタル回路に必要なスイッチングデバイスは、「スイッチングするたびに電力増幅ができる」ことが必要です。また、当然ながら自分自身では「電力をできるだけ食わない」ことが必要です。また膨大な数のスイッチを考えると、「小さくて場所をとらない」ことが必要です。さらに一つ一つのスイッチングに時間がかかると、全部のスイッチングが終わるのにかなり長い時間がかかるので、「スイッチングの動作速度が速い」という条件も必要です。

このようにデジタル回路に使うスイッチにはいくつかの条件が必要なのですが、トランジスタ、特にこれから説明する MOS トランジスタはこの要求にぴったりなのです。

● MOS トランジスタの原理

もう一度第2章に戻って、p型シリコンを考えてみましょう。

先に説明したように、p型シリコンの棒にはほんのわずかのGaが入れているため、図3-1に示すように自由なプラス電子が少し存在し、電流を流すことができます。このときシリコン内部の電圧分布はどうなっているのでしょうか。

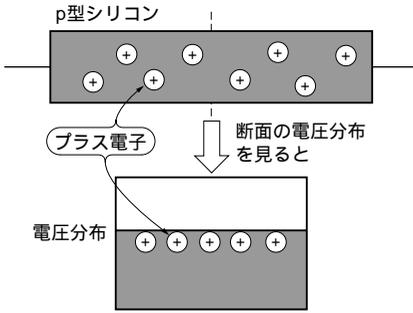


図3-1 p型シリコン棒の中ではプラス電子が電圧分布線の下で動いている

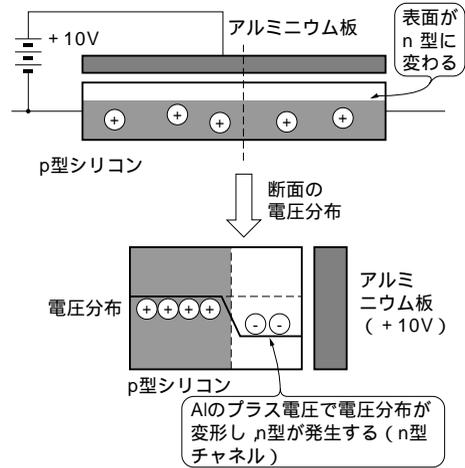


図3-2 アルミニウム電極をシリコン棒に近づけると表面がn型に変わる。下の図のように断面にpn接合が生じる

この場合pn接合はどこにも存在していないので、棒を真ん中で切って横から眺めてみると、図の下のようにシリコンの中のプラス電子は、電圧分布を示す線の下だけで動いているはずでしたね。ここで図3-2のように1枚のアルミニウムの板(ここでは電極と呼ぶ)にリードを付け、10Vの電池の+側につないで、シリコン棒のすぐ上にシリコンに触れないように置いてみます。-側はシリコンのリードの片側と共通にします。

すると、おもしろいことにアルミニウム電極とシリコンは触れてもいないのに、シリコンの抵抗が低くなります。この現象は電界効果(field effect)と呼ばれています。

アルミニウムの電圧の影響でプラスの電界(electric field, または電場とも言う)がシリコンのp型の棒の表面付近にマイナス電子を引きつけるので、その部分はn型に変わってしまい、図3-2の下の断面図のように縦方向(棒の長さ方向でなく、厚さの方向)にpn接合ができて、このn型領域(半導体の一部を指すときにこの用語を使う)の中を、リード線から入ってきたマイナス電子が表面に沿って通過できるようになり、シリコン棒の抵抗が低くなります。

つまり、シリコンの中にn型の通路(これをn channel, nチャンネルと呼ぶ)がで