

第19回 ディスクリート② —トランジスタ—

厚木エレクトロニクス 代表
サクセス インターナショナル 取締役
加藤俊夫

先月号のダイオードに続いて、今月はトランジスタについて勉強しましょう。ダイオードと同様に色々な種類があり、図1にまとめてみました。それぞれ特徴があり、多くの用途に利用されている、なくてはならないデバイスです。

バイポーラトランジスタ

半導体を紹介する場合、ほとんどの教科書はMOSの話から始まります。しかし、歴史的にはバイポーラが先に製品化された先輩です。IC時代になってMOSの方が集積度を上げ、デジタル信号を扱うのに適しているため、バイポーラが霞んでしまいました。でも、用途によってはバイポーラが有利で、今も生産されています。たまには、バイポーラに敬意を表してMOSより先に取り上げましょう。

バイポーラトランジスタの構造は図2のように、エミ

ッタ、コレクタ、ベースの三つの電極からなっています。NPNとPNPの2種類がありますが、ここではNPNを説明しましょう。まず、エミッタとベース間のPN接合には、順方向のバイアスをします。すると、エミッタから電子がベースへ流れてきます。ここで、ベースの幅を狭く作ってありますので、電子の大部分はコレクタの方へ流れて行きます。ベースとコレクタ間のPN接合には逆方向のバイアスが掛かっていますので、コレクタのプラス電位に引っ張られて、電子はコレクタ電極へ流れます。ベースの中では、電子は拡散で移動しますが、不純物濃度に勾配をつけて電界を発生させ、高速に流れるようにしている場合が多いです。

また、ベースからエミッタへ電子とは逆方向に正孔が流れますが、エミッタの不純物濃度をベースよりはるかに高くすることにより、電子の数が正孔の数より圧倒的に多くなるように設計されています。エミッタのN型不

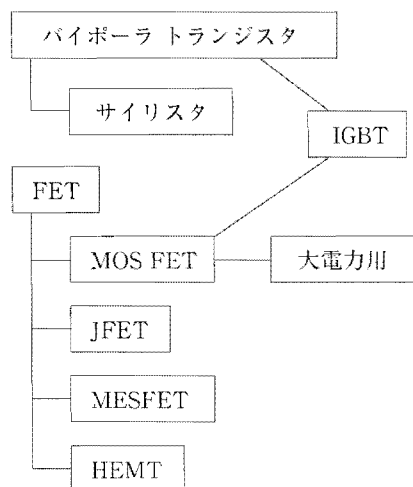
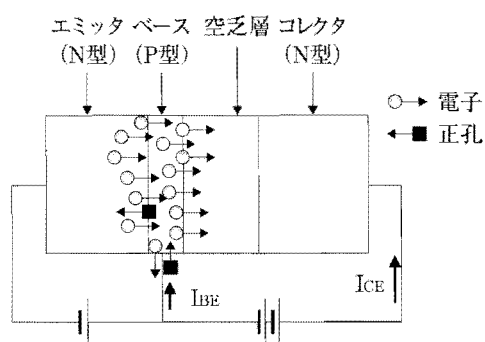
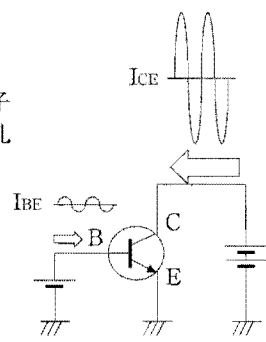


図1 トランジスタの種類



エミッタから注入された電子は、狭いベースを通過してコレクタに入る。コレクタは逆バイアスされて空乏層があり、その電界で電子は加速されてコレクタ電極へ流れる

図2 バイポーラトランジスタの構造と回路図



バイポーラトランジスタ
(エミッタ接地)

$$I_{CE}/I_{BE} = \beta \text{ (増幅率)}$$

純物濃度は通常 10^{21} Atoms/CC 程度で、ベースはそれより 3～4桁濃度を低くします。

以上の電流の流れをトランジスタの記号で表すと、図2右のようになり、エミッタとベース間の入力電流より、エミッタとコレクタ間の出力電流が100倍程度大きくなっていますので、増幅されたことになります。この増幅率を β (ベータ) と言ったり、 h_{FE} と言ったりします。バイポーラトランジスタは、高周波特性が優れているので、無線機器の高周波回路に用いられ、また、電流の駆動能力も高いので、オーディオ出力やTVの水平偏向出力用などに用いられています。もっとも、CRT-TV がなくなってしまったので、水平偏向回路も不要になってきました。

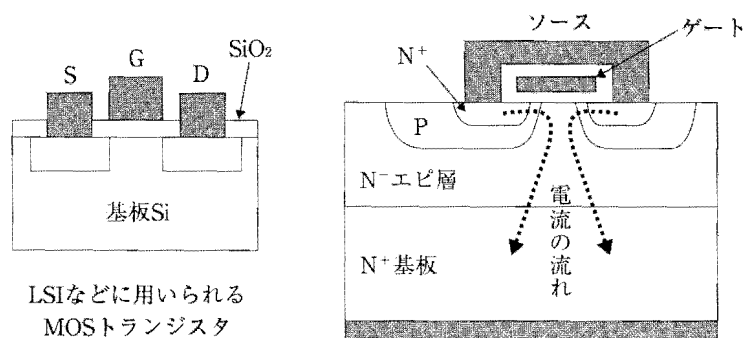


図3 平面状MOSと縦型プレーナMOS

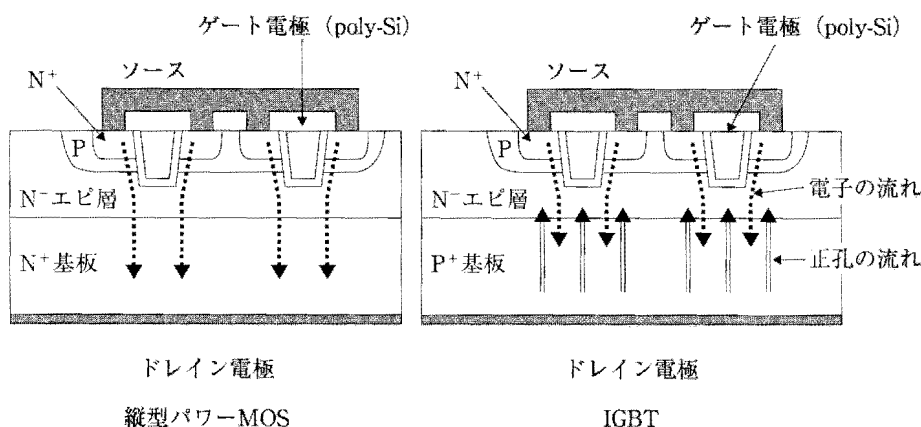


図4 縦型パワーMOSとIGBT

パワーMOSトランジスタ

LSIに用いられているMOSトランジスタについては、これまで十分に勉強してこられたわけですが、電力用MOSトランジスタはかなり違った構造になっていますので、これを取り上げましょう。

図3に、LSI用のMOSと電力用MOSを並べて示しました。一般に縦型DMOS (Diffused MOS) と呼ばれる構造で、代表例を図3右に示すように電流通路がチップの上下に流れるようになっています。これにより、チップ面積当りの電流密度を高く取ることができ、かつ、大電流を扱うことができるため、ON抵抗を下げる事が可能となります。ON抵抗というのは、この種のパワー

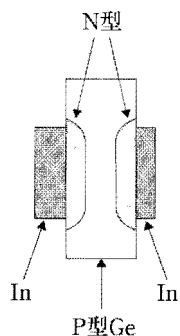
トランジスタの最も重要な特性で、ON抵抗が大きいとジュール熱として無駄な電力を発生させてしまいます。図3右のパワートランジスタでは、基板がN-とN+の部分がありますが、これはN型不純物の濃度がN-は低く、N+は高いという意味で、N-は、トランジスタの耐圧を高くし、N+はON抵抗を低くするためです。以前は、バイポーラトランジスタがパワー用に用いられましたが、パワーMOSの特性改善が進み置き換えが進んでいます。

IGBT

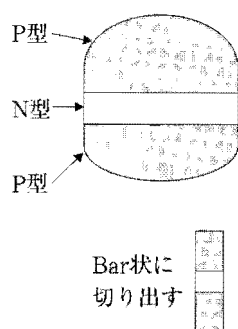
IGBTは、Insulated Gate Bipolar Transistorの略で、MOSとバイポーラの長所を兼ね備えたパワートランジスタと言えます。パワーMOSトランジスタと並べて、図4右に示します。この図4左の縦型パワーMOSトランジスタは、図3で説明したパワーMOSと違って、ソース・チャネル・ドレインが縦に並んでおり、ゲート電極がトレンチに埋め込まれたpoly-Siになっています。このようなパ

＜ちょっと脱線1＞バイポーラトランジスタの歴史

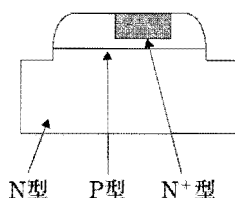
半導体が最初に量産されたのは、バイポーラトランジスタで、ソニーのポケットラジオなどに大々的に使われました。その時のトランジスタは下記の図（上）のようなGeの結晶片の両側からInを合金化して接合を作ったものでした。次いで、結晶成長中に、P-N-P型と順番にドーパント不純物を変えて接合を作るGrown型が現れました。次にSiのMesa型が開発され、ちょうどこの頃、Kodakでフォトリソが開発されて微細化が可能になりました。Mesa型は、ウェーハ全面に拡散層を形成後に台形にエッチングしますから、接合が表面に露出していますので、表面での漏れ電流の心配があります。これを絶縁物のSiO₂でカバーしたPlanar型が発明され、現在のICにつながる技術が確立されたと言えるでしょう。Planar型の製造技術は、現在のパワー・トランジスタなどにも使われる基本技術ですから、下記の図（下）に示しておきます。



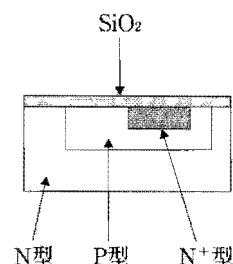
(1) 合金型



(2) Grown型



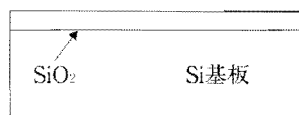
(3) Mesa型



(4) Planar型

▲バイポーラトランジスタの変遷

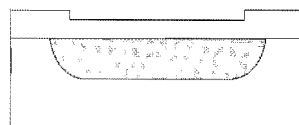
(1) Siを熱酸化



(2) SiO₂の窓明け



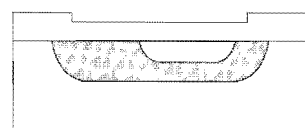
(3) Boron拡散し、同時に熱酸化



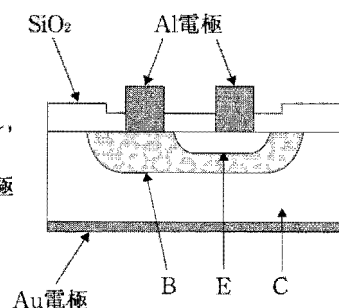
(4) SiO₂窓明け



(5) リン拡散し、同時に熱酸化



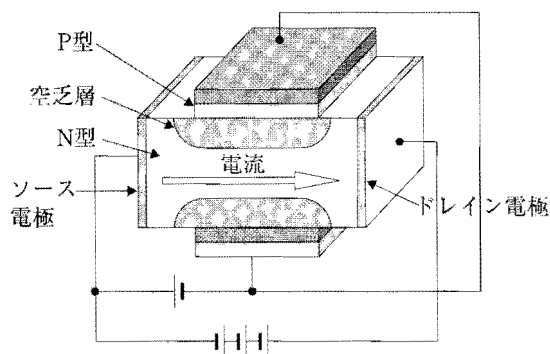
(6) SiO₂を窓明けし、Al電極をつけ、裏面にはAu電極をつける



▲プレーナトランジスタの製造プロセス

＜ちょっと脱線2＞ショックレーの話

トランジスタは、1947年、ベル研究所で発明され、最初の針立てトランジスタの実験に立ち会ったのはバーディーン、ブラッテンの2人でした。ショックレーは後で知ることになり、余程悔しかったらしく、以来寝食を忘れてトランジスタの改良案を考察し、遂に接合トランジスタを発明し今日の半導体時代の礎を築いたのです。その時のトランジスタは、JFETと言われています（右図）。ショックレーは、単なる学者ではなく、カリフォルニアにショックレー研究所を設立し、トランジスタの事業化に乗り出しました。事業は失敗しましたが、そこで多くの人材を養成し、その人たちが独立して半導体ベンチャー会社を作り、今日のシリコンバレーの基礎を築いたのです。歴史に「もし」はありませんが、「もし、ショックレーが研究所を作っていないければ」半導体業界の発展は随分違った姿になったでしょう。



▲ショックレーが発明した接合型FET

表1 半導体材料の移動度

材料	電子移動度 (cm^2/Vsec)	正孔移動度 (cm^2/Vsec)
Ge	3600	1800
Si	1500	500
GaAs	9700	420
InP	3400	50

ワー MOSが最近増えてきています。それと比べると、IGBTはN+基板をP+基板に置き換えた構造です。基板のP+領域からN-領域へ正孔が注入され、N-領域の電子と正孔の濃度が高くなることで電導度も高くなり、より大電流が流せてON抵抗が減少します。パワーMOSFETより、スイッチング速度は遅いのですが、同一チップ面積で数倍の電流が取れるため、パワー用バイポーラトランジスタからIGBTへの置き換えが進んでいます。

JFET (Junction Field Effect Transistor)

Field Effectは、電界効果と訳されています。お馴染みのMOSトランジスタも、ゲート電極からの電界でソース・ドレイン間の電流を制御しますから電界効果トランジスタで、正式に言えばMOS FETと呼ばれます。それ

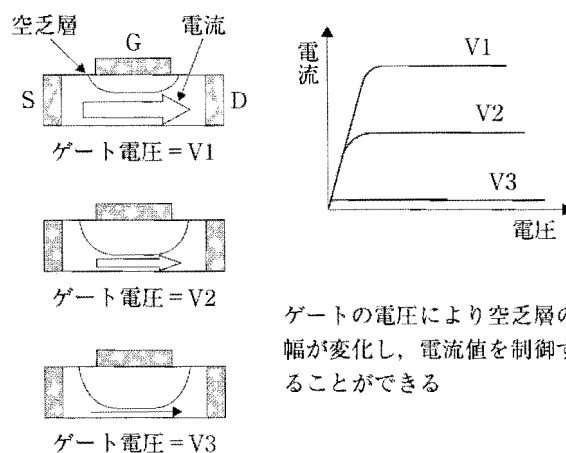


図5 JFETの動作と特性

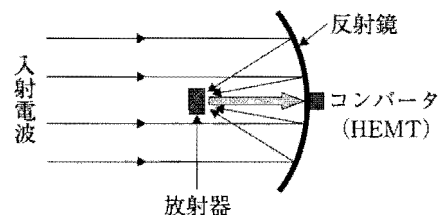
に対して、図5のようにPN接合を持っており、電圧を与えることにより空乏層の幅を変化させて電流を制御するのがJunction FETです。FETは、ソースからドレインへ電子または正孔のどちらか一方が流れるので、一極性(Uni-polar)と呼ばれ、バイポーラの場合は、電子と正孔の両方が流れますので二極性(Bi-polar)と呼ばれます。

MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor)

化合物半導体については、先月号で少し触れました。Siに比べて優れている点の一つは、電子や正孔の移動度

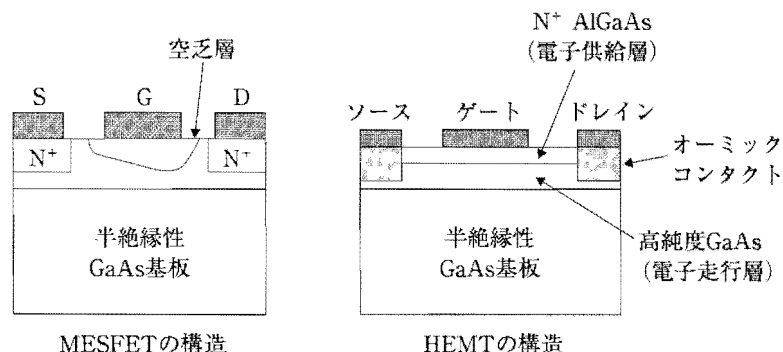
＜ちょっと脱線3＞衛星放送

衛星放送をご覧になっている方が多いと思いますが、どんな仕組みで電波が送られてくるのでしょうか。赤道上空に静止衛星があることはご存知でしょう。地上3万6000kmの高さにあり24時間で地球を1周しますから、地上から見ると静止しているように見えます。この衛星を目がけて放送局から電波を送り、衛星から日本全国へ届くように電波が返ってきます。その電波の周波数は11.7～12GHzと言うSHF（Super High Frequency）帯で、ほぼ光に近い周波数です。そこで受信する方も光の積りでパラボラアンテナを用います。右図のように直進してきた電波はアンテナで反射して焦点の位置に像を結びます。この信号を放射器でコンバータへ送ります。ここに、SHF帯に適した化合物半導体のMESFETやHEMTがあって、12GHzの信号を後の回路で扱いやすいように1GHz程度まで変換します。遠い衛星から来る電波ですから、極めて微弱でこれを増幅するには雑音が少ないことが重要で、その点、化合物半導体は優れています。私は数年前に中央アジアの国を旅行したことがあります。直径3mぐらいの巨大なアンテナがマンションの手すりに取り付けられており、下を通るのが怖かった経験があります。恐らくコンバータトランジスタの雑音特性が良くないため巨大なアンテナで電波を集める必要があるのでしょう。



衛星から来た電波は、反射鏡で反射し、焦点の位置の放射器からコンバータに信号が送られる

▲パラボラアンテナの構造



MESFETの構造

HEMTの構造

図6 MOSFETとHEMTの構造

の大きい材料があることです。移動度とは、電子や正孔が結晶格子に邪魔されずにいかに速く動けるかを数値化したもので、大きいほど高周波特性の良い素子が作れます。表1は移動度を比較したもので、GaAsなどの電子移動度はSiの数倍あります。この移動度の数値は、文献によってかなりの差がありますので、一応の目安と考えて下さい。GaAsを用いたFETを図6左に示します。GaAsにFeやCrなどの金属をドーピングすると、電気抵抗が極めて高い絶縁体となりますので漏れ電流が少なく、これを基板として用い、その上にN型GaAsをEpitaxialに

成長させます。ゲートには、先月号で勉強した金属-半導体のショットキ接合が用いられ、ゲート電圧により空乏層の幅を変えて電流を制御するのはSiのFETと同じ原理です。

HEMT (High Electron Mobility Transistor)

日本人の発明によるHEMTを忘れてはいけません。富士通の三村氏によって発明されたHEMTは、超高速の素子として利用されており、今後有望なデバイスです。動作原理は、図6右を参照して下さい。高純度GaAs（電子走行層）を電子が流れるのですが、この層は電子の走行を妨げる不純物がほとんどないため、ソースからドレインへ電子が高速に流れるようにしたものです。高速動作でノイズが少ないため、赤道上空の衛星から送られてくる衛星放送（11～13GHz）の受信に用いられていますが、自動車の車間距離を測るレーダは76GHzと言う周波数で、これを受信するのはHEMTの出番です。最近では数百GHzの超高周波（ミリ波）用も研究されています。

ワイドギャップ半導体

入門講座からやや逸脱するかも知れませんが、最近注目のワイドギャップ半導体にも少し触れておきましょう。本講座では、バンド理論を一切使っていませんので、ワイドギャップと言っても意味が分からない方も多いと思います。

簡単に言いますと、原子核の周りを回っている電子が自由に結晶中を動けるのが金属で、原子核からの束縛を逃れるのにエネルギーのギャップなしに可能です。ところが半導体では、ある程度のエネルギーが与えられないと、電子が自由にならないのです。Geなら80℃程度の熱エネルギーで自由電子がたくさん発生し、Siでは200℃です。ところが、SiCやGaNのような半導体では、300℃以上になってはじめて自由電子が発生します。つまり、ギャップが大きいので、ワイドギャップと呼ばれているのです。

以上の説明でおわかりのように、これらの半導体材料で作った素子は、300℃以上の高温でも動作する特徴があります。さらに、強い電界が掛かっても電子が原子から自由に動きませんから、強電界でもブレイクダウンしないという性質があります。そこで、これらの材料でト

ランジスタを作ると、高耐圧で高温動作のトランジスタを作ることができます。具体的な材料としては、SiC、GaNが立候補しており、ダイオードやトランジスタができたというレポートが相次いでいます。これらの材料でパワートランジスタを作ると、ON抵抗はSiより1桁小さいため省エネ効果が大きく、電気自動車のモータなどには最適で、数年後には量産される可能性があります。

以上、各種のトランジスタを見てきました。それぞれトランジスタは得意技を持っていますから、他の素子では代替できない用途に使われています。ウェーハ径は、Siの場合は6インチが主流で、最近8インチの生産ラインを建設した企業が少し現れました。化合物半導体は、3～6インチで、たまに2インチで生産している場合もあります。それでも、チップサイズが、0.3～0.4mm角と小さい場合は、3インチから3万チップも取れます。ダイオードを含めたディスクリート素子の産業としても規模は、全半導体の1/10程度ですから、あまり大きくはありませんが、ロードマップが明示されているLSIとは異なり、まだまだ個人の創意工夫で進歩できる分野のように思います。