

第1回 半導体の物性

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

皆さん、こんにちは。今年、半導体業界へ入られた新人の方々、今一度半導体を復習したいの方々、これから始まる講座を何回かお付き合い頂くと目からウロコ。半導体が面白くなること請け合いです。

色々な種類がある半導体

皆さんは、デジタルカメラやカメラ付き携帯電話を持っているでしょう。そのカメラには、CCDやCMOSと呼ばれる半導体のイメージセンサが使われていて風景を電気信号に変えています。半導体は光を感じます。またCDやDVDにはレーザーが使われていますが、これらも半導体の仲間です。すなわち、半導体は光も出すわけです。最近ではオーディオやビデオも、テープやディスクに替わってフラッシュメモリが用いられ、極めてコンパクトな機器が販売されています。これも半導体技術の進歩の賜物です。

このように半導体には色々な種類がありますが、最も多く使われているのは、CMOS LSIと呼ばれる回路素子

です。CMOS LSIはComplimentary Metal Oxide Semiconductor Large Scale Integrationの略で、シーモスエルエスアイと呼ばれています。

図1は半導体の家族を表したもので、CMOS LSIは我こそ王様であると威張っています。そこで、飛車、角行、金、銀には目もくれず、王様であるCMOS LSIに王手を掛けることにします。

ちょっと面倒な物性講座

CMOS LSIに入る前に、どうしても物性に触れておき

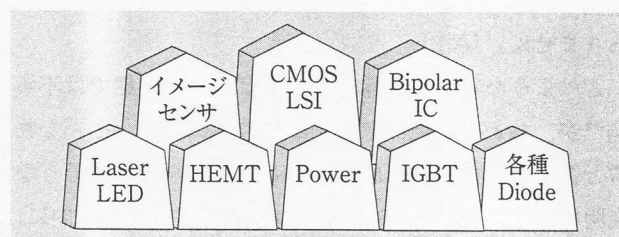


図1 半導体の仲間達

表1 周期律表

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
H 水素							He ヘリウム
Li リチウム	Be ベリリウム	B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素	F フッ素	Ne ネオン
Na ナトリウム	Mg マグネシウム	Al アルミニウム	Si シリコン	P リン	S 硫黄	Cl 塩素	Ar アルゴン
K カリウム	Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As ヒ素	Se セレン	Br 臭素	Kr クリプトン
Rb ルビジウム	Cd カドミウム	In インジウム	Sn すず	Sb アンチモン	Te テルル	I ヨウ素	Xe キセノン

たいと思います。皆さんは周期律表を中学校で習ったと思います。「卒業したら忘れてしまった」「何のために中学へ行ったの？」冗談はさて置き、表1を見て下さい。この表のⅢ、Ⅳ、Ⅴ族に注目して

頂きたい。現在の半導体の大部分はシリコン（Si）を材料にしています。周期律表のⅣ族のところに有ります。Ⅳ族の原子が結晶を作ると半導体になり、炭素（結晶になるとダイヤモンド）やゲルマニウム（Ge）の結晶も半導体になりますが、ここでは横道に入り過ぎるのでこれぐらいにしておきましょう。

半導体とは何？

「半分だけ導体っていう意味かしら」。合っているようで、少し違います。金属は電気を良く通すから導体、ガラスやプラスチックは絶縁物なので不導体、その中間の物質が半導体である。と説明される場合が多いですが、厳密には間違いです。純水に塩を少しずつ加えると、電気が流れるようになりますが、この食塩水は半導体ではありません。（図2）

どのような物が半導体かといえば、ある状態では不導体だが、ちょっと条件を変えると導体になる。そんな物質と言っておきます（厳密な学者先生から叱られそうな説明ですが）。その条件というのは、Ⅳ族のSi結晶中に、Ⅲ族やⅤ族の原子を添加すると大いに電氣的性質が変わります。不純物を添加することをドーピングと呼んでいます。辞書によると、Dopeとは刺激剤や麻薬を飲むことと出ています。オリンピックではほんの少しドーピングすると、大いに活性化して凄い記録が出るから禁止されていますが、半導体でも同じで、Ⅲ族やⅤ族の原子をほんの微量ドーピングしただけで電氣的性質ガラリと変わってしまいます。そこが半導体の面白いところです。

ところでSiの原子は、中心に原子核があり、その周りを14個の電子が回っていますが、量子論という難しい学問によると、どこでも勝手なところを回れるわけではなく、回れる軌道が決まっており、図3のように一番内側の第1軌道が2個、次の第2軌道に8個、その外の第3軌道に4個の電子があります。この一番外の4個の電子が重要

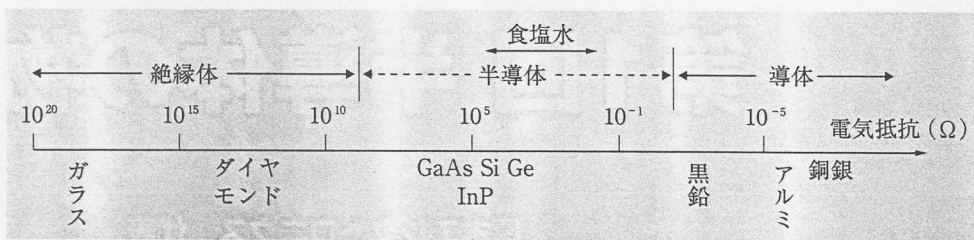


図2 半導体の区分

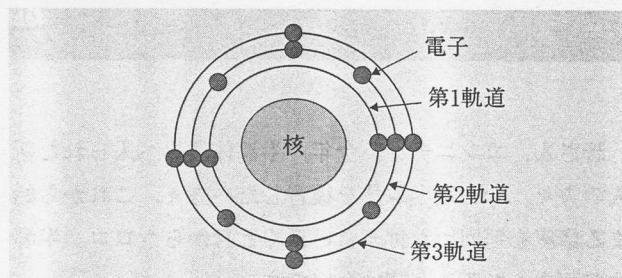


図3 Siの原子構造

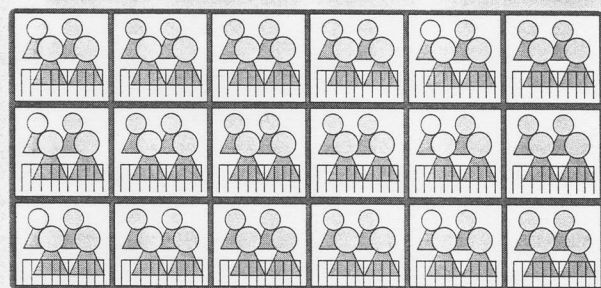


図4 Si マンションは4人家族

で、周りの4個の原子と結合して結晶を作っています。これを共有結合と呼んでいます。

Si原子が結晶状態に並んだ様子をマンションに例えてみると、図4のように4人家族が暮らせる間取りになっています。そこへ5人家族が入居してきたらどうなるか。一人が余ってしまい、居る場所がなくなり末っ子の電子が追い出されてしまう。追い出された電子は隣の家に行くが、そこも4人で暮らしており、電子を入れる余地がない。そうやって、電子はマンション中を歩き回る羽目となります。

Si結晶中に、Ⅴ族のリン（P）が入った場合はそのような状態で、第3軌道の5個の電子を持っているPは、Siと共有結合すると電子が1個余るのでこれを放出し、電子が結晶中を歩き回ることになります。電子はマイナスの電荷を持っているので、Negativeの意味でN型半導体と

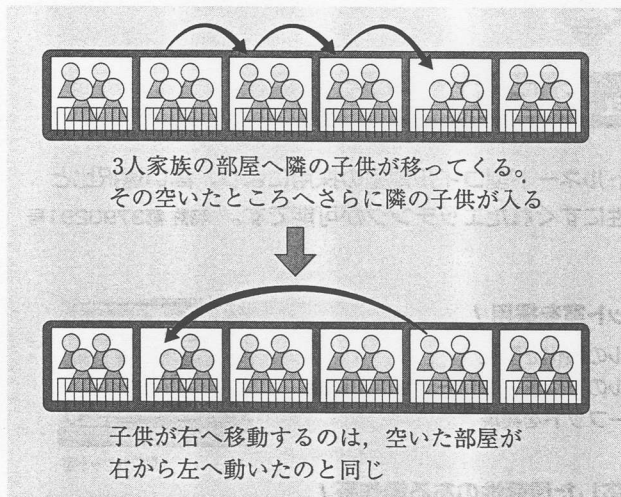


図5 正孔（Hole）の考え方

呼んでいます。では、3人家族が越してきた場合はどうなるか。3人家族だと1人分空いているので、そこへ隣の子供が移ってきます。すると隣は1部屋空くので、さらに隣の子供が移ってきます。この様子は図5のようになります。結局、子供が右へ次々に動くということは、空いた部屋が反対の左へ動くのと同じと考えます。空き部屋が次々移動するのは、プラスの電荷を持った粒子が動くと考え、これをプラスの孔と言う意味で、正孔と名付けています。英語ではHoleと呼んでおり、正孔が発生する半導体をP（Positive）型と呼んでいます。

空き部屋のある原子といえ、第3軌道に3個の電子があるⅢ族の原子です。アルミニウム（Al）、ガリウム（Ga）、インジウム（In）もⅢ族なので該当しますが、一般にはホウ素（B）が用いられることが多いです。以上をまとめると、PやAsをドーピングすると、自由電子が発生してN型になり、Bをドーピングすると正孔が発生してP型になります。

MOSトランジスタの構造と動作

長くなりますが、MOSについて少し見ておきたいと思っています。MOSはMetal-Oxide-Semiconductorで、日本語で言えば、金属-酸化物-半導体ですが、金酸半ではおかしいし、やはりMOSと呼ぶしかありません。

MOSトランジスタの動作は、水の流れて説明されると分かりやすいと思います。図6左図の水源からの水の流れは、水門を開くと流れるし、閉じると流れない。それと同じことが半導体で行われています。すなわち、

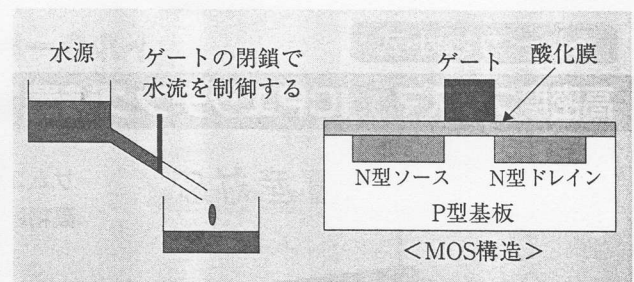


図6 水の流れに似ているMOSトランジスタ

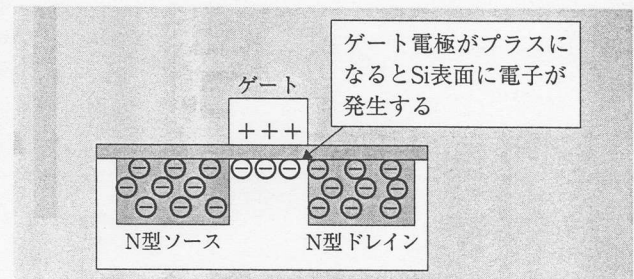


図7 ソースとドレインが導通した状態

MOSトランジスタのゲート電極へ電圧を掛けると、ソースからドレインへ電流が流れ、ゲート電圧を掛けないと流れない。つまり、ゲートの電圧によって、ソースからドレインへの電流をONかOFFにするわけです。電極の名前も、ソース（Source：水源）、ドレイン（Drain：引き込み口）、ゲート（Gate：水門）という水の流れから取った名前がついています。

NMOSトランジスタのゲート電極にプラスの電圧を与えると、Si側にマイナスの電荷、すなわち電子が現れます。すると、両側のソースとドレインは元々電子が沢山あるN型なので、ソースとドレイン間に少し電圧を掛けてやると、この間に電流が流れます。すなわちON状態です。ゲート電極にプラスの電圧が掛かっていなければ、Si表面に電子が現れませんから、ソースとドレインにいくら電子があっても、この間に電流が流れずOFF状態となります。このように、ゲートにプラスの電圧を与えるかどうかで、ソースとドレイン間の導通が決まります。これがMOSトランジスタの原理で、電子が流れるタイプをNMOSと呼んでいます。ソースとドレインがP型で、正孔が流れるタイプはPMOSと呼ばれます。実際に生産されているMOSはもっと複雑ですが、原理は以上の通りで、極めて簡単に拍子抜けしたでしょう。

今回は、NMOSとPMOSが同じチップに載っているCMOSを取り上げます。