

第14回 その他のメモリ

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

これまで、メモリの王様DRAMと、女王様のフラッシュメモリを見てきました。今月は、DRAMの補佐役のようなSRAM (Static Random Access Memory) と、それ以外に次世代の王様を狙う数々のメモリを紹介しましょう。それらの一覧を表1にまとめてみました。微細化のしやすさや、書き込み速度などは筆者の独断ですから、異論があるかもしれません。

SRAM

ほとんどの半導体メモリは、物理的または化学的变化を利用してメモリとしていますが、SRAMだけは回路的な状態の変化を利用しています。すなわち、図1のようなフリップ・フロップといわれる回路です。この動作を説明しますと、まずQ1がONになっていると、A点はアースにつながって0Vとなり、ここにつながっているQ2のゲートも0Vとなって、Q2がOFFになります。次に、Q3に信号が入ってONになってA点の電位が上がるとQ2がONとなり、B点がアースにつながって0Vとなり、Q1のゲートが0Vになって、Q1がOFFになります。こ

表1 各種の半導体メモリの一覧

	不揮発性	微細化	読み書き速度	生産状況
DRAM	×	○	○	量産中
SRAM	×	×	◎	量産中
フラッシュ	○	○	△	量産中
FeRAM	○	○	○	少量生産中
MRAM	○	○	◎	生産開始へ
PRAM	○	○	○	生産開始へ
ReRAM	○	○	○	開発中

のように、Q3またはQ4に信号が入る度にQ1とQ2のMOSがON/OFFに切り替わり、シーソーのようにギタンバタンします。これをフリップ・フロップと呼んでいます。図1の回路だと、Q1がONの時、抵抗Rを通して電源からアースへ電流が流れます。このため、消費電力が発生します。これを避けるため、抵抗の代わりにMOSを用いてQ1がONなら負荷MOSはOFFになるようにすれば電流は流れません（過渡的な電流が流れますが、直流的には流れません）。従って、消費電力は極めて少なくて済みます。

<4トランジスタSRAM>

抵抗負荷のフリップ・フロップ回路で1ビットを構成します。例えば、Q1がONならA点の電位は0Vとなり、Q2のゲートも0V電位となってQ2はOFFとなります。Q3に信号が入ってA点の電位が上がると、Q2がONになり、B点の電位が0Vとなって、Q1がOFFになります。

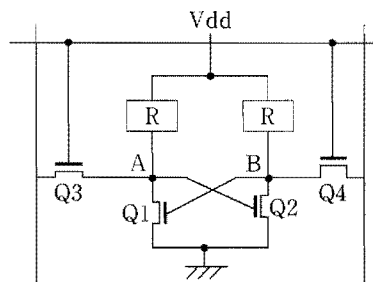


図1 SRAMの回路

SRAMの1ビットは、図1のようにMOS4個と抵抗2個からなっています。抵抗はpoly-SiをMOSの上に配置されており、4個のMOSの面積の中に収まります。MOS負荷で消費電力を下げるタイプはMOSが2個追加されて6トランジスタ型と呼ばれ、1ビット当たりの面積が大きくなります。従って、1T+1CのDRAMに比べると、ビット当たりの面積は4倍程度となり、集積度が劣ります。

SRAMはDRAMのようなRefreshは不要なので使いやすいが、電源を切ると記憶が消えてしまいますので、揮発性メモリです。SRAMは高速なので、CPUとDRAMの間のキャッシュメモリとして使われます。

SRAMは、DRAMやフラッシュのように、それ自身が単品メモリで販売されていますが、今ではLSIの中に組み込まれて使われることの方が多いようです。SoC (System on Chip) といわれるLSIでは、CPUや論理回路とメモリが必要ですが、SRAMを外付けするのではなく、チップに組み込んでいます。SRAMはCMOS LSIとまったく同じ設計で、追加のプロセスなしで生産できますから、組み込みやすいわけです。この点、DRAMでは、スタック・キャパシタの場合は、チップ表面に背の高いキャパシタが載りますから、第1層の絶縁膜を分厚くする必要がありますが、後の電極取り出しのコンタクト・ホールのエッチングやメタル埋めが厄介です。トレンチ・キャパシタの場合は、表面は平坦ですが、トレンチを作成するためのプロセスが厄介でコストアップになってしまいます。

各種不揮発性メモリ

1. FeRAM

FeRAM (Ferro Electric Random Access Memory) は、ペロブスカイト型と呼ばれる結晶の性質を利用したメモリです。図2のように、結晶の格子の角にPb原子を配置し、面心の位置にOがきて、真ん中にTiなどのメタル原子がくるような構造です。Ti原子は最外殻の電子を失ってプラスにイオン化していますので、これに電圧が与えられると、マイナス電位の方に移動します。一度、移動すると電圧をゼロにしてもそのままの位置に留まっており、メモリとして利用されます。この様子を、図3にヒステリシス・カーブで説明します。

まず最初は分極していない図3左のO点にあったとしましょう。結晶の上方にプラス、下方にマイナスの電圧を与えると、Ti原子は下方でシフトします。図3左のA点になったわけです。次に電圧をゼロにすると、元のO点へは戻らず、B点へ移動します。さらに電圧を逆転す

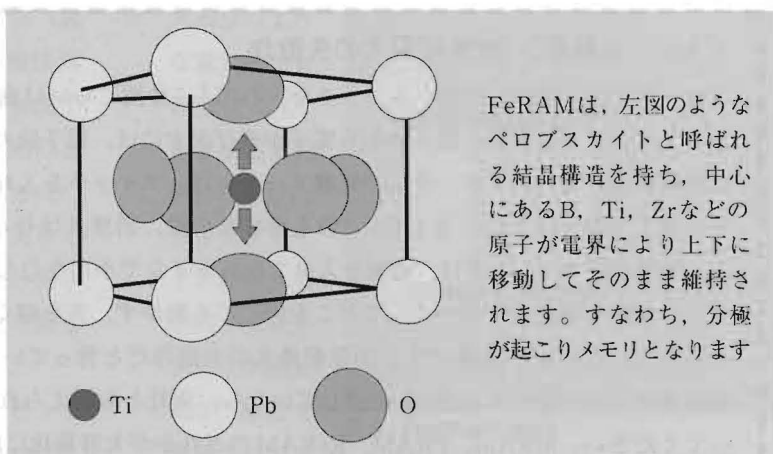


図2 FeRAMの構造、ペロブスカイト型結晶の性質

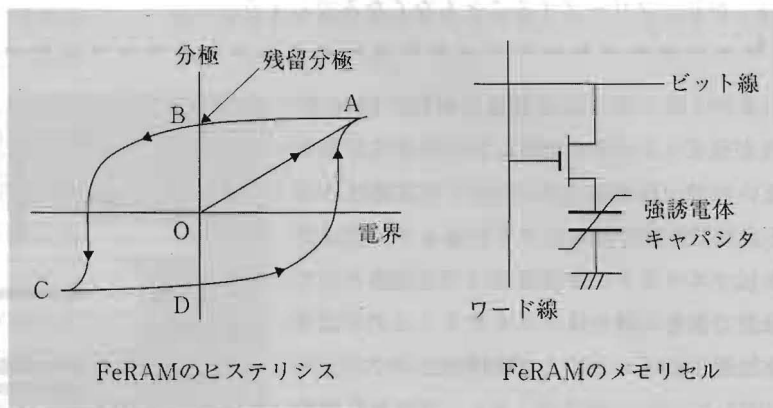


図3 FeRAMのヒステリシスとビット構成

ると、図3のC点へ移動し、電圧を初期の状態に戻すと再びA点に戻ります。このようなヒステリシスを描くのが、ペロブスカイト型結晶の特徴で、強誘電体 (Ferro Electric) と

呼ばれます。従って、電圧を切った状態では、BかDのどちらかに分極しており、マイナスかプラスの電荷が表面に誘起されており、これをメモリとして利用します。

ビットの構成は、図3右のようにDRAMのキャパシタの代わりに、強誘電体が用いられているわけです。

強誘電体の性質を持つ材料として、PZT (PbZrTiO₃) や SBT (SrBi₂Ta₂O₉) などのセラミックが用いられます。これらは圧電材料として知られているものです。

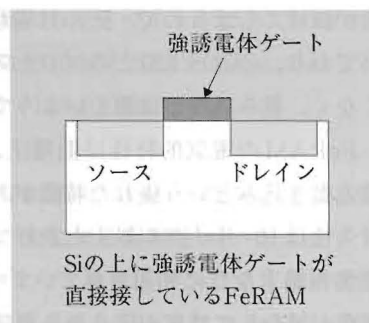


図4 1トランジスタ型FeRAM

＜ちょっと脱線＞ 20世紀最大の失敗作

カラーTVが一般化した頃、スイッチを入れても5秒間ぐらひは画が出ず、消費者からクレームが出たことがあります。ブラウン管の電子銃から電子が飛び出すには、電子銃のフィラメントを加熱する必要があります、これに時間がかかるためです。そこで電機メーカーは、スイッチを入れてなくても常時わずかの電流をフィラメントに流しておくことにしました。5秒も待てない程、消費者はせっかちなのです。それがPCはどうでしょうか。筆者のデスクトップは、電源を入れてからトイレで小用をたし、お茶を一服してもまだ立ち上がっていません。大事な場面でフリーズしてどこを押しても動かず、天を仰ぐ他ありません。こんなものが商品として認められているのが不思議です。20世紀最大の失敗作だと言っている人がいました。もし、世界最初に松下電器産業やソニーがこんなPCを発売していたら、両社とも訴えられたでしょう。しかし、皆さん、もう数年待ってください。MRAM、PRAM、ReRAMのどれかが大容量化に成功したら、こんな事態は解決です。HDDを止めて、すべてのデータを半導体高速不揮発性メモリに格納しておけば、スイッチを入れると瞬時に立ち上がり、フリーズすることもなくなるでしょう。

FeRAM用には電極の材料が問題で、Ptが望ましいがPtはSiO₂との密着性が良くないので、RuO₂、IrO₂のような電導性のある金属酸化物が用いられているようです。しかし、エッチングが困難で、フッ化物として除去できない場合は、イオンミリングのような加速したイオンによる物理的な力でエッチングしているようです。また、プロセス中で水素系のガスに曝されると、強誘電体膜の酸素が抜けてしまうので、その対策も必要と聞いており、CMOS LSIとのプロセス相性は良くなく、組み込むのは難しいようです。

FeRAMの電気的特性は低電圧、低電力、高速書き込みという優れた特徴があり、読み出し回数の耐久性は10¹²サイクル以上と良好で、各種のカードや携帯情報端末などに利用されています。FeRAMは、分極電荷が減少して感度が弱くなり微細化が困難なので、大容量メモリでなく、ニッチな用途に使い続けられるだろうと思われます。

ただし、図4に示すようなSiに強誘電体膜が直接載っているような簡単な構造の1トランジスタ型のFeRAMも原理的には可能です。実際は、Siと強誘電体との接触面が理想通りにはできず、まだ実現していませんが、研究開発は行われており、もし上手く完成すれば、極めて小面積でメモリが作れますから面白いことになりそうです。

2. MRAM

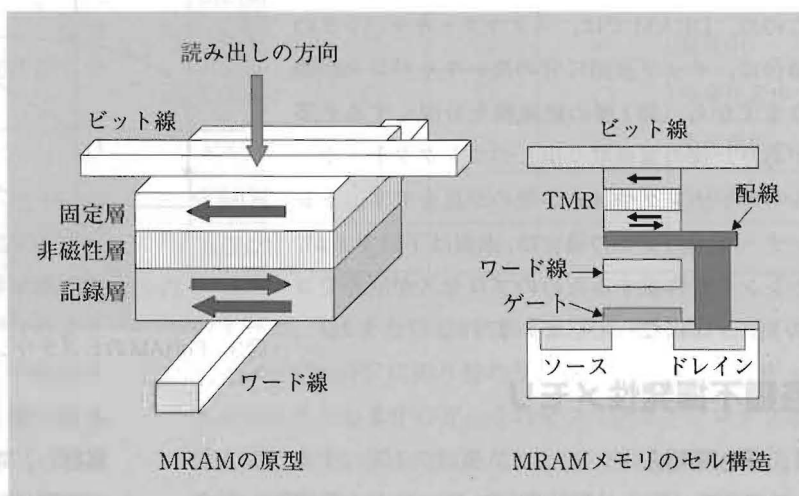


図5 MRAMの原理とセルの構造

HDDでは、かねてからGMR (Giant Magneto-resistance) 効果や、TMR (Tunnel Magneto-resistance) 効果を用いて大容量化が行われてきましたが、

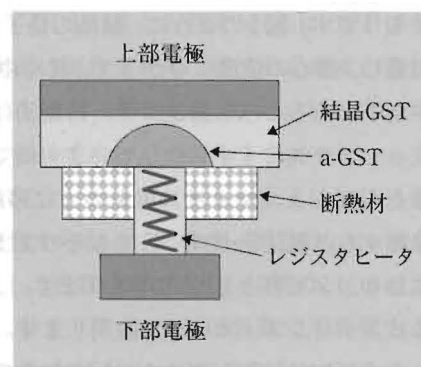


図6 PRAMの構造

同じ原理を半導体メモリに採用したのがMRAM (Magnetic Random Access Memory) です。図5左は、TMRの原理を示したもので、2枚の強磁性体で薄い絶縁層を

挟んだ構造をしています。図5左では、上の磁性体（固定層）は常に一定方向に磁化されており、下の磁性体（記録層）は、ビット線とワード線に流す電流が形成する磁場の方向に応じて、磁化の向きが左右の2方向のどちらかを向くことになります。そして、図で垂直方向の読み出し電気抵抗が、記録層の磁化の向きにより大きく変わることを利用します。固定層と記録層の磁化の向きが同じなら、絶縁層にトンネル電流が流れ、磁化の向きが逆になっていると、絶縁層に電流が流れません。

ビットの構造は、図5右のようになっており、ビットを選択するスイッチMOSの上にTMRが載っています。DRAMでは、スイッチMOS + キャパシタでしたが、MRAMではスイッチMOS + TMRとなるわけで、メモリの原理は異なるが考え方は同じです。磁性層にはCoFe/NiFeなどが用いられ、絶縁膜（バリア層）には、AlOxが使われていましたが、結晶性MgOなら抵抗比が大きく取れると注目され有望だと思われます。MRAMは、①書き込み・読み出しともに10nsという高速動作、②書き換え回数も 10^{15} 以上が望める、③低電圧動作、という優れた特徴がありますので、DRAMやその他のメモリに比べて優れており、安価に生産できるようになれば、メモリの王様になりうる可能性があります。MRAMの書き

き込みには電流を流す必要があるのですが、大集積化によって大電流が流れる心配があります。これに対してスピン注入磁化反転法が開発されて、有望だといわれていますが、ここでは省略します。

3. PRAM または PCRAM

PRAM (Phase-Change Random Access Memory) の記憶材料は、他

メモリのよう
な電氣的なも
のではなく、
化学反応を利用しています。
カルコゲナイドと呼ばれる
GST (GeSbTe)の材料は、
600℃程度で

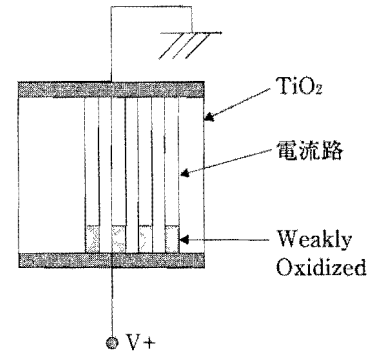


図8 ReRAMの動作

溶解させてア

モルファス（無定形）になると高抵抗になり、200℃程度で徐冷して結晶化すると低抵抗になり、これをメモリとして用いています。

PRAMの構造は、図6のように、微小なヒータが各ビットごとに設けてあり、これに電流を流してジュール熱を発生させます。融点まで加熱させる電流は比較的大きいですが、微細化すると電流も小さくて済みますので、集積度を上げられる可能性があります。スピードや耐久性のような動作特性は、フラッシュメモリより優れており、近々NOR型フラッシュに取って代わる可能性があります。NAND型フラッシュさえ置き換えるかもしれません。DRAMやすべてのメモリに置き換わる可能性さえあります。現在、90nm技術で512Mバイトができています。図7は、90nmプロセスでIntelとSTMicroelectronicsが共同開発した128MビットのPRAMです。

4. ReRAM

ReRAM (Resistive Random Access Memory) は、電圧によって抵抗の値が変化する材料を用いたメモリです。TiO₂、NiO、Cu₂Oなどに高電圧をかけると細い電流通路が何本かできて電流が流れるようになります。図8のように陽極側で酸化還元反応を起こし、酸化状態では絶縁物となり、還元されると金属的な状態となって電流が流れます。ReRAMの抵抗値の変化が何故起こるのかのメカニズムは、これ以外にもあるらしく現在検討が進められています。

ReRAMは、データ読み出し時間が10ns以下と速いこと、消費電力が小さいこと、微細化に適していること、製造コストが低いことから、フラッシュメモリの後継として注目されています。また、高温動作の信頼性が高く、

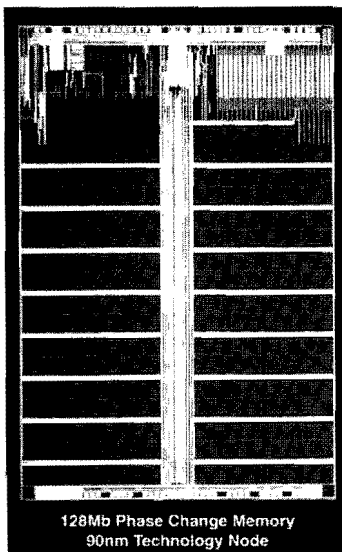


図7 IntelとSTMicroelectronicsが共同開発した128MビットのPRAM

自動車用として期待されており、ロジックLSIに混載する場合は、マスクを2枚追加するだけで可能ですので、混載用としても有望といわれています。図9は、富士通研究所から発表されたReRAMで、上下の電極はPtが使われています。

まとめ

今月は、SRAMの他に、各種の不揮発性メモリを勉強しましたが、最先端技術の話ばかりで入門講座の範囲を逸脱していたかもしれません。これらの不揮発性メモリは、次世代の王様になる可能性を秘めています。冒頭に示した表1を再度ご覧下さい。筆者の意見では、MRAMかReRAMが有望だと思いますが、PRAMこそ本命だと主張する技術者もいます。また、微細化が困難なのでニッチ用と思われていたFeRAMも、ビスマスフェライト系の材料を用いて微細化が可能という情報もあり、また1トランジスタ型の開発も行われていますから、これも無視できません。次世代の王様は、ここ数年以内には選ばれるでしょう。半導体の技術革新はまだまだ続き、実に面白いですね。

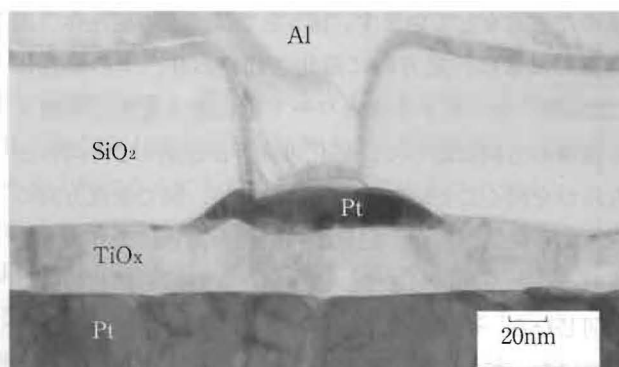


図9 富士通研究所のTiO₂を用いたRRAM

なお、本講座ではFeRAM、ReRAMとしましたが、FRAM、RRAMも一般に使われています。ただ、これらは特定企業の商標だと聞いていますので、本講座では用いませんでした。

お詫びと訂正

本誌07年11月号第7回p91「ちょっと脱線」の中で誤りがございました。正しくは「真空度が10Pa程度と低いと平均自由行程が1mm程度なので残留分子にぶつかって、下図左のように軌道が曲がってしまいます。そこで、真空度を1Paに上げて、平均自由行程を10mm以上にしますと垂直入射が得られます」となります。訂正してお詫び申し上げます。