究極の不揮発性ワークメモリ MRAM

高速・大容量の磁性メモリで快適なユビキタス社会を実現

既存のワークメモリは，電源がなくなれば蓄えられた情報が消えてしまいます。あるいは，情報の書換え回数に制限があり，常に動作し続けなければならないワークメモリとしては使用できません。

MRAM（Magneto resistive Random Access Memory）は，究極の不揮発性ワークメモリです。

実用化されれば，瞬時に起動できるインスタントオン機器が実現し，また，スタンバイ時の消費電力を1/10 程度にも低減できるため，モバイル機器の電池寿命を大きく伸ばし，快適なユビキタス社会を実現します。

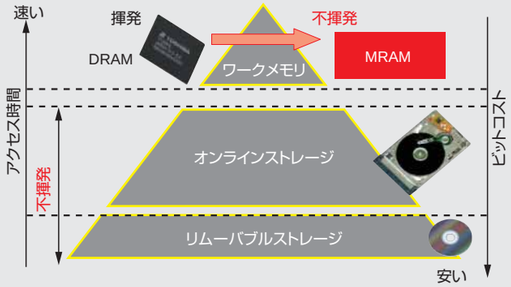


図1．PC のメモリ・ストレージハイアラーキ ― 高速のワークメモリと大容量の不揮発性ストレージとで構成されています。

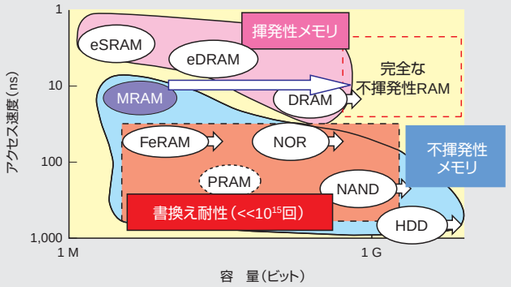
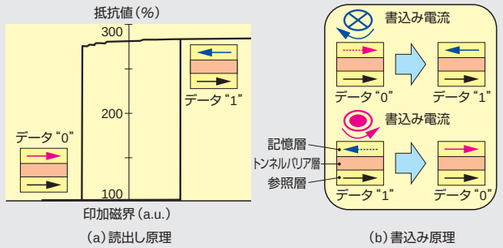


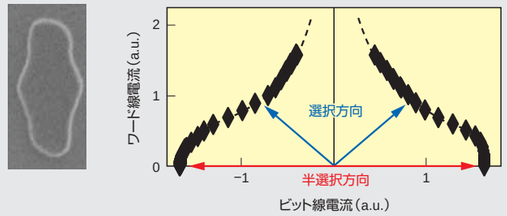
図2．メモリとストレージのアクセス速度−容量マップ及び MRAM 開発の目標 ― 高速かつ不揮発なメモリは存在しません。これが MRAM の目標です。



（a）読出し原理　　（b）書込み原理

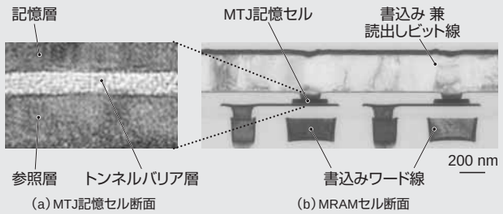
a.u.：任意単位

図3．MRAM の読出し原理と書込み原理 ― 読出しにはトンネル磁気抵抗効果を使い，書込みには電流で発生する磁気を使います。記憶層と参照層の磁化が同方向の状態を“0”，反平行の状態を“1”に対応させます。



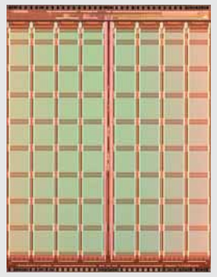
（a）SEM像　　（b）書込みしきい値曲線

図5．プロペラ形状の MTJ 記憶セルの SEM（走査型電子顕微鏡）像と書込みしきい値曲線 ― 選択方向のしきい値に比べて，半選択方向のしきい値が大きく，誤書込みを防止できます。



（a）MTJ記憶セル断面　　（b）MRAMセル断面

図4．MTJ 記憶セル断面と MRAM セル断面の TEM（透過型電子顕微鏡）像 ― MTJ 記憶セルの基本構成は，数 nm 厚さの記憶層（NiFe（ニッケル鉄））／約 1 nm 厚さのトンネルバリア（AlOx（酸化アルミニウム）又は MgO（酸化マグネシウム））／数 nm 厚さの参照層（CoFe（コバルト鉄））で，MRAM 記憶セルの基本構成は，MTJ 記憶セルとその上下に直交配置した書込み配線です。



（a）チップ

プロセス温度	320 ℃	BEOL
駆動電圧	1.8 V	
アクセス時間	34 ns	
バーストモード速度	200 Mバイト/s	
セル占有率	40 %	

BEOL：Back End Of Line（バックエンドプロセス）

（b）主要性能

図6．16 M ビット MRAM のチップと主要性能 ― 世界最大容量，最高速度，最小電圧駆動，最大セル占有率，及び最高プロセス温度を達成しました[注2]。

究極の不揮発性ワークメモリを目指して

現在のパソコン（PC）のメモリハイアラーキ（階層）を図1に示します。大量の情報が不揮発性ストレージのハードディスク装置（HDD）に保存されており，必要に応じて高速ワークメモリの DRAM に情報が読み出されたり，ワークメモリからストレージに情報が記録されたりします。なお，携帯電話では，ストレージとして HDD の代わりにフラッシュメモリが使用されています。

ユビキタス社会の到来とともに，ほとんどのモバイル機器も PC や携帯電話のようなメモリハイアラーキを持つようになっています。しかし，起動に時間がかかったり，また，電池寿命が短いなど，快適な使用には程遠い状況です。

ワークメモリが不揮発になれば，起動時にストレージからワークメモリに情報を読み込む必要がなくなり，瞬時に機器を動作状態にすることができます（インスタントオン）。また，DRAM のように待機時にリフレッシュする必要もないため，待機時の消費電力を1/10 程度に低減できます。

無限大の書換え耐性があり，10 nm 幅でも不揮発な磁性材料

図2に既存のメモリ（SRAM（Static RAM），DRAM，NAND，NOR，FeRAM（Ferroelectric RAM），HDD）と開発中の新規メモリ（PRAM（Phase change RAM），MRAM）を容量・アクセス速度マップにプロットしてみました。不揮発で書換え制限のないメモリ候補は MRAM だけであり，MRAM が大容量化されれば究極のメモリが誕生します。

図 3，**図 4** に示すように，TMR（Tunnel Magneto-Resistance）効果を持つ MTJ（Magnetic Tunnel Junction）を記憶セルとして使用します。MTJ は図 3 の（a）に示すように，トンネルバリアを挟む 2 枚の磁性材料から成り，それぞれの磁化が平行の場合は小さな抵抗値“0”をとり，反平行の場合は大きな抵抗値“1”をとります。書込みは図 3（b）に示すように，書込み配線に電流を流し，磁界を発生させて行います。

磁性材料は HDD の記憶媒体材料として 40 年以上使用されており，MTJ も既に 1 年以上の実績があります。磁性材料は，実質無限大（10^{15} 回以上）の書換え耐性があること，磁性粒子の直径を 10 nm 程度に微細化しても不揮発性が保てることが証明されており，不揮発性ワークメモリの記憶セル材料として最適な材料と言えます。

一方，トンネルバリアの厚さは 1 nm 程度であり，その信頼性が懸念されていましたが，バリアの上下界面を原子レベルで平滑にする成膜技術を構築し，ほぼその信頼性は確保されつつあります。

世界最大容量・最高速度・最小電圧駆動の 16 M ビット-MRAM

MRAM を大容量化するときの課題は書込み電流値の低減と誤書込み防止の両立でした。

東芝は，他社が解決できなかったこの課題を，**図5**（a）に示す独自のプロペラ形状の MTJ により解決しました。その書込みしきい値曲線を図 5（b）に示します。ワード線とビット線の両方に電流を流し，選択方向のしきい値を超えて情報を書き込みます。この形状により，選択方向でしきい値曲線をもっとも原点に近づけることが可能となり，電流値低減と誤書込み防止が両立できました。

図6（a）は，日本電気（株）と共同で開発した 16 M ビット-MRAM のチップ写真です。前述の技術と高効率の書込み配線を組み合わせて，従来の 40 % に相当する 4 mA の低書込み電流値を実現しました。

図 6（b）には，その主要性能を示します。書込み配線の抵抗値を半減する回路技術などを採用し，世界最小の駆動電圧（1.8 V）と世界最高のバーストモード速度（200 M ビット/s）を達成しました。

1 G ビット級の大容量に向けて

前述の技術は，256 M ビット程度までの大容量化が可能と考えられます。しかし，1 G ビットを超えるためには更なる書込み効率の向上が必要です。当社は，得意分野である LSI 技術と，世界最小[注1]の 0.85 インチ HDD を作り上げた磁性技術を結集して，この壁の突破に取り組んでおり，1 ～ 3 年以内には必ずブレイクスルーを起こすことができると考えています。

（注1），（注 2）2006 年 8 月現在，当社調べ。

與田　博明
セミコンダクター社
半導体研究開発センター
先端メモリデバイス技術開発部主幹