

大容量 MRAM への書込み特性の向上

Improvement of Write Performance of High-Density MRAM

甲斐 正 池川 純夫 與田 博明 田原 修一

■ KAI Tadashi

■ IKEGAWA Sumio

■ YODA Hiroaki

■ TAHARA Shuichi

モバイル情報機器の高性能化や多機能化が進み、大容量不揮発メモリの開発が急務となってきている。MRAM (Magnetoresistive RAM) は、真のランダムアクセスを初めて可能にする不揮発メモリとして期待されているが、大容量化を実現するためには、書込み動作マージンの拡大、スイッチング電流の低減、及び熱安定性の改善など、書込み特性の向上が課題となっている。

東芝と日本電気(株)による共同開発は、セルの平面形状を工夫することによりアストロイド曲線を急峻(きゅうしゅん)に変化させることに成功し、MRAMの大容量化に必要な十分な書込み特性が得られる可能性を示した。

It is important to develop large-capacity nonvolatile memory for successive improvements in the performance of digital devices with state-of-the-art technology. Magnetoresistive RAM (MRAM) is expected to be a universal random access memory with a combination of nonvolatility, speed, and read/write endurance. However, the mass production of MRAM requires improvement of the write property, such as enhancement of the writing region and reduction of the writing current, as well as improvement of the thermal property.

Toshiba and NEC Corp. have developed a new bit cell design that exhibits excellent astroid curves and offers the possibility of high-density MRAM with superior write performance.

1 まえがき

近年、携帯電話などのモバイル機器の発達や自動車の電子化などに伴って、不揮発RAMの必要性が高まってきた。現在までに、不揮発メモリとしてフラッシュメモリやFeRAM (Ferroelectric RAM) が既に提案されているが、これらは書換え回数の制限や書込み速度が遅いという観点から、いまだに不揮発RAMとして認められていない。MRAM (Magnetoresistive RAM) は、これらのスペックをすべて網羅する究極の不揮発メモリとして提案され、大きな期待を集めている。

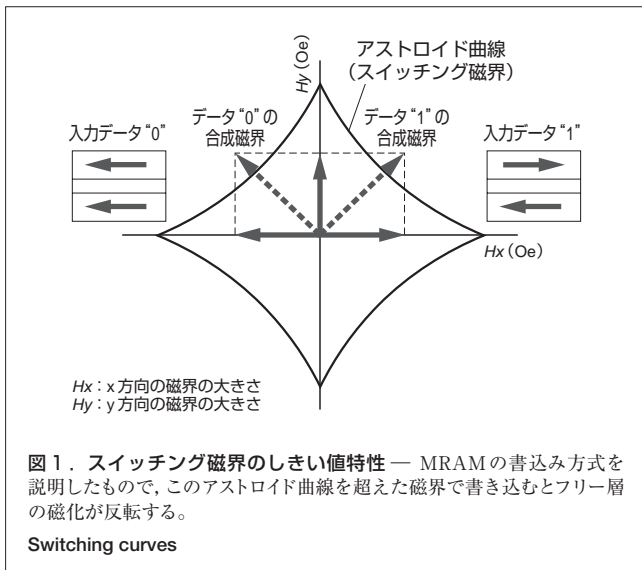
MRAMはFDD(フロッピーディスク装置)やHDD(ハードディスク装置)のように、情報の読み書きを磁性体の磁化の方向によって判別するメモリである。そのため、原理的に書換え回数は無制限で、高速動作・高密度化・低電圧動作・高温動作が可能、などの特長を持っている。しかしながら、MRAMはビット線とワード線の交点にセルを配置し、それらの合成磁場で書込みを行うため、大容量化するほど隣接するビットは半選択ディスタブが起りやすくなる。つまり、十分な書込み動作マージンを確保することが大容量化への課題となる。

今回、東芝は日本電気(株)と共同で、MRAMのセルの形状を工夫することにより書込み動作マージンを広げることに成功し⁽¹⁾、MRAMの大容量・高密度化へのめどをつけた。

2 MRAMの書込み原理

MRAMは、トンネル磁気抵抗効果を用いた素子(MTJ: Magnetic Tunneling Junction)を基本としているメモリである。MTJは、自由強磁性層(フリー層)と固定強磁性層(ピン層)と呼ばれる二つの磁性層の間に薄い絶縁膜(トンネルバリア層)を挟んだ構造である。ピン層の磁化方向は固定されているため、フリー層の磁化の向きを変化させることにより、ピン層との磁化の相対角度が平行か反平行かの違いを取ることができる。その磁化配列の違いにより、MTJの抵抗値に違いが生じ、データを読み出すことができる⁽²⁾。

書込みでは、互いに直交したビット線とワード線をMTJの上と下に設け、これらの配線に電流を流して発生する磁界により、フリー層の磁化方向を反転させる。フリー層の磁化を反転させる外部磁界のしきい値曲線(アストロイド曲線)を図1に示す。縦軸、横軸はワード線電流とビット線電流が作る磁界を示し、選択されたメモリセルにはビット線とワード線により誘起された磁界が合成され印加されることになる。図1に示すように、ビット線又はワード線のどちらかが単独で誘起する磁界では、フリー層の磁化が反転するしきい値(アストロイド曲線)を超えることはなく、メモリセルの記憶データは変化しない。この状態を半選択と呼ぶ。一方、ビット線からとワード線からの合成磁界の場合はしきい値を超え、フリー層の磁化反転を起こす。すなわち、ビット線とワード線

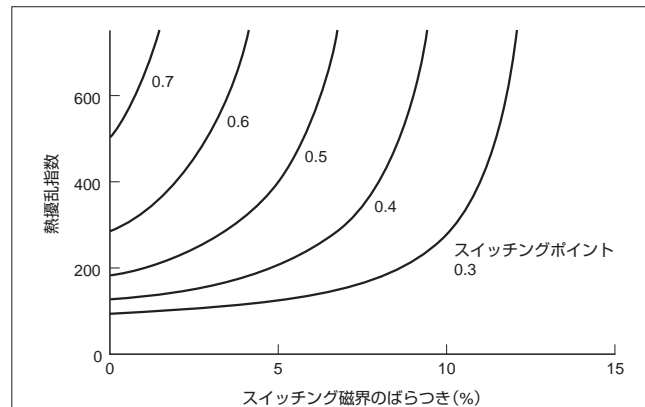


との交点のセルだけが選択されてデータの書き込みが行われることになり、セルレイの中で選択的に情報が書き込まれることになる。しかしながら実際の素子では、反転電流値にばらつきが生じたり、アストロイド曲線の形自体が変化したりすることが誤書き込みを起し、書き込み動作マージンを減少させる原因となっている。

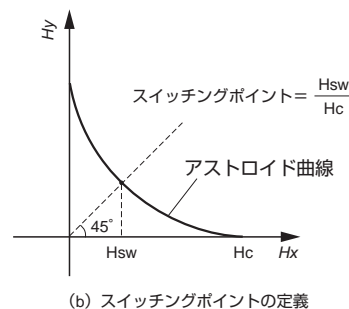
3 MRAMの高密度化

MRAMの大容量化を実現するための課題としては、半選択ビットの誤書き込み問題と熱的不安定性からくるビット情報の消失をなくすことが挙げられる。図2 (a)は、スイッチング磁界のばらつきを横軸にして、必要な熱擾乱(じょうらん)指数 ($\Delta E/kT$, ΔE : エネルギー, k : Boltzmann 定数, T : 絶対温度) をプロットしたものである。

図2(a)を見ると、スイッチング磁界のバラツキが増大すると膨大な熱擾乱指数が必要になることがわかる。図2(a)はまた、スイッチングポイントを低減することにより、熱擾乱指数が減少することやスイッチング磁界のバラツキの許容範囲が広がることを示している。ここで、スイッチングポイントとは、図2(b)にあるように、アストロイド曲線と斜め45°の直線との交点のx成分(H_{sw})と、磁化容易軸上のスイッチング磁界(H_c)の比で定義されている。つまり、スイッチングポイントが小さいということは、そのアストロイド曲線が急峻に変化しているということであり、書き込み動作マージンが広がり、熱擾乱耐性も高くなる。したがって、スイッチングポイントを小さくした優れたアストロイド曲線を作製する技術は、MRAMを大容量化するためには必要不可欠である。東芝と日本電気(株)は2004年、優れたアストロイド曲線を示す新しいMTJセル形状を提案した⁽¹⁾。そのセル形状は図3(a)に示す



(a) 異なるスイッチングポイントに必要な熱擾乱指数



(b) スwitchingポイントの定義

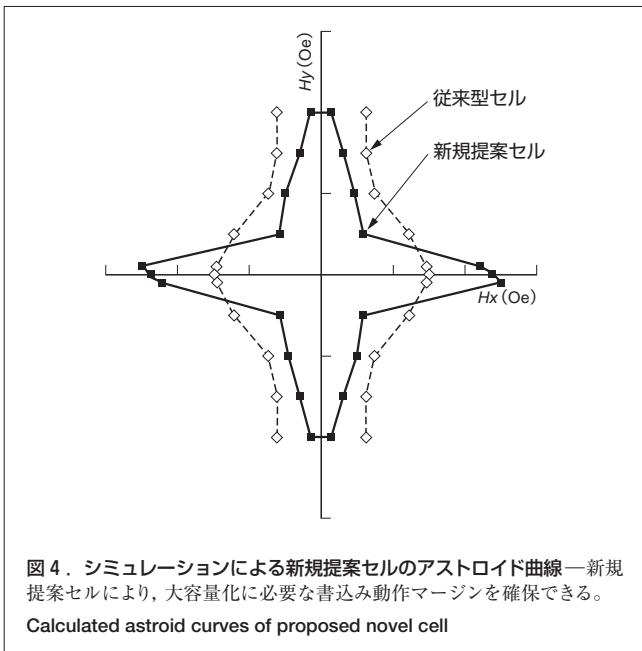
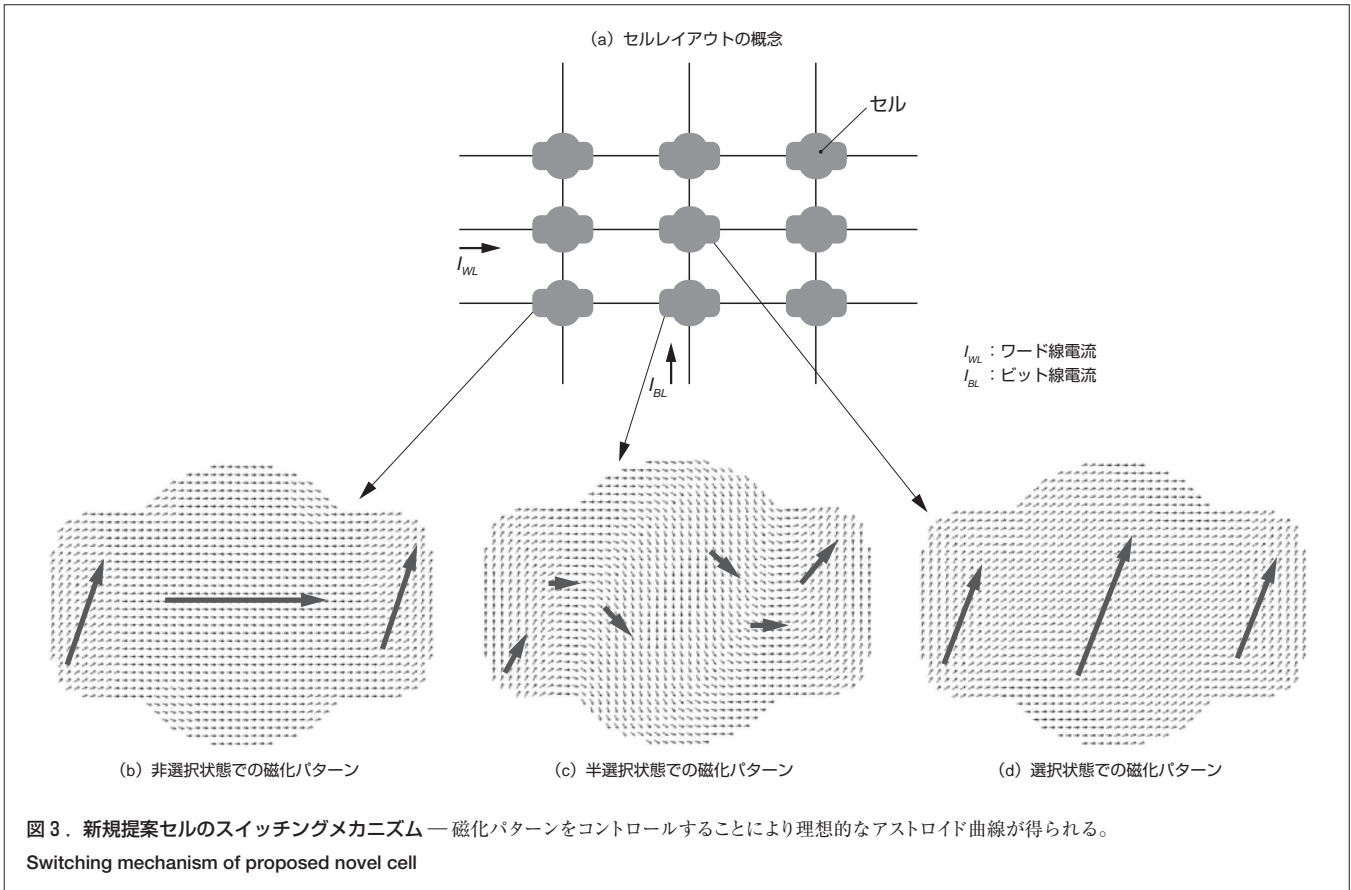
図2 熱擾乱指数とスイッチング磁界のばらつきの関係 — 書き込み動作マージンを確保するためにはスイッチング磁界のバラツキとスイッチングポイントの低減が必須である。

Required thermal stability factor as function of switching field distribution

ように、従来の長方形形状のサイドに半円状の形状が付加された形状となっている。そのスイッチングメカニズムは非常にユニークで、これまでに提案されていたSavtchenkoスイッチング⁽³⁾やCypress⁽⁴⁾が提案しているスイッチングのメカニズムとは異なる。

4 シミュレーション結果

前述したMTJセル形状に対してLLG (Landau-Lifshitz-Gilbert)シミュレーションを行い、磁化パターンの反転過程を調べた。図3(b)は、そのセルの残留磁化状態(非選択状態)での磁化パターンであり、S型磁区を示す磁化パターンを示している。ビット線に流した電流から発生した磁界、つまり磁化容易軸方向を向いている磁界が印加される(半選択状態)と、新規提案セルの中央部分の磁化が磁化困難軸方向に回転を始め、そして図3(c)にあるようにセル内に二つのC型磁区が現れる。このような磁化配置では、磁化を反転させることが困難となり、その磁化容易軸上のスイッチング磁界が増大する。したがって、ビット線から発生した磁界がかかった半選択セルでの誤書き込みが生じにくくなる。



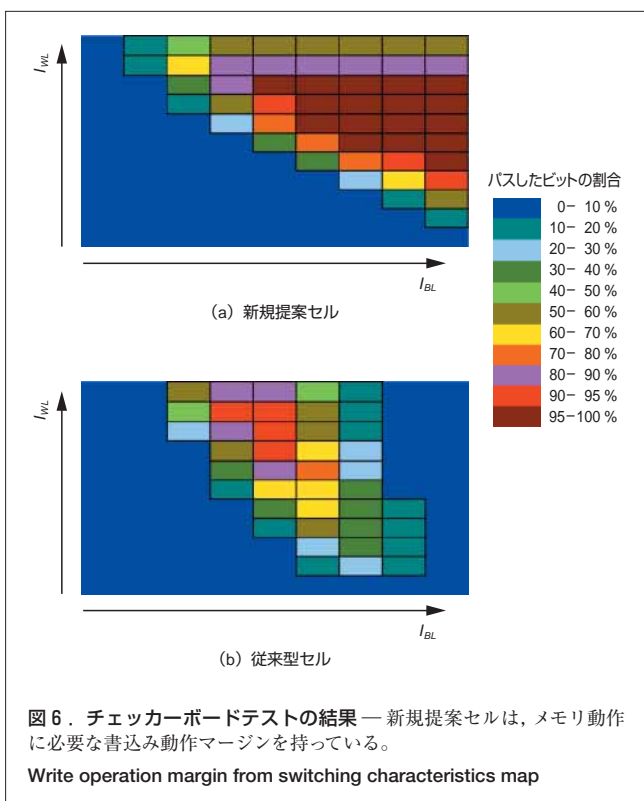
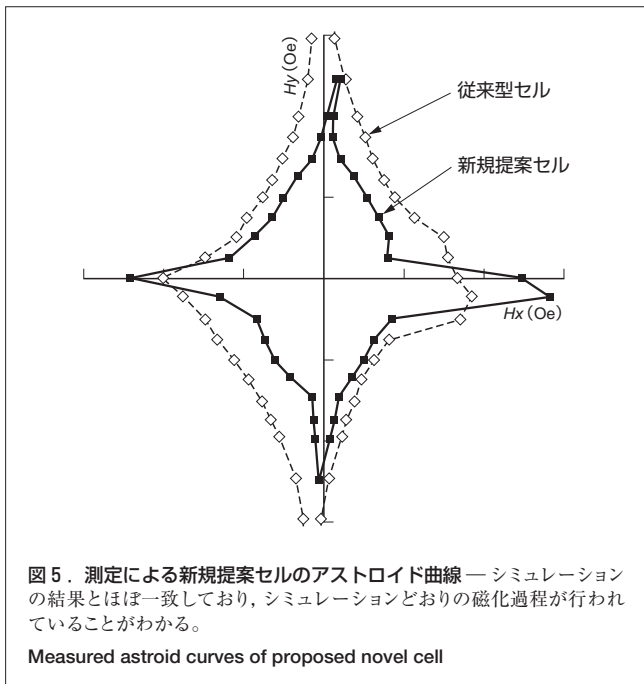
次に、ビット線とワード線から発生した磁界が印加された(選択状態)場合、磁化が一斉に回転する一斉回転モードで反転を行い、そのスイッチング磁界は小さくなる。新規提案セルでは、半選択状態にある一つの配線から発生される

磁場でのスイッチングメカニズムと、選択状態にある二つの配線から発生される磁場でのスイッチングメカニズムとがまったく異なっているため、そのアストロイド曲線が図4のように急峻なアストロイド曲線になることがわかる。シミュレーションの結果、新規セルのスイッチングポイントは0.2になり、単磁区モデルでの値0.35より小さい。図4から明らかなように、書き込み動作マージンが拡大し、そのスイッチング磁界も従来型形状より低減していることがわかる。

5 実験結果

新規のMTJセル形状を持つ240ビットのアストロイド曲線の平均値を図5に示す。比較として、従来型セルの平均アストロイド曲線も示した。新規提案セルのアストロイド曲線は、図4に示したLLGシミュレーション結果のアストロイド曲線とはほぼ一致しており、大きな書き込み動作マージンを示している。このとき、スイッチングポイントは0.29であり、シミュレーションの結果より若干大きくなっている。

新規MTJセルの回路での特性を調べるために、4kビットの回路を作製し、チェッカーボードテストを行った。図6は、新規提案セルと従来型セルのチェッカーボードテストの結果を示している。新規提案セルの書き込み動作マージンは従来



型セルの書き込み動作マージンより広がっていることがわかる。つまり、アストロイド曲線が急峻になったため、半選択干渉が減り、書き込み動作マージンが拡大されている。これらの結果から、この新規提案セルが数百Mビット以上の回路での書き込み動作マージンを確保できる能力があることが確認されている。

6 あとがき

東芝と日本電気(株)は、大容量化MRAMに必要な熱安定性と半選択ビットのディスタ urb ラバスタ性を大幅に向上した新規なMTJセルを提案した。そのスイッチングメカニズムは特徴的で、アストロイド曲線は理想的にくぼんだ急峻な曲線を示した。更に、4kビットの回路を作製し、チェッカーボードテストを行った。その結果、大きな書き込み動作マージンが確認され、その新規なMTJセルが大容量化MRAMにとって必要な書き込み特性を持っているということが示された。

この研究の一部は、NEDO技術開発機構(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)・Focus21助成事業の一環として行われた。

文献

- (1) Kai, T., et al. "Improvement of robustness against write disturbance by novel cell design for high density MRAM". IEDM Technical Digest, San Francisco, 2004-12, IEEE, p.583 - 586.
- (2) 猪俣浩一郎, ほか. MRAM技術. 東京, サイベック, 2002, 206p.
- (3) Durlam, M., et al. "A 0.18 μ m 4Mb Toggling MRAM". IEDM Technical Digest, Washington, 2003-12, IEEE, p.995 - 997.
- (4) Ounadjela, K., et al. "Write Data Issues For Making Functional 256kb MRAM Parts". 9th Joint MMM/Intermag Conference, Anaheim, 2004-01, APS, p.370.



甲斐 正 KAI Tadashi, D.Eng.

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー研究主務, 工博。MRAM開発の磁気設計に従事。日本応用磁気学会会員。Advanced LSI Technology Lab.



池川 純夫 IKEGAWA Sumio, D.Eng.

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー主任研究員, 工博。薄膜材料とMRAMの開発に従事。American Physics Society, 日本物理学会, 応用物理学会会員。Advanced LSI Technology Lab.



與田 博明 YODA Hiroaki

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー研究主幹。プロジェクトリーダーとしてMRAMの開発に従事。Advanced LSI Technology Lab.



田原 修一 TAHARA Shuichi, D.Eng.

日本電気(株) システムデバイス研究所統括マネージャー, 工博。プロジェクトリーダーとしてMRAMの開発に従事。IEEE, 応用物理学会, 電子情報通信学会会員。NEC Corp.