

トンネル磁気抵抗効果

大学院工学研究科 宮崎照宣 (miyazaki@mlab.apph.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

室温で大きな磁気抵抗効果 (Tunnel magnetoresistive effect, 略して TMR 効果) が報告されて以来 [1], これに関する研究が実験, 理論の両面から内外で精力的に行われてきた. 基礎研究に関しての最近の成果としては, TMR 変化率の結晶方位依存性 [2], クーロンブロッケイド領域における TMR 変化率の増大 [3, 4], 印加電圧の増加に伴う TMR 変化率の振動 [5] 等の興味ある現象の観測があげられる. 一方, 応用研究としては大きな TMR 変化率を示すトンネル接合を高密度磁気記録における再生磁気ヘッド (RMH) として利用する研究, および MRAM (Magnetoresistive random access memory) を開発しようとする2つの大きな研究があげられる. 前者は主に日本で, 後者は主にアメリカで展開され, いずれもがプロトタイプの商品を作る一歩手前のところまできている.

本報告ではまず, 接合の作製方法の現状を紹介し, RMH および MRAM 研究の最近の動向に関して筆者の印象を記す.

2. 接合の作製方法

接合の構成は基本的には強磁性体/絶縁体/強磁性体であるが, 実用素子としてはスピナルブ GMR と同様に片方の強磁性層を反強磁性薄膜で磁化をピンした, スピナルブタイプ TMR 接合が最近多くの研究対象となっている. 絶縁層を挟んでいずれの側の強磁性層をピンするかは接合をいかなるデバイスに应用するかに依存するが, 重要な点は後で記述するように均一な薄い絶縁層を如何に作るかである. そのためには Al を蒸着又はスパッタする直前の薄膜表面の凸凹を極力抑える必要がある. 我々が作製している標準的なスピナルブタイプの TMR 素子の積層構成は熱酸化 Si /Ta(50) /Py(30) /Cu(200) /Py(30) /IrMn(100) /Co₇₅Fe₂₅(40) /Al(8)-O /Co₇₅Fe₂₅(40) /Py(200) /Ta(50) であり, かなり

複雑である. ここで () 内の数値はそれぞれの層の膜厚で単位はオングストロームである. また, Py はパーマロイ (80 NiFe 合金) である. 最初の Ta, Cu は電極のシート抵抗を下げるための層であり, 次の Ta は Py の fcc (111) 配向を向上させる役割がある. Py が fcc (111) 配向することにより Ir-Mn が fcc (111)配向し, 一方向性磁界がしっかり賦与される. この Ir-Mn の一方向性磁界は次の層の CoFe をピンする役割がある. CoFe(F1)/Al-O/CoFe(F2) はトンネル接合の基本構造であり, 最後の Ta は酸化防止のためである.

次に絶縁層の作製方法について述べる. 絶縁層としてはほとんどが Al-oxide (Al₂O₃ に近いもの) である. この理由は MgO, H₂O₂ 等の絶縁層についても調べられたが, Al-oxide より優れたものができなかったことによる. Al₂O₃ の作製には自然酸化 (酸素雰囲気中又は大気中) とプラズマ酸化が用いられている. コントロールのし易さ, 生産性等の工学的な差は両者にあるが本質的な差はないと考えている. 一例を記すと, 5×10⁻⁸ Torr 以下の Back Pressure に到達後 Al を 10~15 Å スパッタする. 引き続き IPC (Inductively Coupled Plasma) 法にてプラズマ酸化する. 酸化条件の一例として Ar 圧:0.25 Pa + O₂: 0.75 Pa の混合ガス中でターゲットに 20 W, 1 ターンコイルに 70 W の電力でプラズマをたて, 約 210 秒酸化させる. 酸素雰囲気中での自然酸化の条件の一例としては 20 Å の Al を 200 Torr の O₂ 圧力下で 60 分間がある. また, 湯浅ら [2] は反応性蒸着により, 最近再現性のよい接合抵抗を作っている. 図 1 には磁気抵抗曲線の一例を示す. この接合は作製後 300℃で 1 h 磁界中でアニール後, 室温 (a) および 4.2 K (b)で測定したものである. TMR 比は室温と 4.2 K でそれぞれ 49%, 69%とこれまでの報告値の中で最大の値である. 特に注目すべき点は, 4.2 K の値は磁性層の分極率から理論的に予測される値とほぼ一致していることである.

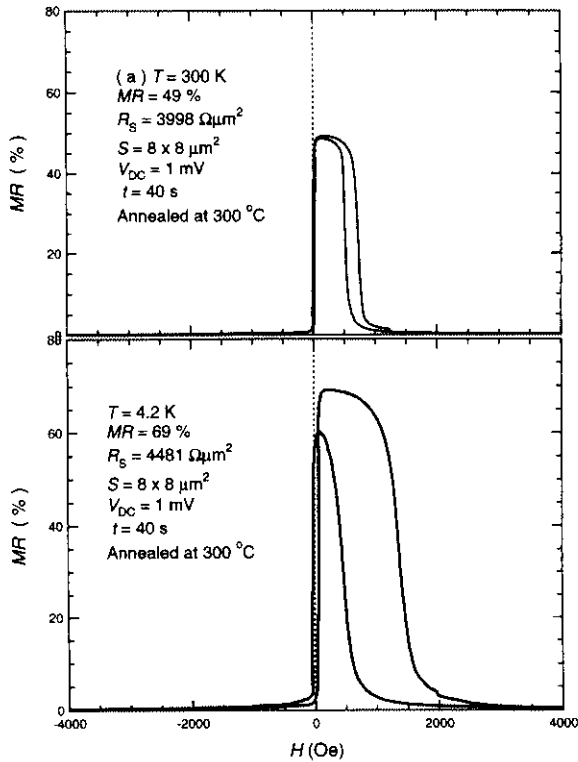


図 1. スピンバルブ型トンネル接合の磁気抵抗曲線，室温(a)および 4.2 K(b).

接合：SiO₂/Ta/Py/Cu/Py/IrMn/Co₇₅Fe₂₅/Al-Oxide
/Co₇₅Fe₂₅/Py/Ta.

3. 再生磁気ヘッド用強磁性トンネル素子

40 Gbit/in² 以上の超高密度磁気記録を実現するための要素技術の一つとして超高感度の再生磁気ヘッドの作製が不可欠である。TMR 効果を利用したヘッドはその高い磁気抵抗変化率と高センス電流値により，現在用いられている GMR ヘッドよりも一桁高い出力が期待できる。これに関する研究はこれまで NEC が ASET の一環として研究してきた。最近では TDK も意欲的な新聞発表をし，注目されている。また，富士通，ソニー等では TMR の材料研究を続けている。筆者らのグループでは Storage Research Consortium (SRC) および文部省科学研究費の援助ならびに NEDO の地域コンソーシアムの一部として TMR 再生磁気ヘッドに関わる研究を行なっている。国外では，アメリカは後で記述するように MRAM 一辺倒であったが，最近 IBM の Parkin 氏は再生ヘッドのことも合わせて話すようになり，トーンが変わってきたという印象である。ヨーロッパでは Siemens が MRAM と明言しているのに対して Philips は再生ヘッドをねらっている。現在用いられている GMR ヘッドを強磁性トンネル素子で置

き換えることにより，高密度磁気記録を実現しようとした場合，クリアしなければならないいくつかの課題がある。なかでも素子の抵抗を小さくすることは現行のヘッド仕様で行く限り絶対実現しなければならない課題である。このことは後に述べる MRAM も同様であるが，再生磁気ヘッドの場合には MRAM に比べて約 2 桁抵抗値を下げる必要がある。従って TMR に関する研究が進むにつれて，強磁性トンネル素子の低抵抗化と高 MR 変化率の必要性が理解され，その努力が払われてきた。図にはこれまで多くのグループの結果を抵抗値と MR 変化率でプロットした結果である。図の網目の Target の部分が再生磁気ヘッドとして要求される抵抗値と MR 変化率を示している。TDK と NEC のデータはそれぞれ 33 kΩ・μm²，31%および 160 kΩ・μm²，30% で再生ヘッドとしての要求範囲の特性をほぼ満足していると言える。筆者らのグループでは数 kΩ・μm² で 50%近い MR 変化率の素子を作製したが，高い MR 変化率を維持しながら，もう 2 桁低抵抗化が実現できると素晴らしい。

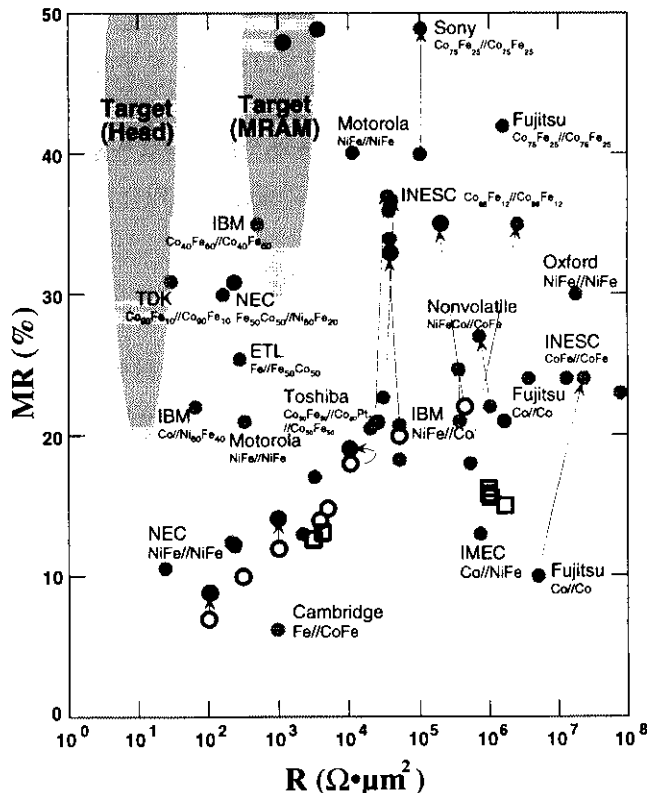


図 2. トンネル接合の開発目標 (RMH および MRAM) と現状の TMR 比および抵抗値。図中の● (アニール後)，○ (アニール前) は我々のグループの結果，●は他のグループの結果。

4. 磁気抵抗効果型ランダムアクセスメモリ (Magnetoresistive Random Access Memory)

先ず原理的なことから簡単に説明する。

4-1 情報の書き込みおよび読み出し

メモリーとして動作するためには“1”，“0”の状態を実現でき（書き込み）しかもいずれかの状態であるかを知る（読み出し）必要がある。この動作原理を説明する。まず、書き込みについて考えることにする。図 3(a)には磁気抵抗曲線のフルループを細線で示す。ワード線にパルス電流を流し、図(a)の左下図のようなパルス記録磁界を発生する。この磁界のピーク値はフリー層の F2 の保磁力よりも大きく、また、F2 層の磁化は左（マイナスの向き）を向いた状態にしておく。磁界をゼロにしても両者の磁化は左を向いたまま平行に保たれる（図の太い矢印）。従って“0”の状態が書き込まれる。“1”の状態を書き込むには逆に右側（プラスの向き）に $H_c(F2) < H < H_c(F1)$ の磁界を印加した後、磁界をゼロに戻す。その時の抵抗変化は(a)図の右上の磁気抵抗曲線の太い線のように変化し、抵抗の高い“1”の状態が実現できる。“0”か“1”のいずれの状態にあるかを検出するにはセンス線に図(b)に示すようなセンス電流を印加する。“0”と“1”の状態では抵抗が異なるため出力（図(b)のセンス信号）が異なる。このセンス信号の値により“0”か“1”を区別できる。

図 4 には MRAM と DRAM (Dynamic Random Access Memory) のセルおよび原理の比較を模式的に示す。図(a)の MRAM の1セルは先に示したトンネル接合と一つのセルを選択してセンス電流を流すための電界効果トランジスタ (MOSFET) からなる。“0”，“1”状態は前述のように抵抗の大きい状態（磁化の反平行状態）と抵抗の小さい状態（磁化の平行状態）に対応する。この二つの状態は外部から磁界を印加しない限り同じ状態を保ち、不揮発性メモリである。DRAM の一セルは MOSFET とコンデンサ 1 個からなり、1 セルの構成は MRAM と DRAM で類似している。しかしながら“1”，“0”のメモリ状態はコンデンサに電荷がたまっているか、ゼロかで区別される。“1”の状態のコンデンサの帯電荷状態は放置すれば放電してゼロになるため、ある時間間隔で充電してやる必要があり（リフレッシュ）、メモリとしては揮発性である。MRAM と DRAM の大きな相違点はこの不揮発性と揮発性の点にある。

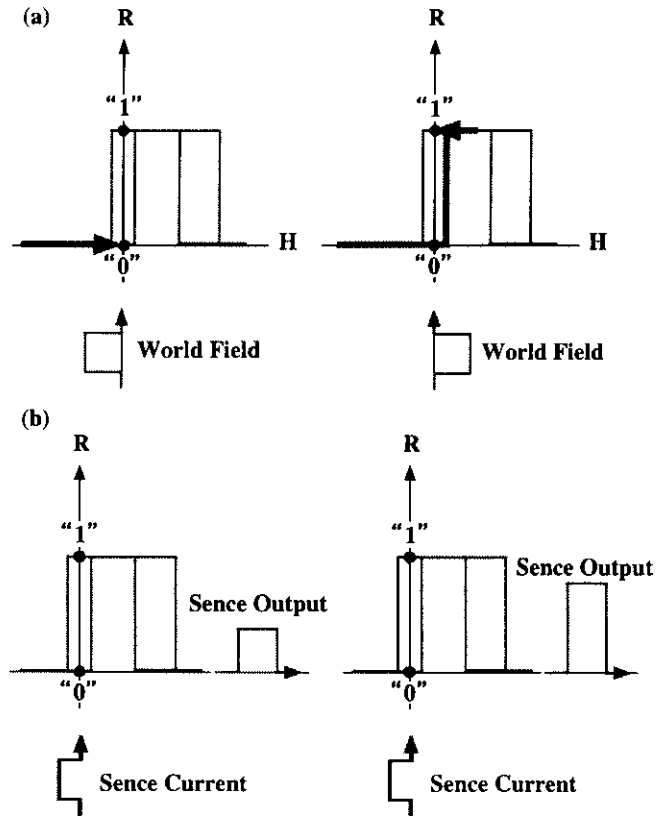


図 3. “0”，“1”状態の記憶（読み込み）(a)と読み出し(b).

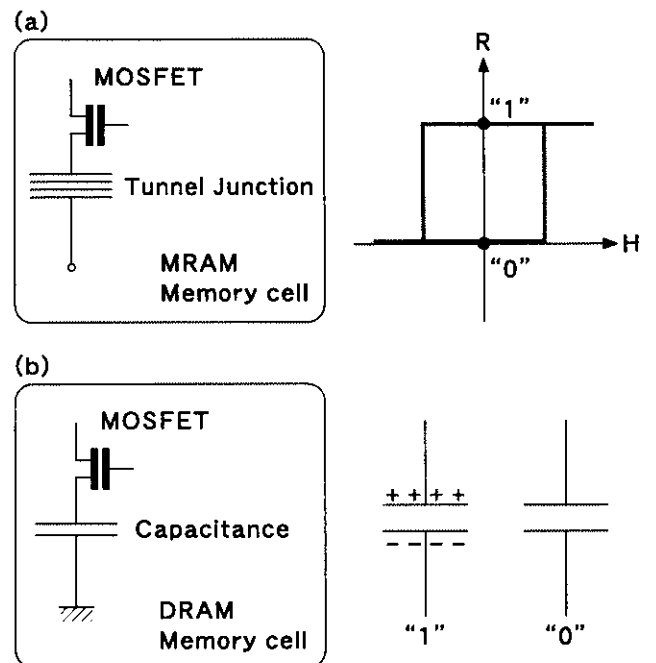


図 4. (a)MRAM メモリセルと記憶の原理(b)DRAM メモリセルと記憶の原理.

4-2 MRAM 開発の動向

現在、国内では MRAM の研究、特に TMR 素子を用いた MRAM 研究は、東芝が材料研究を行っているものの、実際にメモリを作る研究は行われていない。しかし外国、特にアメリカでの MRAM 研究の進展が気になる場所であり、新機能素子研究開発協会を中心にスピントロニクス技術専門委員会を結成して調査研究を約1年間行ってきた。また、昨年11月の3M会議(San Jose)の後、Motorola (Phoenix) および IBM (Yorktown Heights) を技術専門委員4人と訪問し、両者の MRAM 取り組みの様子を伺ってきた。更に、この帰国直後、来日中の Parkin 氏 (IBM Almaden 研究所) の TMR に関する3回の講演会におつきあいをした。これらをベースにアメリカでの MRAM の取り組みの様子(私の印象)を紹介する。

まず両社とも非常に熱心に MRAM に取り組んでいる。技術的レベルでなく、取り組む姿勢で日本との温度差は一体どこからきているのか? 明確な点は研究者が半導体出身とかジョセフソン関係の経験者とかであり、磁性材料または磁性薄膜を長年研究してきた人達でないという点である。例えば IBM では TMR の材料または基礎物理を行なってきた Almaden の Parkin らのグループから微細加工ができる Yorktown Heights の Gallagher のグループに主流が移っている。具体的には今まで1インチターゲットで西海岸の Almaden で作製した TMR 膜を東に運び、Yorktown Heights で加工していたが、これからは Yorktown Heights で接合の作製、加工、評価を一貫して行えるよう、8インチターゲット6ヶを有するスパッタ装置および8インチウエハの TMR の自動測定装置の立ち上げを行っていた。このことは Motorola も同様で、訪問の際、相手をしてくれた6人の研究者はいずれもが磁性材料の出身者でなく他の分野であったり、ボスの Goronkin 氏は半導体屋である。最初の技術的援助がどこからあったかは明確ではないが、Almaden の Parkin 氏の影響は大きかったようである。現在の TMR の実力は IBM のそれに急接近している印象を受けた。

3M 会議では 1 kbit の MRAM に関して IBM の招待講演があった。共同研究者が38名という点では聴衆をあっと言わせたが詳細は2000年2月の国際固体回路会議 (ISSCC) で報告するという点で新しいことは何も分からなかった。その後 ISSCC

の会議に出席した日本人の話では2月の報告はかなり注目されたようである。IBM, Motorola いずれも向こう2年間は相当の勢いで MRAM に取り組むことが予想される。と言うのは両社とも過去3年間、国防省 (DARPA) からの援助により MRAM を開発すべく研究してきたわけである。衛星用の MRAM は昨年の7月に Honeywell が GMR を用いた容量 1 Mbit, アクセスタイム 100 ns のものを開発して落札したが、IBM, Motorola は DARPA から更に2年間の資金的援助が受けられることが決まっている。両社とも Load map および MRAM の需要分野を示しているわけではないが、2年間で基礎的な研究を展開し、更に5年くらいをメドに民生機器の分野での MRAM の製品化を描いているように取れる。

その他の情報としては Hewlett-Packard が目下 1 Mbit を Siemens が5~6年後をメドに 64 Mbit の TMR を用いた MRAM を開発すべく研究を展望していると聞く。いずれにしても MRAM に関してはこれからの数年が勝負であり、目が離せない。

参考文献

- [1] T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.*, **139** (1995) L231.
- [2] S. Yuasa, T. Sato, H. Yamamori, Y. Suzuki, K. Ando and T. Katayama, digest of the 23rd annual conference on magnetism, (1999) p.269. / *J. Magn. Soc. Jpn.*, (2000), inpress.
- [3] S. Takahashi and S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 1758.
- [4] Y. Fukumoto, H. Kubota, Y. Ando and T. Miyazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L932.
- [5] K. Nakajima, Y. Saito, S. Nakamura and K. Inomata, digest of the 23rd annual conference on magnetism, (1999) p.282. / *J. Magn. Soc. Jpn.*, (2000), inpress.