

NiFeのナノ接点における新磁気抵抗効果

Magnetoresistance Effect Based on New Principle in NiFe Nanocontacts

大沢 裕一

■ OHSAWA Yuichi

記録面密度が1平方インチ当たりT (テラ: 10^{12}) ビット時代のハードディスク装置 (HDD) に使用する再生ヘッドを実現するため、高感度再生基盤技術を開発した。独自のナノ (10^{-9}) 接点作製法と磁気抵抗 (MR) 評価法を開発することで、新原理 (磁性体ナノ接点におけるMR効果) に基づく平面型テスト素子作製及びMR評価が可能となり、約140%の大きなMR比を室温で確認することに成功した。

この基盤技術が実ヘッドに適用された場合、現在、次世代再生ヘッド技術として開発されている酸化マグネシウム (MgO) バリアを用いたトンネルMR素子に比べ、データ転送及び省エネで優れたパフォーマンスを発揮することが可能となる。

Toshiba has developed a fundamental technology for read heads for hard disk drives having a recording density in the terabit per square inch (Tbpsi) class. The new technology is based on the magnetoresistance (MR) phenomenon through magnetic nanocontacts manufactured by our original fabrication process and our original MR measurement methods. An MR ratio as large as approximately 140% was successfully achieved by a test element formed in sputtered nickel-iron (NiFe) thin film at room temperature.

By applying this technology to actual read heads, it will be possible to improve the data transfer rate and power consumption compared with tunneling MR heads using a magnesium oxide (MgO) barrier, which are currently being developed as next-generation read heads.

1 まえがき

記録面密度が1平方インチ当たりTビット時代のHDDでは、データの幅は50 nm以下と予想され、それに対応して微小化された再生素子には、高い再生感度すなわち高磁気抵抗 (MR) 変化だけでなく、高速応答性すなわち低抵抗の両立が要求される。この要求に対し、いくつかのMR原理に基づいた素子によるアプローチが試みられている。

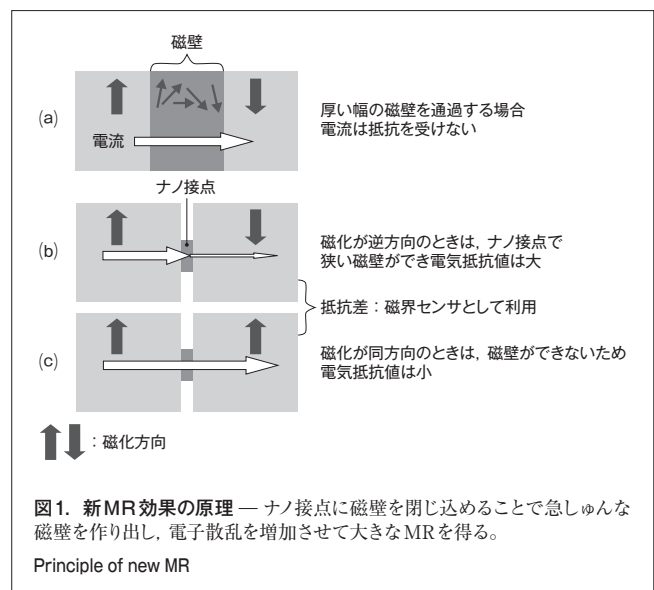
次世代の代表的素子として、巨大MR比が特徴である酸化マグネシウム (MgO) バリアを用いたトンネルMR (TMR) 素子⁽¹⁾や、低抵抗が特徴であるCPP (Current Perpendicular to Plane) -スピンバルブ (SV) 素子^{(2), (3)}によるアプローチが報告されている。

いずれの素子も素子全面に電流を流すタイプの素子であり、TMR素子では低抵抗化、CPP-SV素子では高MR化が課題とされている。ここで述べるナノ接点を用いるMR素子は、TMR素子同様に大きなMRを原理的に持ち、更に通電の場所やサイズが制御されるため、素子抵抗は素子サイズ (記録密度) の影響を受けにくい構造となる。しかし、実用化に必須の薄膜やドライプロセスを用いての巨大MRの発現は確認されていない。

2 ナノ接点におけるMR

2.1 原理

基本となる抵抗変化の原理を図1に示す。互いに逆方向を向いた磁区どうしが接触する境界には、磁壁と呼ばれる磁化方向を少しずつ変化させる領域が存在する。通常、この磁壁は幅が数十ナノメートルあり、その電気抵抗は無視できるほど小さいが、数ナノメートルほどに狭くなると電気抵抗は大きくなっ

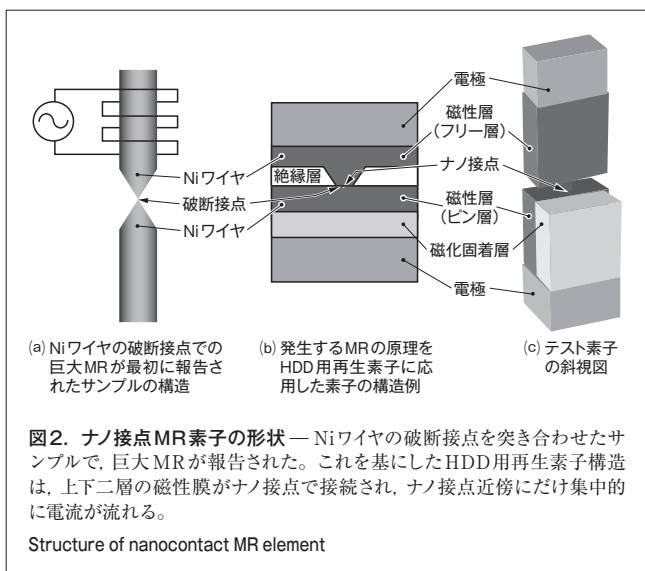


てくる。磁区どうしが接触する部分をナノ接点状に絞り込むことで、より狭い磁壁が形成され、大きな電気抵抗が発生する。

この状態で、信号磁界の向きにより、ナノ接点の両側の磁化を同方向にすると抵抗値は小さくなり、逆方向にすると抵抗値は大きくなり、磁界センサとして利用することができる。

2.2 ナノ接点MRヘッドの利点

ナノ接点を用いた巨大MR現象は、**図2(a)**に示すようなニッケル (Ni) ワイヤの破断したナノ接点を突き合わせて行った実験において、室温で約280 %の巨大MR比とともに初めて確認された⁽⁴⁾。このナノ接点で発生する巨大MRの原理を、HDD用再生素子に応用した場合の構造を**図2(b)**に示す。ナノ接点を上下から磁性層で挟んだ構造となり、ナノ接点近傍にだけ電流が集中的に流れる。そのため、ナノ接点の数、面積及び場所を制御することで、素子面積 (記録密度) に依存しにくい低素子抵抗と高MR比の両立が、更には省エネ化が可能になる。



2.3 実験上の課題

最初の巨大MRの報告⁽⁴⁾の後、物理的及び工学的魅力から多くのバルク材を用いたナノ接点に関する実験報告が行われた。しかし、その多くの実験結果について、磁性体電極のひずみによる機械的変化が抵抗変化をもたらしたとの指摘がなされ⁽⁵⁾、最初の報告⁽⁴⁾を含め、巨大MR現象の真偽についてはいまだ議論のなかにある。更に、デバイス化に必須である磁性薄膜やドライプロセスで形成されたナノ接点においては、巨大MRの報告例はなかった。その理由は、薄膜のためナノ接点の断面積変化⁽⁶⁾が起こりにくいことのほかに、薄膜における実験方法の困難さが挙げられる。

図2(b)に示すヘッドに適用するCPP構造素子を作製する場合、もっとも大きな問題はナノ接点の作製方法である。ナノサイズの接点ホールを、上下の磁性層 (フリー層とピン層) 界面

で他材料の混入や酸化を防ぎながら形成するのは、先端的な電子線描画装置やエッチング装置を用いても容易ではない。そこで、まずナノ接点によるMRの存在を、磁性薄膜を用いて信頼性高く調べることを目的として、**図2(c)**に示すような平面形状のテスト素子を作製した。

ここでは、ナノ接点での磁壁によるMR効果を“新MR効果”と呼び、以下にその原理の実証とポテンシャルの確認実験について述べる。

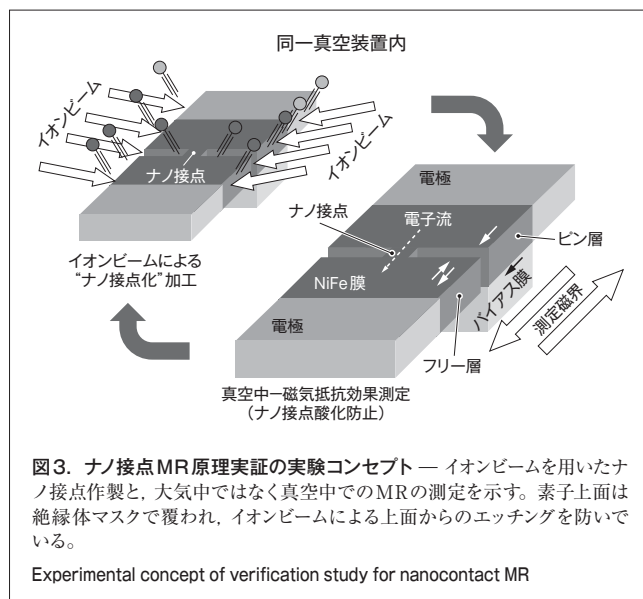
3 新MR効果の原理実証

3.1 実験コンセプト

平面構造でも目標とする接点サイズはリソグラフィ^(注1)限界を超えたナノサイズであり、更にナノ接点は常に大気にさらされる構造となる。そのため、磁性金属でできているナノ接点は、酸化の影響を強く受け電気抵抗が不安定となる⁽⁶⁾。そこで、通常のパターニング法である程度狭くしたナノ接点に対して、横方向から照射したイオンビームで極限まで幅を狭め、そのテスト素子を大気に出すことなく一貫して真空中でMR測定を行う実験方法を考案した⁽⁷⁾。

3.2 実験方法

考案した実験方法を**図3**に示す。磁性体電極として20 nm厚のNiFe (ニッケル鉄: パーマロイ) 膜を用い、片側にはCoPt (コバルト プラチナ) バイアス膜を積層して、ピン層を反転しにくくしている。外部から磁界を加えることでフリー層側の磁化方向が反転し、ピン層側と逆方向になってナノ接点に磁壁が導入され、反対に同方向になるとナノ接点に磁壁が消去される。磁性体電極にはAu (金) 電極が取り付けられており、4



(注1) 感光性物質を部分的に露光することで、パターンを生成する技術。

端子法による抵抗測定が行われる。

収束イオンビーム装置^(注2)を用いてテスト素子のナノ接点幅を約100 nmまで加工した後、テスト素子をイオンミリング装置^(注3)の中に入れる。次に、図3に示すように水平方向から低エネルギーのイオンビームを照射して接点幅を徐々に縮小する。なお、接点の酸化を防ぐため、同装置内にソレノイドコイルを設置して、真空中でMRの測定を行えるようにした。イオンビームによる接点サイズ縮小とMR測定を繰り返し、接点縮小に伴うMR比の変化を観察した。

3.3 新MR効果の実証

MR比の接点サイズ依存性を図4に示す⁽⁸⁾。接点サイズが小さくなるにつれMR比が大きくなり、約10 nm²において10～20%と、一般的なNiFe材料固有のMR比(約2%)よりもはるかに大きな値が得られていることがわかる。このNiFe膜におけるMR比の接点サイズ依存の傾向は、ほかのグループによる研究とも一致し、接点サイズ縮小に伴い狭くなった磁壁内で電子が強く散乱されるという新MR効果を裏づけるものである。また、磁界を使わず、ナノ接点近傍だけの磁壁を電流で移動させる実験でも、MR測定と同じ抵抗変化を確認している⁽⁹⁾。これは、磁性体電極の磁化方向を動かさないため、ナノ接点の機械的形変による抵抗変化⁽⁵⁾ではないことを示している。

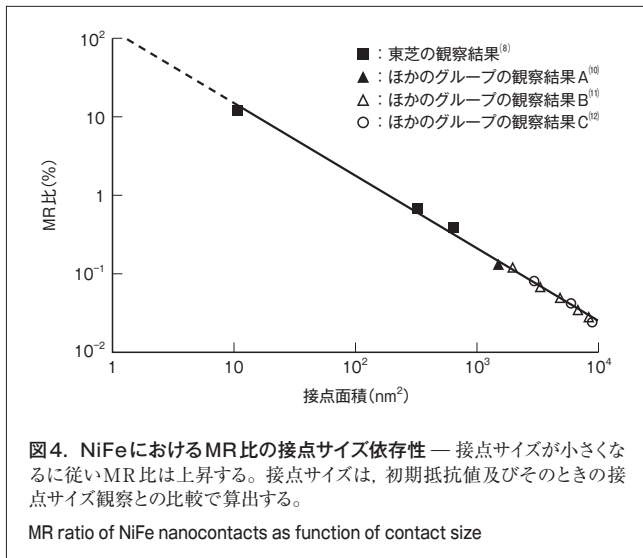


図4. NiFeにおけるMR比の接点サイズ依存性 — 接点サイズが小さくなるに従いMR比は上昇する。接点サイズは、初期抵抗値及びそのときの接点サイズ観察との比較で算出する。

MR ratio of NiFe nanocontacts as function of contact size

以上のように、接点の逐次縮小及び真空中でのMR測定技術を開発したことで、磁性体ナノ接点を安定にMR評価ができるようになった⁽⁷⁾。また、今回の結果は、実用化に必須の磁性薄膜のドライプロセスだけで形成した試料を用いて、磁壁による比較的大きなMR比が得られることを世界に先駆け実証

(注2) 細く絞られたGa(ガリウム)などの金属イオンを数十kVに加速してサンプルに照射し、マスクレスに微細エッチング加工を行う装置。

(注3) 数百Vに加速されたAr(アルゴン)などのイオンを数～数十cm径の広さで照射してエッチングを行う装置。

したものである⁽⁹⁾。

ところで、図4は、接点サイズを1 nm²程度に絞ることで100%クラスの巨大なMR比が得られることを示唆している。しかし、接点サイズ1 nm²の加工は、水平イオンミリングでは加工ひずみなどにより物理的な接点破壊が発生してしまった。そこで、次章で述べる方法により100%を超えるMRを実現することを試みた。

4 新MR効果のポテンシャル確認実験

4.1 素子構造と作製プロセス

1 nm²クラスの接点はイオンミリングなどで“削る”方法では作製困難と判断し、“成長”させて形成する方法を試みた。絶縁体基板上で金属膜は、一般的に薄膜初期成長過程では島状、更に編み目状へと成長することが知られている。この金属島どうしの接合点を、ボトムアップ形成したナノ接点として利用することを試みた。

素子構造を図5に示す。接点部分は、ナノ接点を内包した極薄NiFe磁性膜で形成されており、図2(c)や図3に記載したテスト素子の接点部分を極薄磁性膜に替えた構造である。前章の原理実証実験では、水平方向からのイオンビーム照射で接点幅を縮小したが、このテスト素子では、接点近傍のNiFe磁性膜を除去した部分にイオンビームスパッタで極薄NiFe膜を形成した。最後にMR測定とイオンビーム処理を繰り返しながら、最適なナノ接点状態を作り出した。この実験も一貫してイオンミリング装置内の真空中で作製と評価を行った。

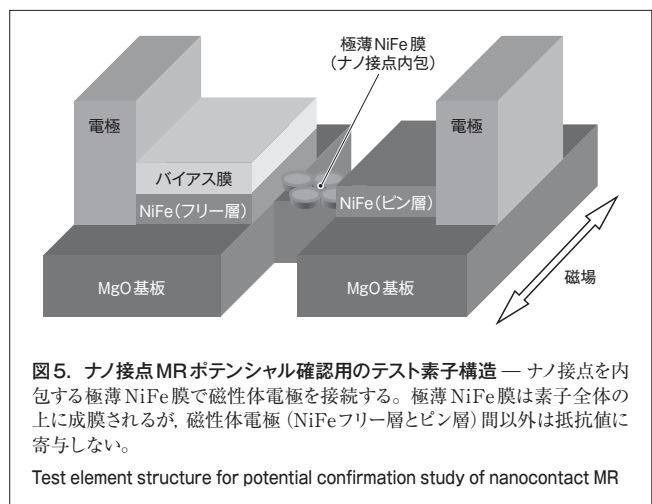
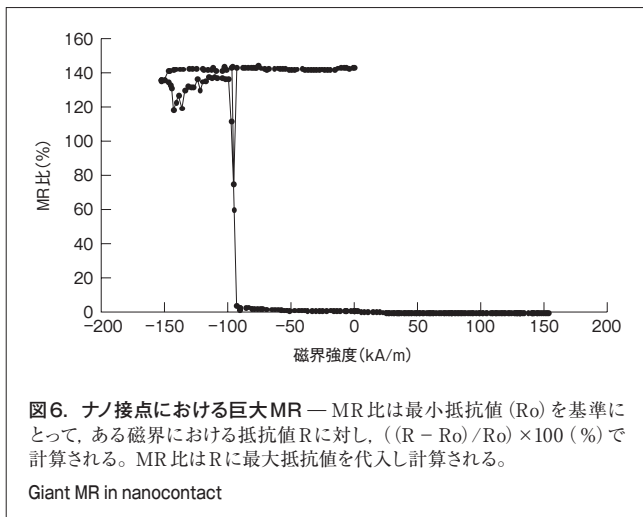


図5. ナノ接点MRポテンシャル確認用のテスト素子構造 — ナノ接点を内包する極薄NiFe膜で磁性体電極を接続する。極薄NiFe膜は素子全体の上に成膜されるが、磁性体電極(NiFeフリー層とピン層)間以外は抵抗値に寄与しない。

Test element structure for potential confirmation study of nanocontact MR

4.2 ナノ接点による巨大MRの確認

磁界-抵抗曲線を図6に示す。磁界を負方向に増加させると、高抵抗を維持しつつ約-100 kA/mで抵抗ディップを示し、磁界減少のときに-100 kA/mで低抵抗に移り、安定化した。MR比は約140%を示した。形成膜厚と島状から網の目



状までの成長状態により 1 nm^2 程度の接点面積であると想定され、約 140 % の MR 比は、図 4 で示唆される MR 比の接点面積依存性の関係に一致する。

なお、この実験においても磁界を加えず電流だけで同じ抵抗変化を観測しており、磁界を印加することで磁性体電極全体がひずんで、ナノ接点の断面積が変化してしまうという影響⁵⁾を除いている。このスパッタ形成薄膜によるサンプルで 100 % を超える MR 比を、電流駆動での抵抗変化の裏づけとともに世界で初めて^(注4) 観測し、ナノ接点を用いた新 MR 効果素子の可能性を確認したものである。

5 実素子への展開

磁性体接点における MR 比のポテンシャルを確認したが、実素子を図 2(b) に示すような CPP 構造に展開する必要がある。 1 nm^2 程度の穴を電子線描画及びエッチングプロセスを用いて形成するトップダウンの手法は極めて困難であると思われる。

一方、ボトムアップの手法として、酸化プロセスを利用してナノ接点を形成する方法が報告されている³⁾。今後、1平方インチ当たり T ビット級の HDD に適合する、比較的大きな MR 比と低抵抗を両立する $1 \sim$ 数 nm^2 サイズの接点の CPP 構造素子を実現するためには、このようなボトムアップの方法が有用であると考えられる。

6 あとがき

NiFe を用いた平面形状のナノ接点 MR 用テスト素子を作製して、ナノ接点による新 MR 効果の実験実証及びそのポテンシャル確認を行った。ナノ接点サイズを小さくするにつれ MR 比は指数関数的に上昇し、 1 nm^2 程度まで縮小することで約

(注4) 2007年3月、第54回応用物理学関係連合講演会で発表。

140 % に及ぶ大きな MR 比が得られることがわかった。1平方インチ当たり T ビット級の記録密度を持つ HDD 用ヘッドを実用化するうえで必要な高感度再生ヘッドの基盤技術として、ナノ接点による新 MR 効果素子のポテンシャル確認を行うことができた。

この成果は、実用化を目指して開発中の新 MR 効果素子³⁾の大きな可能性を示している。

謝 辞

この研究は、文部科学省 科学技術試験研究費 (IT プログラム RR2002) の支援を受けて行われた。研究遂行にあたりご指導いただいた関係各位に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Yuasa, S., et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. *Nature Materials*, **3**, 2004, p.868 - 871.
- (2) 福澤英明, ほか. 電流狭窄型ナノオキシドレイヤーを用いた CPP スピンバルブ膜. *東芝レビュー*, **61**, 2, 2006, p.19 - 22.
- (3) Fuke, H. N., et al. Magnetoresistance of FeCo nanocontacts with CPP-SV structure. *IEEE Trans. Magn.* **43**, 6, 2007, p.2848 - 2850.
- (4) Garcia, N., et al. Magnetoresistance in excess of 200% in Ballistic Ni Nanocontacts at Room Temperature and 100 Oe. *Phys. Rev. Lett.* **82**, 14, 1999, p.2923 - 2926.
- (5) Egelhoff, W. F., et al. Artifacts in ballistic magnetoresistance measurements. *J. Appl. Phys.* **95**, 11, 2004, p.7554 - 7559.
- (6) Chung, S. H., et al. Universal scaling of magnetoconductance in magnetic nanocontacts. *J. Appl. Phys.* **93**, 10, 2003, p.7939 - 7944.
- (7) Ohsawa, Y. Fabrication and in-situ magnetoresistance measurement of a Ni point-contact in planar configuration. *J. Magn. Magn. Mater.* **287**, 2005, p.491 - 495.
- (8) Ohsawa, Y. Magnetoresistance characterization of NiFe films with a planar point contact. *IEEE Trans. Magn.* **43**, 6, 2007, p.3007 - 3009.
- (9) Ohsawa, Y. Magnetoresistance and Current-driven Resistance Change Measurements in NiFe Film with a Nanoconstriction. *IEEE Trans. Magn.* **42**, 10, 2006, p.2615 - 2618.
- (10) Lepadatu, S., et al. Current induced magnetic switching in $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, Ni, Fe, and Co wires. *Journal of Applied Physics*, **97**, 2005, p.10C711-1 - 3.
- (11) Lepadatu, S., et al. Direct observation of domain wall scattering in patterned NiFe and Ni nanowires by current-voltage measurements. *Physical Review Letters*, **92**, 12, 2004, p.127201-1 - 3.
- (12) Lepadatu, S., et al. Discontinuous resistance change and domain wall scattering in patterned NiFe wires with a nanoconstriction. *IEEE*



大沢 裕一 OHSAWA Yuichi

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー主任研究員。次世代磁気記録・再生技術の開発に従事。日本応用磁気学会、応用物理学会、電子情報通信学会会員。Storage Materials and Devices Lab.