

高記録密度HDDの再生を可能にする ナノコンタクトMR

Nanocontact Magnetoresistive Read Element for Hard Disk Drives with High Areal Density

高岸 雅幸

■ TAKAGISHI Masayuki

近年の急激な情報量の増加によって、HDD（ハードディスクドライブ）の大記憶容量化や高記録密度化への要求が高まっており、HDDの記録・再生用磁気ヘッドにも高記録密度に対応した性能が必要になっている。このため再生ヘッドには、高抵抗のトンネル電流を用いた現行再生素子のTMR（Tunneling Magnetoresistive：トンネル型磁気抵抗）素子に代わる、低抵抗で感度の高い新素子が求められている。

東芝は、低抵抗でかつ高感度が期待できる、ナノコンタクトMR素子の開発を進めている。今回、イオンアシスト酸化とポストアニールという当社独自の二つのキープロセスにより、抵抗が現行TMR素子の1/4と低抵抗で抵抗変化率^(注1)が30%という高感度を達成した。これは記録密度にして2.5 T（テラ： 10^{12} ）ビット/in²で記録されたHDDを読み取ることができる感度に相当する。今後の課題として、熱処理温度の低減と更なる高感度化に取り組んでいる。

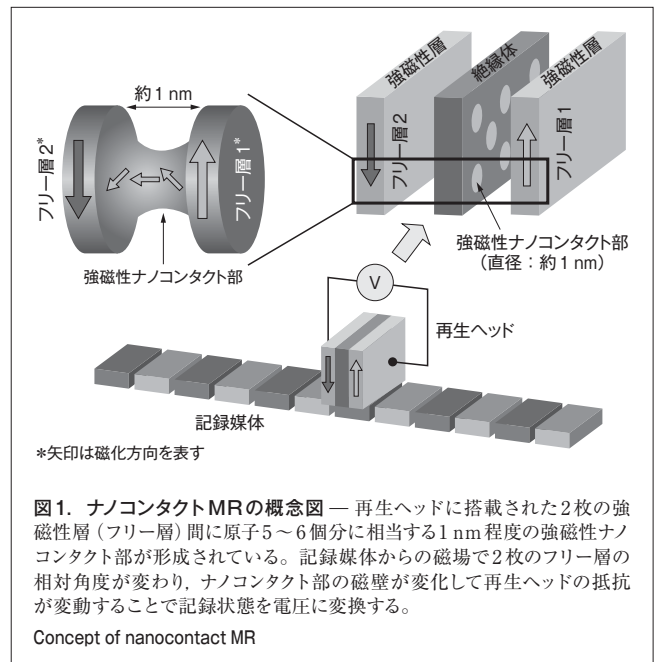
With the rapid increase in the volume of information in recent years, not only hard disk drives (HDDs) with higher capacity and higher areal density but also higher performance read and write heads for HDDs with higher areal density are required. Under these circumstances, read head elements with lower resistance and higher sensitivity have been investigated as a replacement for current tunneling magnetoresistive (TMR) readers having high resistance.

Toshiba has been developing a nanocontact magnetoresistive (MR) read element that has potential for low resistance and high sensitivity. We have now developed proprietary key processes for this technology including an ion-assisted oxidation process and a post-annealing process. High sensitivity is thereby realized, with an MR ratio of 30% and one-quarter of the resistance of current TMR readers having high resistance, achieving a level of performance applicable to an areal density of 2.5 Tbit/in².

1 まえがき

近年のインターネットやクラウドコンピューティングの普及などによる急激な情報量の増加によって、HDDの大記憶容量化や高記録密度化への要求が高まっており、HDDの記録・再生用磁気ヘッドにも高記録密度に対応した性能が必要になっている。HDDの記録密度は1 Tビット/in²レベルに近づいてきており、記録過程での問題点が顕在化している。その対策として、記録媒体の磁化を反転しやすくするため、レーザスポットで記録時に昇温を行う熱アシスト記録や高周波磁界発生素子とともに記録を行う高周波アシスト記録の研究開発が活気を帯びている。しかし、その先の2 Tビット/in²以上の記録密度では、再生過程で生じる問題が顕著になると考えられている⁽¹⁾。

現在、HDD用再生ヘッドとしてはトンネル電流を用いたTMR素子が用いられており、酸化マグネシウム（MgO）をトンネルバリアとして、抵抗変化率100%の大きな感度を誇ってい



(注1) 外部から再生素子に磁場を印加した場合の抵抗変化量と元の抵抗の比率。

る。しかし記録密度が2 Tビット/in²以上になると、素子の微細化に伴って抵抗が増大し、SN比（信号と雑音の比）が劣化

する。そこでMgOを用いたTMR素子に代わる、低抵抗で高感度の新たな素子が検討されている。広く研究されているメタル伝導の巨大磁気抵抗効果 (GMR) 素子は、低抵抗にするのは容易である一方、大きな感度を持つには至っていない。

東芝は、100%以上の抵抗変化率が期待できるナノコンタクトMRの研究開発を進めてきた⁽²⁾。このMR素子は上下強磁性層が超微細領域でオーミック接合した構造を持つ(図1)。

ここでは、2.5 Tビット/in²クラスに到達する高感度及び低抵抗の両立を世界で初めて^(注2)実現したナノコンタクトMR素子の開発について述べる。

2 ナノコンタクトMRのコンセプト

磁性体細線に電流が流れている状態で、細線内に磁壁と呼ばれる急激に磁化変化する部位があった場合、磁壁の有無で電気抵抗が変化する。この磁壁が原子程度の大きさであったとき、特に大きな抵抗変化が現れる。ナノコンタクトMRはこのような現象を利用していると考えており、この原理によれば100%以上の大きな抵抗変化率の実現が期待できる。

実験的には300%以上の抵抗変化率が観測されているが⁽²⁾、実用化のための研究開発はほとんど行われていなかった。それは、100%程度の抵抗変化が得られるような十分に小さな磁壁を作るためには、大きな磁性体間を1 nmほどの小さな磁性体の細線でコンタクトさせる必要があり、安定してこのような構造を作成することが困難と考えられていたためである。これを磁壁の閉込めと呼んでいるが、当社は図1に示すような、2枚の磁性体の間に1 nm程度のナノコンタクト部を安定して閉じ込める方法を開発した。

3 ナノコンタクトMRの製造方法

当社は、数nmの微細な銅のコンタクト部を酸化物中に作成するイオンアシスト酸化技術で電流狭窄(きょうさく)型GMRを開発していた経緯がある。この技術をリファインすることで1 nm程度の鉄コバルト (Fe-Co) 合金のナノコンタクト部を安定して作成することに成功した。

イオンアシスト酸化は、金属アルミニウム (Al) を酸化してアルミナ (AlO_x) にする際、アルゴンイオンを照射してAlにエネルギーを与えながら酸化する技術である。Alが凝集して酸化され、酸化物の隙間にAlの下地にある物質(この場合Fe-Co合金)のナノコンタクト部が生成される。しかし、この技術だけではナノコンタクト部に酸化物などの不純物が残存し、十分な感度は実現できなかった。そこで酸化を完全に終了させず

(注2) 2011年8月, TMRC (The Magnetic Recording Conference) 国際会議で発表。

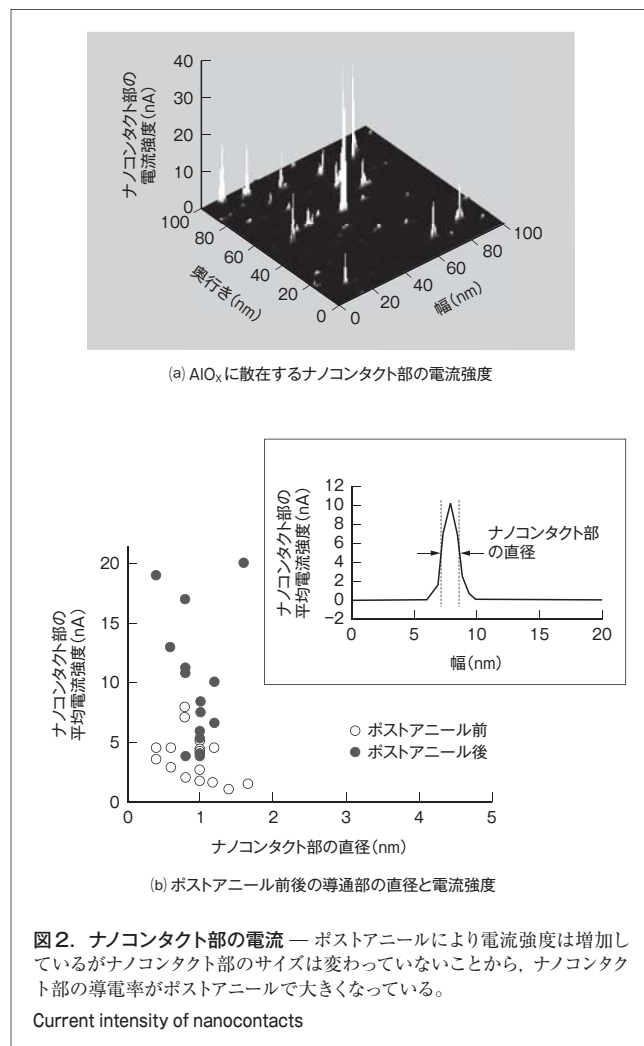


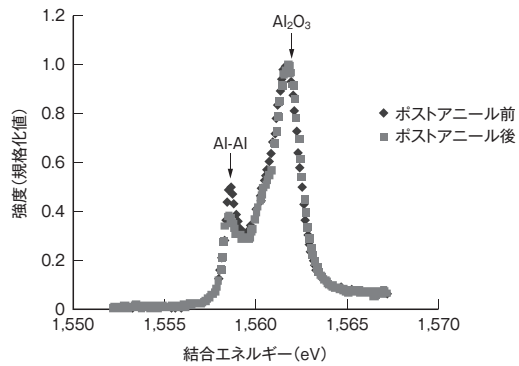
図2. ナノコンタクト部の電流 — ポストアニールにより電流強度は増加しているがナノコンタクト部のサイズは変わっていないことから、ナノコンタクト部の導電率がポストアニールで大きくなっている。
Current intensity of nanocontacts

に、Alを残存させ、後に420℃の熱処理(ポストアニール)を行うことで、ナノコンタクト部を高純度化した。

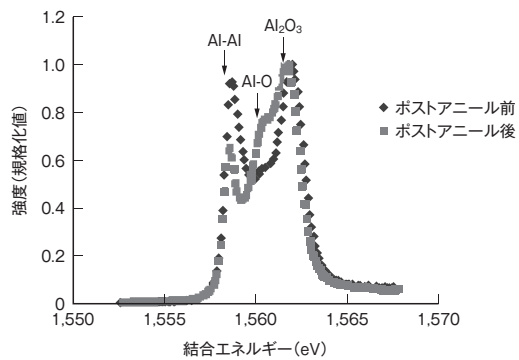
AlO_xに散在するナノコンタクト部の電流強度を図2(a)に、ポストアニール前後の導通部の直径と電流強度を図2(b)に示す。これは東北大学 佐橋研究室の協力を得てコンダクティブAFM(原子間力顕微鏡)という方法によって観測した結果である。ポストアニールにより電流強度は増加しているが導電部であるナノコンタクト部のサイズは変わっていないことから、ナノコンタクト部の導電率がポストアニールで大きくなっていることがわかる。

また、ポストアニール前後でのAlとその酸化物の割合を、SPRING-8と呼ばれる施設の高強度X線光電子分光分析によって測定した。残存Alが少ない低感度のサンプルの結果を図3(a)に、Alを多く残した高感度サンプルの結果を図3(b)に示す。残存Alを多く残したサンプルは、ポストアニール後にAlの酸化が増加しており、共存しているCoとFeが還元されていることがわかる。

これらから、Alを残存させることでナノコンタクト部が還元



(a) 低感度サンプル(抵抗変化率: 10%)



(b) 高感度サンプル(抵抗変化率: 20%)

図3. ポストアニール前後のAlとその酸化物の割合 — 残存Alを多く残したサンプルは、ポストアニール後にAlの酸化が増加しており、共存しているCoとFeが還元されている。

Ratio of aluminum to aluminum oxide before and after annealing

されて高純度になっていると考えられるが、結果的にナノコンタクト部はCo, Fe, 及びAlで形成される。この混入したAlも抵抗変化量を増大させる効果があることが、メタルGMR素子の研究からわかっている^{(3), (4)}。

4 ナノコンタクトMRの性能

このようにして得られたナノコンタクトMR実験素子の面積抵抗 RA と抵抗変化率 $MR\ ratio$ の関係を図4に示す。 RA はMR素子の抵抗を表す指標で、 $1\ \mu\text{m}^2$ 当たりの抵抗値である。ナノコンタクトMRのような電流が微細部分に集中しているMR素子を電流狭窄型MRと呼ぶことがあるが、電流狭窄型MRの RA と $MR\ ratio$ の関係は解析的な式(1)で表すことができる⁽⁵⁾。

$$MR\ ratio = \frac{MR_{\text{potential}}}{1 + (RA_{\text{para}}/RA_{\text{NC}}) \cdot \eta} \quad (1)$$

ここで、 $MR_{\text{potential}}$ はナノコンタクト部の $MR\ ratio$ のポテンシャル、 RA_{para} は寄生抵抗、 RA_{NC} はナノコンタクト部の RA 、

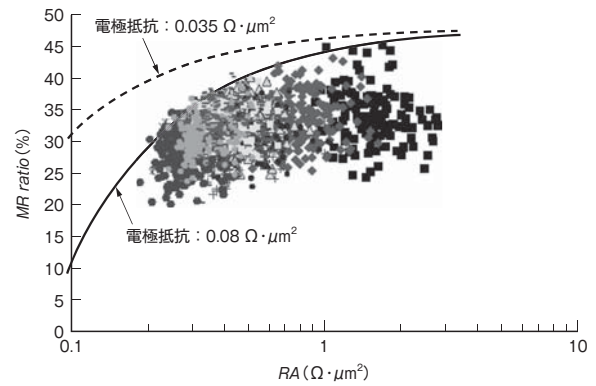


図4. ナノコンタクトMR実験素子の RA と $MR\ ratio$ の関係 — 曲線は式(1)の上限フィッティング結果で、電極抵抗は $0.08\ \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ 程度が実験結果とよく一致する。

Relationship between resistance area (RA) and $MR\ ratio$ of nanocontact MR experimental element

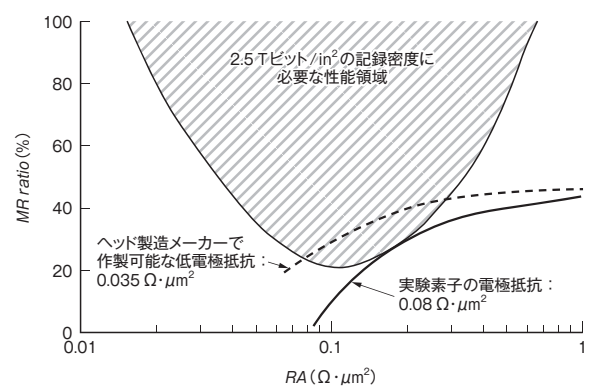


図5. 2.5 Tビット/in²の記録密度に必要な性能領域 — 実験素子のフィッティングラインも併せて示したが、ヘッド製造メーカーで作製可能な電極抵抗を用いて素子を作製すれば再生ヘッドの仕様を満足する曲線内で使用できるポテンシャルがある。

Range of performance required for areal density of 2.5 Tbit/in²

η は狭窄率である。

式(1)には電極抵抗が含まれており、この式でフィッティングした結果、図4に示すように実験結果は電極抵抗として $0.08\ \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ の RA を用いた場合によく一致する。これは、当社がメタルGMRの実験素子で見積もった電極抵抗ともよく一致している。更に、ヘッド製造メーカーで作製可能な $0.035\ \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ の電極抵抗を用いて素子を作製した場合の RA と $MR\ ratio$ の予想ラインも同様に示したが、いずれも RA が高抵抗の極限で、 $MR\ ratio$ のポテンシャルとして48%もの高い値を示している。また RA が $0.2\ \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ の低抵抗でも、用いる電極抵抗によっては30~40%程度の比較的高い $MR\ ratio$ を示す。

図4に示した式(1)による2本の曲線を、記録密度が2.5 Tビット/in²の再生ヘッド仕様と重ねて図5に示す。この仕様

は、ヘッドノイズ、媒体ノイズ、及び回路ノイズを考慮し、更にLLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程式という微細磁性体の運動方程式を元にシミュレーションした結果から算出している⁽¹⁾。図中の斜線部が2.5 Tビット/in²の記録密度で使用できるRAとMR ratioを示しており、今回作成したナノコンタクトMR実験素子は2.5 Tビット/in²の記録密度で使用できるポテンシャルを持つことがわかる。

5 今後の展望

ナノコンタクトMRが高記録密度再生素子のポテンシャルを持つことを実証したが、実際の再生ヘッドの材料として使用するためには420℃の熱処理温度は高すぎることがわかっていく。熱処理温度低減の対処法として、現在はポストアニールを成膜後に行っているが、素子作成中、あるいは酸化処理を行うときに熱処理することで活性化エネルギーを下げる方法などを試そうとしている。このため、新たな成膜装置を立ち上げている。

また、図2の電流分布を見ると、まだ純度が上がっていないナノコンタクト部も多く存在するのがわかる。これらのナノコンタクト部の純度を確保することで、いっそうの高感度化が可能と考えている。

6 あとがき

高記録密度のHDD再生ヘッドの実現に向けて、当社の強みである独自のプロセス技術を用いて低抵抗で高感度のナノコンタクトMR素子を作製し、記録密度として2.5 Tビット/in²の再生ヘッドのポテンシャルがあることを実験によって検証した。

今後も、当社の強みである材料開発とシミュレーション技術を用いて、激動するストレージ市場においてHDDの記録・再生技術を向上させ、HDDの記録密度向上に貢献していく。

この研究の一部は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高密度ナノビット磁気記録技術の開発 (グリーンITプロジェクト)」の支援により実施した。

文献

- (1) Takagishi, M. et al. Magnetoresistance Ratio and Resistance Area Design of CPP-MR Film for 2-5 Tb/in² Read Sensors. IEEE Trans. Magn. **46**, 2010, p.2086-2089.
- (2) Chopra, H.D.; Hua, S.Z. Ballistic magnetoresistance over 3000% in Ni nanocontacts at room temperature. Phys. Rev. B. **66**, 2002, p.020403-1-020403-3.
- (3) Sakuraba, Y. et al. Mechanism of large magnetoresistance in Co₂MnSi/Ag/Co₂MnSi devices with current perpendicular to the plane. Phys. Rev. B. **82**, 2010, p.094444-1-094444-5.
- (4) Maat, S. et al. Magnetotransport properties and spin-torque effects in current perpendicular to the plane spin valves with Co-Fe-Al magnetic layers. J. Appl. Phys. **101**, 2007, p.093905-1-093905-6.



高岸 雅幸 TAKAGISHI Masayuki, Ph.D.
研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー研究主幹、
工博。ハードディスクドライブのヘッド及び媒体の研究・開発
に従事。日本磁気学会会員。
Storage Materials & Devices Lab.