

一般研究課題 生活環境における弱磁界計測用高感度磁気センサーに関する研究
助成研究者 大同工業大学 神保 睦子



生活環境における弱磁界計測用高感度磁気センサーに関する研究

神保 睦子
(大同工業大学)

1. はじめに

高齢化社会の到来に伴って、外出して行方が分からなくなった老人の位置を知るために、身に付けたセンサーにより地磁気を検知して位置を検出する装置が提案されている。また、自家用車におけるカーナビの発達や無人走行システムの構築にも地磁気による位置検出装置が必須である。さらに、情報家電機器が多数存在することによるEMC対策のために微弱な磁界の計測が必要となっている。このような生活環境の中で地磁気程度の弱磁界を感度良く計測できる高感度磁気センサーの開発は重要な課題である。

そこで、超高密度HDD用再生ヘッドとして用いられるようになった巨大磁気抵抗効果(GMR効果)をさらに高感度で地磁気程度の弱磁界に対しても応用できるように感度の向上を目指して研究を行なった。

すなわち、従来のGMR効果は膜面に電流を流す(CIP-GMR)構造であるが、本来、GMRは磁性金属/非磁性金属界面を垂直に横切る伝導電子の界面(界面散乱)あるいは磁性体内(バルク散乱)でのスピン依存散乱が主因である。そのため、膜面垂直方向に電流を流した方(CPP-GMR)がMR比が大きくなることが実験、理論の両面から報告されている^{1)~4)}。しかし、試料の微細化や寄生抵抗を減少させる必要性から、実用的な観点では研究が進められていなかった。また、磁性層端面に薄い鏡面散乱層を挿入すると電子のスピンを保存したまま平均自由行程を増大させることができ、より大きな効果が得られると予想されている。本研究では、磁界感度を向上させるために膜面垂直に電流を流すGMR効果(CPP-GMR)と鏡面散乱効果を検討したので報告する。

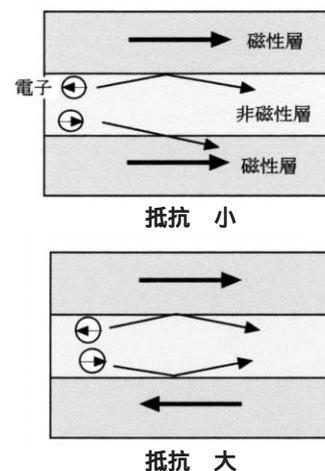


図1 巨大磁気抵抗効果(CIP-GMR)

2. 巨大磁気抵抗効果(GMR効果)

GMR効果は図1に示すように非磁性層を挟む隣り合う磁性層の磁化が、平行と反平行の場合で電気伝導度が異なる現象

で、それは伝導電子のスピンに依存した散乱機構で説明される。そのためGMR効果は、磁化の平行-反平行の遷移で大きな電気抵抗の変化が生じるために主にHDDの高感度再生ヘッドを主眼として開発がなされた。磁化の平行-反平行遷移を実現する方法は種々あり、(a)磁性層と非磁性層を交互に積層した多層膜、(b)磁性層に保磁力の異なる材料を用い、保磁力差により磁化過程の途中で磁化の平行-反平行遷移を起こすもの、そして(c)サンドイッチ膜に片側の磁性層の磁化をピン止めする層として反強磁性層を付加したスピバルブ膜があげられる。これらの膜構造を図2示す。(a)の多層膜は、GMR効果が初めて発見された時の膜構造⁵⁾で、磁性層間の層間相互作用により磁化が平行-反平行遷移を行なう。比較的大きな磁界を印加することにより数10%の電気抵抗の変化率が得られるが、感度はあまり高くない。(b)と(c)は層間の相互作用が弱いため反平行の実現が容易である。なかでも(c)のスピバルブ構造と呼ばれているものは、低磁界でGMRを生じさせるために考えだされた構造で⁶⁾、抵抗変化率が多層膜よりも小さいものの、数Oe程度の低磁界で動作するために感度は高くなる。スピバルブ膜は、図2(c)のように反強磁性層、磁化が自由に動けるフリー層と固定されているピン層からなる。ピン層は反強磁性層からの交換結合により磁化のピン止めが行なわれ、MRカーブは非対称となり、磁化曲線に一方向異方性が見られる。この膜構造がGMRヘッドの基本構造となっている。

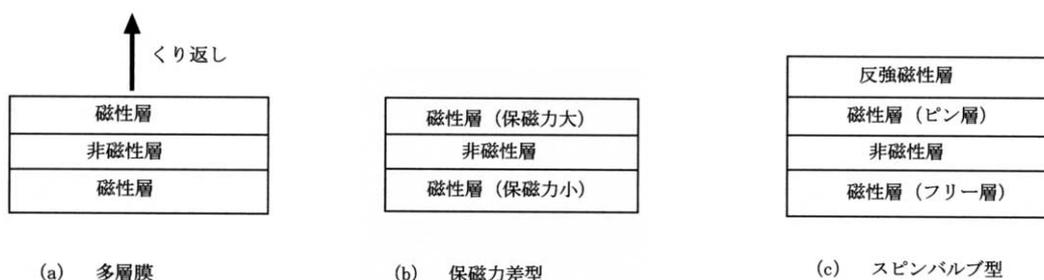


図2 磁化の平行 - 反平行遷移を起こす膜構造

3. 鏡面散乱効果

GMRをデバイスとして応用するためには、アップスピンとダウンスピン電子の平均自由行程の差を大きくすることが出力を増大させるために必須である。それを達成するには、バルク散乱の大きな材料の探索、スピン依存伝導を効率良く実現するための散乱ユニットの配置が考えられる。を達成する手段の一つとして鏡面散乱効果の利用が挙げられる。すなわち図3のように、磁性層、反強磁性層端面に構造制御した鏡面反射層を作製し、拡散散乱で減少しているアップスピンとダウンスピン電子の平均自由行程の差を大きくして効率良くスピン依存伝導を行わせるとGMRの飛躍的な向上が予想される。そこで膜構造を制御し表面ラフネスの小さな極薄酸化層を作れば、

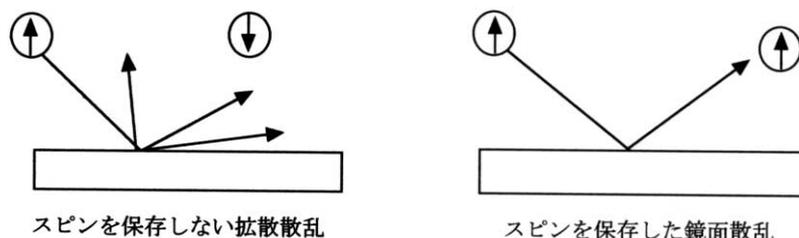


図3 界面での電子散乱

この酸化層によりアップスピン電子を鏡面反射させ平均自由行程を増大させることができる。

試料は図4に示すように、Si/Ta(5nm)/NiFe(2.5nm)/CoFe(1.5nm)/Cu(2.5)/CoFe(2nm)まで作製したあと試料をロードロックチャンバに移動し、酸素圧0.2, 0.5mTorrで時間を変化させてCoFe層の自然酸化を行った。その後、メインチャンバーに戻してCoFe(2nm)/IrMn(7nm)/Ta(3nm)を作製した。到達真空度は8.0Pa以下、Arガス圧は0.3~0.5Paである。製膜時には一軸異方性を付与するために約80 Oeの磁界を印加している。抵抗測定は直流4端子法を用い、MHカーブは振動試料型磁力計(VSM)で測定した。

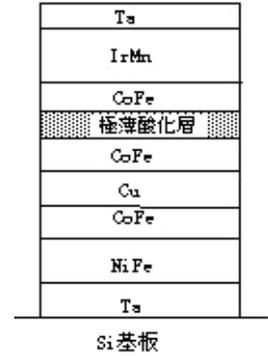


図4 鏡面散乱のための膜構造

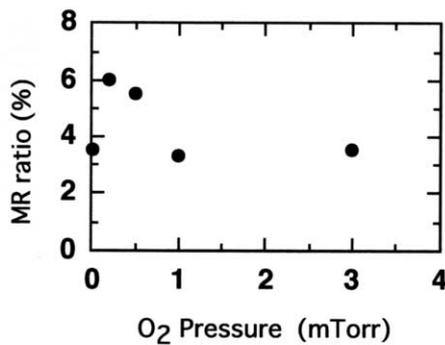


図5 MR比の酸素圧依存性

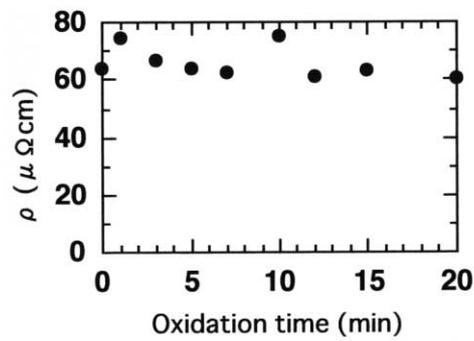


図6 抵抗率の酸化時間依存性

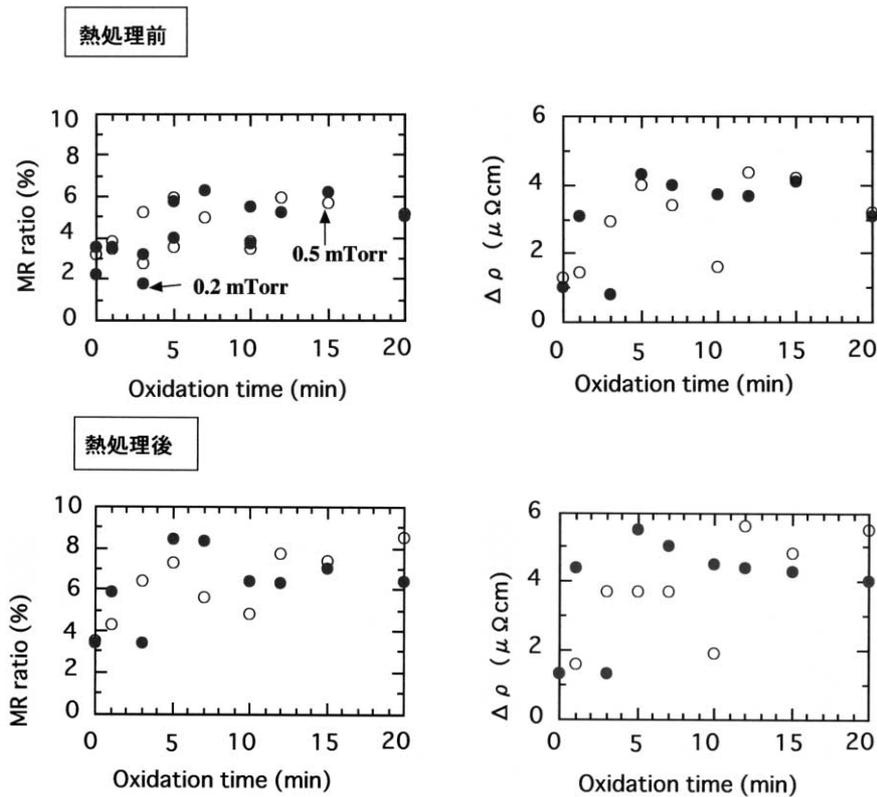


図7 熱処理前後のMR比と の酸化時間依存性

図5は自然酸化の酸素圧に対するCIP-MR比の変化である。(酸化時間はすべて10分)1mTorr以下の低い酸素圧で急激なMR比の増加が見られる。図6は、酸素圧を一定にして酸化時間を変えた時の抵抗率の変化である。酸化時間が短いと抵抗率は増加しているが、5分を過ぎると抵抗率が若干減少する傾向が見られる。これは、均一な酸化層が形成されて伝導電子の平均自由行程が増大したために抵抗率が下がったのではないかと考えられる。次に、図5の結果をもとに、酸素圧を0.2, 0.5mTorrとして酸化時間とMR比をプロットしたのが図7である。値にかなりばらつきがあるが、5分以上の酸化でMR比の大きな増加が見られる。また、酸化時間が長くなるとしだいにMR比が減少していく傾向が見られる。の変化の様子もMR比と同様であるが、酸化時間が長くなるとMR比やが低下するのはCoFe層の過酸化の影響が考えられる。また、熱処理後では、0.2mTorrの方がデータのばらつきが少なく大きなが得られており、均一な極薄酸化層を作製するためには0.2mTorrの方が有効であることが分かる。これらの結果はCoFe層上部での酸化層形成状況と関係があり、今後マイクロな構造との関連を検討しなければならない。図8は(a)は酸化なしの試料のMRループで、(b)は0.2mTorrで10分酸化を行った試料のMRループである。両者ともスピバルブ構造に特有な非対称のMRカーブが得られている。酸化層を挿入した(b)の試料ではMR比の増加が見られ、反強磁性層との交換結合磁界(Hex)は低下していないのが分かる。すなわち今回の条件による極薄酸化層形成では自然酸化によりHexを変化させずにMR比のみを増加(磁界感度の向上)させることが可能であることが分かった。

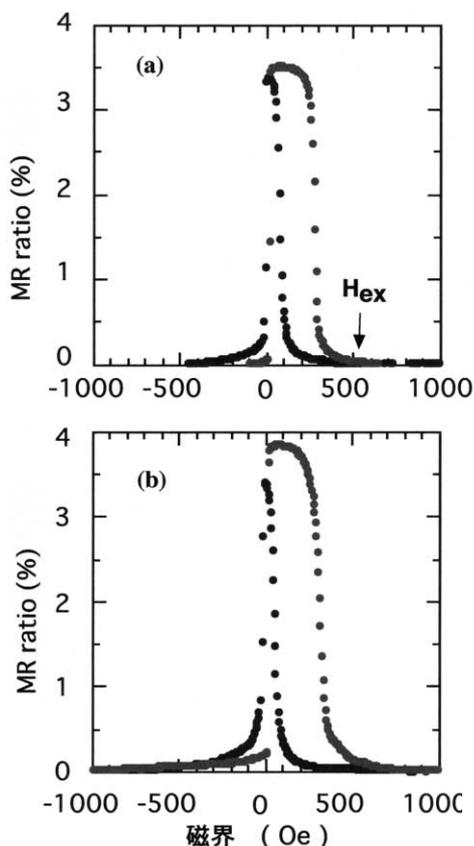


図8 (a)酸化層のない試料と(b)酸化層のある試料のMRカーブ

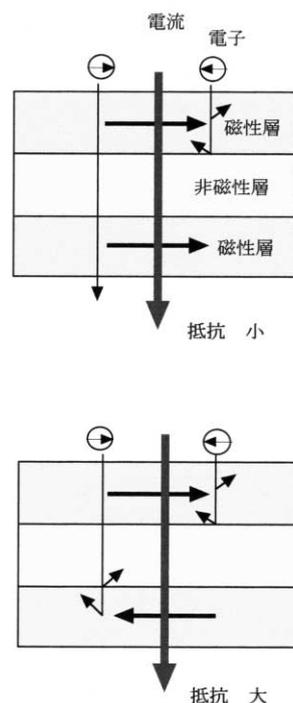


図9 CPP-GMR

4. CPP-GMR

本来、GMRは磁性/非磁性界面を横切る伝導電子のスピンに依存した散乱である。そのため、図9のように膜面垂直方向に電流を流した方がMR比が大きくなることが実験、理論の両面から報告されている。しかし、試料の微細化や寄生抵抗を減少させる必要性から、実用的な観点では研究が進められていなかった。そこで、感度を上げるためにより高いMR比が期待できるCPP (Current Perpendicular to Plane) GMRの検討を行なった。

CPP-GMRの試料はDC / RF マグネトロンスパッタ装置を用いてSi / Cu(30nm) / Ta(5nm) / NiFe(2.5nm) / CoFe(5nm) / Cu(2.5-7nm) / CoFe(2nm) / IrMn(7nm) / Ta(3nm) / SiO₂(50nm) / AlO_x(150nm) / Al(200nm)の膜構成のスピバルブ型を作製した。作製条件は鏡面散乱のところでも述べた条件と同一である。CIP-GMRではCuの厚さを厚くするとMR比の低下が見られるが、スピン拡散長のきくCPP-GMRでは、Cu層をある程度厚くしても抵抗変化はあまり変わらないので、結果を示したCPP-GMRの試料のCu層厚はすべて5nmとした。フリー層はCoFeとNiFeの2層構造で、ピン層とそれぞれのフリー層の厚さを変化させ抵抗の変化率を検討した。作製した試料はフォトリソとイオンミリングで微細加工を行い、GMR膜の大きさは直径約2mmである。GMR膜の上部に20nmのSiO₂層を積層し、その部分にコンタクトホールを作製した。コンタクトホールを作製したマスクの大きさは直径1~4ミクロンで、作製した試料の構造の概略を図10に示す。Cu(50nm)層は下部電極、Al(200nm)層は上部電極である。加工したコンタクトホールはSEMにより観察した。

図11はSEMで観察したコンタクトホールの写真の一例である。これはマスクの大きさが直径2μmを使ったものであるが、マスクの直径とほぼ同じ大きさのホールが空いていることが分かる。今回は電流の広がりが無いとして、素子の大きさをホールの大きさで評価した。

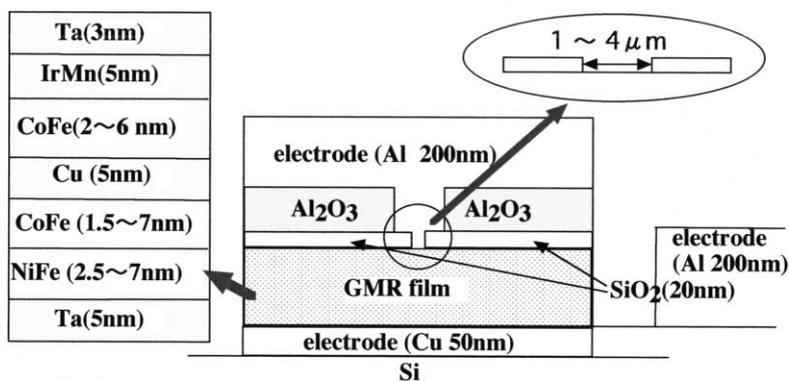


図10 CPP-GMRの膜構造

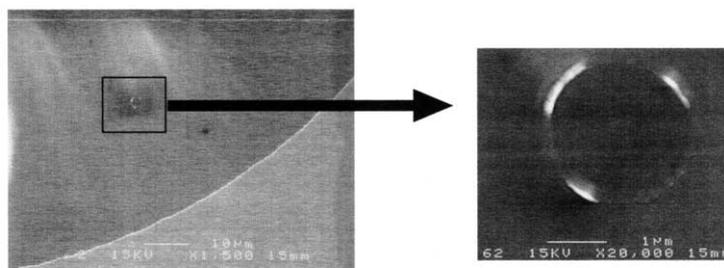
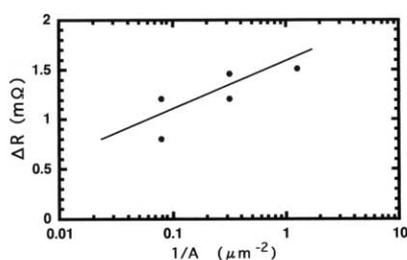


図11 コンタクトホールのSEM写真

図12は素子面積をコンタクトホール大きさとしてプロットした抵抗変化分 ΔR の変化を示した結果である。データに少しばらつきがあるが、ほぼ直線的に変化しており、コンタクトホール大きさの見積もりが少し不明確であるがCPP-GMRの傾向は評価できるものと考えられる。この傾きから求めた $A \cdot R$ は $0.7 \text{ m} \cdot \mu\text{m}^2$ である。

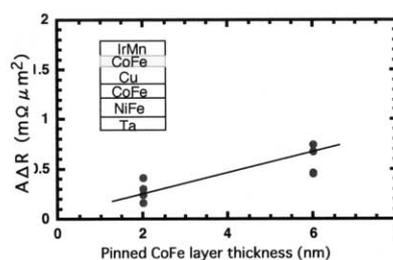
次に各層の厚さを変化させた時の結果を示す。図13はピン層 CoFe の厚さを変えた時の素子面積 (A) と抵抗変化 (ΔR) をかけた $A \cdot R$ である。CoFe 層の厚さを 2 ~ 6nm に厚くすると $A \cdot R$ は 1.5 倍程度に増加しているのがわかる。

図14, 15はフリー層の厚さを変えた結果である。ピン層 CoFe の厚さは 4nm で、GMR 部の他の層厚は図の下に示してある。図14は NiFe 層の厚さを 2.5nm としてフリー CoFe 層を 3.5nm と 5nm に変化させたものである。実験した範囲では CoFe 層を厚くすると ΔR が増加する。図15は CoFe 層の厚さを 5nm として NiFe 層の厚さを変化させたものである。NiFe 層の厚さを厚くしていくと ΔR が増加し、5nm でピークとなって、さらに厚くすると低下しているのが分かる。



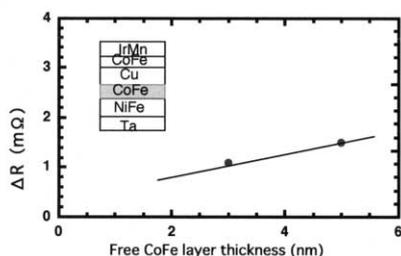
GMR: Ta(5nm)/NiFe(2.5)/CoFe(5)/Cu(5)/CoFe(5)/IrMn(5)/Ta(5)

図12 素子面積と ΔR との関係



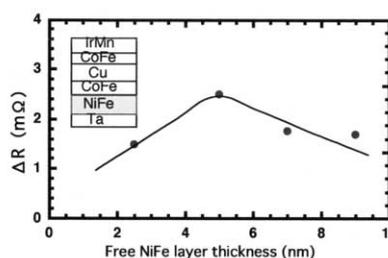
GMR: Ta(5nm)/NiFe(2.5)/CoFe(1.5)/Cu(5)/CoFe(t)/IrMn(5)/Ta(5)

図13 $A \cdot R$ のピン CoFe 層厚依存性



GMR: Ta(5nm)/NiFe(t)/CoFe(5)/Cu(5)/CoFe(4)/IrMn(5)/Ta(5)

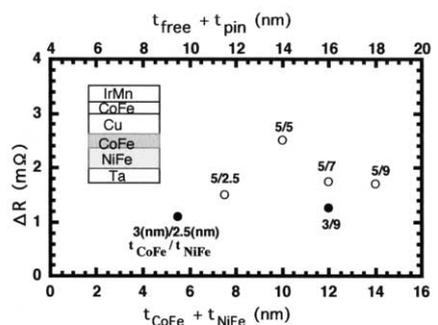
図14 ΔR のフリー CoFe 層厚依存性



GMR: Ta(5nm)/NiFe(2.5)/CoFe(t)/Cu(5)/CoFe(4)/IrMn(5)/Ta(5)

図15 ΔR のフリー NiFe 層厚依存性

最後にフリー層の合計膜厚に対する抵抗変化分 ΔR を図16に示す。フリー層を 5nm として NiFe 層を変化させたもの、フリー層を 3nm として NiFe 層の厚さを変化させたものである。バルクのスピン依存散乱が大きい CoFe 層が厚い方が全体的に大きな ΔR を示しているのがわかる。また、フリー層の全膜厚を見ると 10nm 付近でピークとなっている。ピン層を含めた全磁性層を上



GMR: Ta(5nm)/NiFe(t_{NiFe})/CoFe(t_{CoFe})/Cu(5)/CoFe(4)/IrMn(5)/Ta(5)

図16 ΔR のフリー層厚依存性

ているが、一般にCPP-GMRでは磁性層厚がスピン拡散長と同程度の厚さになると飽和する傾向にあるといわれているので、14nm以降での R の低下または飽和傾向はスピン拡散長の影響ではないかと考えられる。図13, 14の結果からバルク散乱の大きいCoFe層を厚くするとCPP-GMRでは R の増加が顕著であることが分かる。また、NiFe層の厚さに対する R の依存性はCIP-GMRとあまり変わらないが、全フリー層厚に対してはCIP-GMRよりも厚い方が R の増大が見られることが分った。

5. まとめ

以上まとめると、ピン層のCoFe層を自然酸化すると、0.2mTorrの低い酸素圧で交換結合磁界(Hex)を下げることなくMR比の増大すなわち磁界感度の向上が可能であることがわかった。また電流を膜面垂直方向に流すCPP-GMRにおいてピン層のCoFe層を厚くすると、 R の増大が見られた。また、フリー層についてはCoFe層、NiFe層それぞれを厚くすると R が増大したが、バルク散乱が大きいCoFe層を厚くした方がより大きなMR比が得られることがわかった。さらに、MR比はフリー層の全膜厚が約10nmでピークもしくは飽和傾向にみえる。これは全磁性層厚に対するスピン拡散長の影響ではないかと考えられる。このように、CPP-GMRと鏡面散乱効果を用いることで、さらに磁界感度を向上させることが可能であるといえる。

参考文献

- 1) M. A. M. Gijs, S. K. J. Lenczowski and J. B. Giesbers : Phys. Rev. Lett. 70, 3340 (1993).
- 2) M. A. M. Gijs, M. T. Johnson, A. Reineders, P. E. Huisman, R. J. M. van de Veerdonk, S. K. J. Lenczowski and R. M. J. van Gansewinkel : Appl. Phys. Lett. 66, 1839 (1995).
- 3) P. M. Levy, S. Zhang, T. Ono and T. Shinjo : Phys. Rev. B 52, 16049 (1995).
- 4) A. Vedyayev, M. Chshiev, N. Ryzhanova, B. Dieny, C. Cowache and F. Brouers : J. Magn. Magn. Mater. 172, 53 (1997).
- 5) M.N.Baibich, J.M.Broto, A.Fert, F.Nguyen Van Dau, F.Petroff, P.Eitenne, G.Creuzet, A.Friederich and J.Chazelas: Phys. Rev. Lett.61, 2472 (1988).
- 6) B. Dieny, V.S.Sperious, S.Metin, S.S.P.Parkin, B.A. Gurney, P.Baumgart and J.K.Howard: J. Appl. Phys., 69, 4774(1991).