

磁気利用センシングシステムの最新動向

磁気利用スマートセンシングシステム調査専門委員会編

目 次

1. 高性能化のためのデバイス技術		3.3 道路脇設置型 MI センサ内蔵システムによる車両 通行計測	27
1.1 微小・省電力磁気センサ GIGS [®] の 開発と磁気センシング応用	3	4. 周辺技術	
1.2 マイクロ波整流効果を利用したナノスケール 磁性体の磁気ダイナミクスセンシング	7	4.1 超低消費電力ワイヤレスセンサ用エネルギーハーベ スティング技術の動向	31
2. 高感度磁気センサの応用		4.2 振動エネルギーを収穫して駆動・発電するエ ネルギー・ハーベスターの開発	35
2.1 伝送線路型薄膜磁界センサの高感度化と 応用	11		
2.2 電極反応の高感度磁気計測	15		
3. ワイヤレス等の磁気利用センシング技術			
3.1 磁気共振型ワイヤレスガスセンサ	19		
3.2 FeCoV 双安定磁性ワイヤによる回転センサ	23		

磁気利用スマートセンシングシステム調査専門委員会委員

委員長	内山 剛(名古屋大学)	委員	竹村 泰司(横浜国立大学)
幹事	田代 晋久(信州大学)		竹澤 昌晃(九州工業大学)
幹事補佐	松本 守彦(N T T 東日本)		塚田 啓二(岡山大学)
委員	石井 修(山形大学)		西村 一寛(鈴鹿高専)
	糸崎 秀夫(大阪大学)		古川 信男(TDK-EPC 株式会社)
	井上 光輝(豊橋技術科学大学)		増田 純夫(ジェコー(株))
	岡田 一朗(旭化成エレクトロニクス(株))		御子 柴孝(スマートセンサーテクノロジー)
	小林 伸聖(電気磁気材料研究所)		藪上 信(東北学院大学)
	菊池 弘昭(岩手大学)		山口 明啓(慶応義塾大学)
	沢 孝雄(東芝マテリアル)		山寺 秀哉((株)豊田中央研究所)

1 章 高性能化のためのデバイス技術

<1.1> 微小・省電力磁気センサ GIGS[®]の 開発と磁気センシング応用

<1.1.1> はじめに

現代社会生活を支える、電力、自動車、家電、コンピューター、携帯機器など多様な分野・機器において、様々なセンサが用いられており、高度情報化社会の中では、その役割は益々重要になってきている。これらのセンサで、磁気方式を用いたものは、光方式センサに次いで数多く使用されている。磁気センサは信頼性が高く、且つ価格が安いことが特徴で、新しい高感度磁気センサへの要望は根強い。特に小型携帯機器の急速な普及、また省エネルギー化の要求に伴い、小型・省電力磁気センサの必要性が非常に高まっている。

磁気センサ素子としては、半導体ホール素子や異方的磁気抵抗(AMR)素子がある。さらに、高感度マイクロ磁気センサ用として、フラックスゲート(FG)素子、マグネトインピーダンス(MI)素子、巨大磁気抵抗効果(GMR)素子などが注目されている。これらのうち GMR 素子は、用いられる GMR 材料が薄膜材料であるために、マイクロ化に適している。

GMR 材料は、広い意味においては、従来材料である AMR 材料に対して数倍以上の磁気抵抗(MR)比を示す材料であるが、MRの発現メカニズムや材料構造の違いにより幾つかに分類される。代表的な GMR 材料として、スピン依存散乱によって MR が発現する、金属人工格子および金属-金属系ナノグラニューラー材料、またスピン依存トンネル効果(TMR)による、トンネル接合膜および金属-絶縁体系ナノグラニューラー膜^{(1),(2)}があげられる。

我々は、金属-絶縁体系ナノグラニューラー膜の TMR に関して検討を進め、FeCo-MgF 膜において室温で MR 比が 13% 程度の TMR を示すことを見出した^{(3),(4)}。これらの薄膜は、粒径が数ナノメートルの磁性金属微粒子とそれを取り囲む絶縁体セラミックスの粒界からなるグラニューラー構造を有している。電気伝導は、磁性粒子間の絶縁体粒界を伝導電子がトンネルすることによって生じ、伝導電子のコンダクタンスは、磁性微粒子の磁化の向きにより変化する(スピン依存トンネル伝導)。また、伝導電子は、微細粒子による帯電効果の影響も受けるため、これらの膜の TMR は、帯電効果を考慮した高次のスピン依存トンネル伝導^{(5),(6)}によって説明される。

金属-絶縁体系ナノグラニューラー膜は、作製が容易であり、再現性がよく、熱的にも安定であり、大きな電気抵抗率(ρ_0)を有するため省電力化に向いているなど、実用上の優位点を有する。しかし、その TMR は超常磁性的磁化過程に伴って生じるため、弱磁界での TMR 感度が非常に小さく、このままでは磁界センサとして用いることはできない。この問題に対し、我々は、これらの膜の弱磁界での TMR 磁界感度を改善するために GIGS(Granular in Gap Sensor)を考案し

た⁽⁷⁾。GIGS は、軟磁性薄膜材料にサブミクロンの狭いギャップを形成してそのギャップ部分にナノグラニューラー TMR 膜を埋め込んだ構造を有し、弱磁界で大きな TMR 感度を示す。

本稿では、GIGS に用いられている(Fe-Co)-(Mg-F)系膜の TMR について、また、GIGS の構造と特性について解説する。

<1.1.2> (Fe-Co)-(Mg-F)膜の構造と TMR

図 1.1.1 には、32vol.%(Fe_{0.51}Co_{0.49})-(Mg_{0.29}F_{0.71})膜の断面の高分解能透過電子顕微鏡(HRTEM)写真を示す。写真に見られるように、膜は、粒径が 2-3nm の Fe-Co 合金からなるグラニューラー(黒っぽい部分)と、Mg-F 絶縁体(白っぽい部分)からなる、ナノメートルオーダーの微細構造を有することが分かる。さらに、図 1.1.1 に示した膜の電子線回折図形を図 1.1.2 に示す。電子線回折図形では、Fe-Co 合金からのブロードな回折リングおよび MgF₂ 結晶相からのシャープな回折リングが観察される。このように、HRTEM 観察および電子線回折の結果から、FeCo-MgF 膜は、粒径が 2-3nm の微細な Fe-Co 合金グラニューラーと、それを取り囲むように存在する結晶相の Mg-F 絶縁体からなるナノグラニューラー構造を有することが分かる。

図 1.1.3 には、32vol.%(Fe_{0.51}Co_{0.49})-(Mg_{0.29}F_{0.71})膜の磁化曲線を示す。磁化曲線は、保磁力がほとんどゼロの超常磁性的磁化挙動を示す。この膜の ρ_0 は、 $2.4 \times 10^7 \mu \Omega \text{m}$ であり、非常に大きな値を有する。さらに、図 1.1.4 には、同じく 32vol.%(Fe_{0.51}Co_{0.49})-(Mg_{0.29}F_{0.71})膜の MR 曲線を示す。尚、ここでの MR 比は、 $\Delta \rho / \rho_0$ ($\Delta \rho = \rho_H - \rho_0$, ρ_H : 印加磁界 H における電気抵抗率)と定義した。また、図中には図 1.1.3 の結果から求めた $-(M/M_s)^2$ も合わせて示した。

$H=800 \text{ kA/m}$ において、 $\Delta \rho / \rho_0$ が -13.3% の大きな MR 変化を示す。ナノグラニューラー膜について、磁界に対する電気抵抗変化が磁性金属グラニューラーの磁化の相対角の cosine に比例すると仮定し、超常磁性的のように隣り合った磁性金属グラニューラーの磁化方向に相関がない場合、以下の関係式が成り立つことが報告されている⁽⁸⁾。

$$\Delta \rho / \rho_0 \propto -\langle \cos \theta_{ij} \rangle = -\langle \cos^2 \theta_i \rangle = -(M/M_s)^2 \quad (1.1.1)$$

ここで、 θ_{ij} は磁性金属グラニューラー i, j の磁化の相対角、 θ_i は磁性金属グラニューラー i の磁化の磁界に対する角度、 M は試料全体の磁界方向の磁化、また M_s は試料の飽和磁化である。なお、 $\langle \rangle$ は膜中の全磁性金属グラニューラーに対する平均を表す。図 1.1.4 において、MR 曲線と $-(M/M_s)^2$ は対応しており(1.1.1)式が成り立つことが分かる。このことから、これらの膜の磁性金属グラニューラー間の磁化の相互作用は無視でき、MR は、磁化挙動に関係しており、磁性金属グラニューラー間のトンネル伝導に起因していることが分