NiFe膜における電流磁気起電力効果の基礎特性

正員 竹村 泰司 (横国大)

非会員 芝崎 雅則 (横国大)

正員 角野 圭一 (横国大)

Characterization of galvanomagnetic electromotive force effect in NiFe thin films

Yasushi Takemura, Member, Masanori Shibasaki, Non-member, Keiichi Kakuno, Member
(Yokohama National University)

Galvanomagnetic effect in ferromagnetic thin films is widely utilized for magnetoresistive devices. Especially, magnetoresistance (MR) effect attracts much attention in use of the sensors and readout heads. Galvanomagnetic electromotive force (GEMF) effect, which has been called planar Hall effect, is also observed in magnetic films. These two effect are originated from a same phenomenon, where the electromotive force is generated by interactions between conduction electrons and magnetic field. Although the fact, the characteristic of MR and GEMF effects are different. This is because that MR effect is observed along the current direction, whereas that GEMF effect is observed perpendicular to the current. In this paper, MR and GEMF is studied in view point of the differences of their characterization.

キーワード：NiFe薄膜、電流磁気起電力（GEMF）効果、磁気抵抗（MR）効果

1. はじめに

磁性薄膜における電流磁気効果は、磁気抵抗効果（MR）ヘッド^(1,2)やMRセンサ^(3,4)などに応用され、広く研究されている。しかしながら、同じ電流磁気効果である電流磁気起電力効果（古くからplanar Hall効果、pseudo Hall効果⁽⁵⁾などと呼ばれているが、Hall効果とは全く異なる現象であり、筆者らはGalvanomagnetic ElectroMotive Force: GEMF効果との名称を用いている⁽⁶⁾）は、磁気バブルの検出などに用いられていたものの、MR効果に比べて応用例は少ない。MR効果を用いた素子が単純な2端子構造であるのに対して、GEMF効果素子はHall効果素子と同じように4端子が必要ではあるが、筆者らはGEMF効果が、試料抵抗による電圧降下とは独立に観測されることの有用性を検討し、磁性薄膜を用いた能動素子の提案なども行っている⁽⁷⁾。

次項に示したようにこの2つの効果は同一起源により生じるものの、MR効果が電流方向に観測されるのに対して、GEMF効果は電流と磁界のなす平面で電流と垂直方向に観測される効果である（図1参照）。この観測方向の違いは両効果を応用する際に極めて重要な点であり、素子の構造や特性にも影響を与える。本論文では、両効果の特徴を比較しながら、GEMF効果の諸特性に関して報告する。

図1 電流磁気効果（ θ は電流(J)と磁界(B)のなす角度）

Fig. 1. Galvanomagnetic effect

2. MR効果とGEMF効果

<2.1>電流磁気効果の記述 Hall効果などの電流磁気効果の中でも、比較的大きく観測される異方性磁気抵抗効果は強磁性体に特有の現象である。異方性磁気抵抗効果はいわゆる"Two Carrier (Current) Model"⁽⁸⁾によってその現象が定性的に記述でき、電流方向、及びそれと垂直方向の電界成分は、それぞれMR効果、GEMF効果に対応することが明らかになっている⁽⁹⁾。図2に示した薄膜試料においてMR効果、GEMF効果は"Two Carrier Model"を用いた解析により次式に

より記述することができる（通常のHall効果も同時に表されるがここでは省略する）。電流方向、及びそれに垂直方向の試料両端電圧をそれぞれ、 $V_{//}$ 、 $V_{\perp}$ とすると、

$$V_{//} = V_0 + V_{MR} \quad (1)$$

$$V_{\perp} = V_{GEMF} \quad (2)$$

ただし、 V_0 、 V_{MR} 、 V_{GEMF} はそれぞれ、試料抵抗による電圧降下、MR効果による起電力、GEMF効果による起電力である。さらに、印加磁界（H）により試料が飽和磁化している場合は、図2において電流密度ベクトル J の大きさを J 、電流と印加磁界のなす角を θ とすると、

$$V_{MR} = \rho_{MR} \cdot J \cdot L \cdot \cos 2\theta \quad (3)$$

$$V_{GEMF} = \rho_{GEMF} \cdot J \cdot w \cdot \sin 2\theta \quad (4)$$

と表される。ここで ρ_{MR} 、 ρ_{GEMF} はMR効果、GEMF効果を決定する本質的な物理量であり、“two carrier”の導入により生じる項である。 ρ_{MR} 、及び ρ_{GEMF} はキャリア密度、移動度の全く同一の関数で表され、抵抗率（ Ωm ）の次元を有する。また、MR効果、GEMF効果の温度特性やNiFeの組成依存性からも $\rho_{MR} = \rho_{GEMF}$ であることが明らかになっており、 θ 依存性を含め（3）式、及び（4）式が実験的にも正しいことを既に示している⁽⁶⁾。さらに、（3）式、（4）式より、両効果は磁界印加によって起電力が生じるという同一の現象に基づくものであるとの解釈ができることがわかる。

<2・2>両効果の基礎特性 MR効果、GEMF効果の出力特性を考えてみる。実際は印加磁界により試料の磁化方向（図2、式（3）・（4）の θ ）の変化に対応した電圧変化を出力として得るため、ここでは両効果の θ 依存性を考察する。図3にNi_{0.9}Fe_{0.1}薄膜における出力例を示す（試料：L

図2 薄膜試料におけるMR効果とGEMF効果の測定
（試料：L×W、電極：網掛け部分）

Fig. 2. MR effect and GEMF effect in thin film

（10mm）×w（1mm）、電流：5mA、印加磁界：40 Oe）。MR効果（図3-1）は電流方向の効果であるため、（1）式のように出力は必ず試料の抵抗による電圧降下（ $V_0 = IR$ ）にMR効果（ V_{MR} ）が加わる形になる（ここではMR効果とGEMF効果の本質的な違いを議論するために、ブリッジ構成⁽¹⁰⁾などを用いずに単純にMR効果を出力とした場合を考える）。よって、出力の変化量としていわゆるMR比、 $\Delta\rho/\rho$ （これは $2V_{MR}/(V_0 - V_{MR})$ に相当する）が重要になるが、この値はNiFeでは高々5%程度（Ni組成87%、室温において）である。GEMF効果（図3-2）では、試料抵抗による電圧降下 V_0 がないために、変化量は定義できなく、GEMF出力は $0 \rightarrow V_{GEMF}$ の変化となる。

一方、同一試料における出力電圧の絶対値を比較すると、GEMF効果はMR効果に比べ出力が小さく、センサなどには適していないとの意見もある⁽¹¹⁾。これは（3）式、（4）式から、

$$V_{MR} / V_{GEMF} = L / w \quad (5)$$

であり、ストライプ形状（長手方向に電流を流す形状で、 $L > w$ ）の試料においては $V_{MR} > V_{GEMF}$ になることを意味していると思われる。しかし、通常の薄膜試料であればGEMF出力がMRに比べ極端に小さい訳ではない。この試料形状に対する特性は次項で詳細に検討する。

図3 MR効果(3-1)、GEMF効果(3-2)の θ 依存性
Fig. 3. MR(3-1) and GEMF(3-2) effects against θ

3. 電流磁気効果の形状依存性

<3.1>ストライプ形状と出力特性 前項に記述したように、MR効果、GEMF効果とも出力電圧が試料のサイズに依存する。例えば式(5)において $L = w$ の場合、 $V_{MR} = V_{GEMF}$ にすることができる。また、GEMF出力は試料ストライプの幅: w に伴い、 V_{GEMF} を大きくすることが可能である。そこでストライプ形状を変えたときの V_{GEMF} の測定を行った。図4に w/L に対する ρ_{GEMF} の変化を示す(図中: ●印)。本来、 ρ_{GEMF} は試料の形状や膜厚には依存しない値であり、 V_{GEMF} が式(4)のように w に従い単調に増加していれば、 ρ_{GEMF} は一定になるはずである。しかし、図に示したように、 w を大きくすると ρ_{GEMF} が減少することが明らかになった。その原因として試料両端の電極による短絡の効果が考えられる。これは L に対して w が大きくなると GEMF出力端子が電極(GEMF端子方向に短絡している)に近くなり、 V_{GEMF} が減少し、式(4)を満たさなくなるためである。この形状効果は実際の素子応用に関して重要であることから、理論計算モデルを提案し、詳細に考察した。

<3.2>形状効果の理論計算 MR効果、GEMF効果のストライプ形状依存性を理論的に明らかにし、試料形状の最適化に関する考察を行った。本研究で提案した理論計算モデル、「メッシュ回路解析法」(詳細は文献⁽¹²⁾参照)により印加磁界を有効に出力に変換する試料構造に関する考察なども可能であり、磁気記録の高密度化に対応した微小面積からの微弱磁界に対する特性の検討も行うことができる。

図4に示した ρ_{GEMF} の形状効果をメッシュ回路解析法を用いて解析した。図中、実線の理論曲線が実験値を再現できていることがわかる。また、以上の結果よりGEMF効果を用いた素子においては、ストライプ形状が $L/w > 5$ の条件を満たすようにすることで、電極の短絡による出力

図4 GEMF効果の試料形状依存性

Fig. 4. GEMF effect against size effect

減少を防げることができることが明らかになった。

一方、MR効果は電流方向の現象であるため、ここで議論している電極による短絡の影響はなく、図4に示したGEMF効果の様な形状効果は本質的にはない。即ち、MR効果においては、試料の飽和磁化の変化などがない限り、その基本的な特性は L, w によらず出力特性は $\Delta\rho/\rho$ に依存する。

4. 電流磁気効果の安定性

<4.1>電流変化に対する出力特性 MR効果、GEMF効果の本質的な違いは、GEMF効果が磁界印加により生じた起電力を直接観測できるのに対して、MR効果はこの起電力が試料抵抗による電圧降下(式(1)の V_0)に重なって観測されるということである。この違いが電流変化に対する両効果の出力特性に大きく寄与することが明らかになった。

実験は交流印加磁界(信号磁界として $H = H_0 \sin \omega_H t$)に対するMR効果、及びGEMF効果の出力特性を評価した。この信号磁界であるが、図5に示したようにGEMF出力を測定する場合は磁化の向き(M_{GEMF})が容易磁化方向(横軸方向で電流方向と同じ)に対して $\theta = 45^\circ$ 以下になるような範囲の微小信号磁界($H_0 = H_{GEMF}$)を磁化困難方向に印加した。これに対して、MR効果素子では、あらかじめ磁化の向きが $\theta = 45^\circ$ 付近になるような磁界(バイアス磁界: H_B)を磁化困難方向に印加した状態にしておき、その上に信号磁界($H_0 = H_{MR}$)を磁化困難方向に印加した。ここで加える信号磁界の大きさは磁化の向き(M_{MR})が容易磁化方向に対して $\theta < 90^\circ$ になるようにする(この設定はMRヘッドにおけるバイアス磁界と信号磁界に準ずるものである)。

一方、試料電流は、

$$I = I_0 + I_1 \sin \omega_I t \quad (6)$$

とし、 $I_1 \sin \omega_I t$ を直流電流 I_0 に対する変化成分と考え、MR効果、GEMF効果に対して出力電圧を考察した。図6に $I_1/I_0 = 0.015\%$ (a)、 0.15% (b)に対するMR出力(図6-

図5 MR効果、GEMF効果測定の印加磁界

Fig. 5. Induced magnetic field in MR and GEMF measurement

図6 MR効果(6-1)、GEMF効果(6-2)の電流変化と出力特性
(a)は0.015%、(b)は0.15%の電流変化)

Fig. 6. Characterization of MR(6-1) and GEMF(6-2) effects against current change

1)、及びGEMF出力(図6-2)を示す。これらは $\text{Ni}_{0.87}\text{Fe}_{0.13}$ における計算結果例で $\omega_1/\omega_H = 5$ 、 $L:w = 5:1$ とした。また、太線は電流変化のある場合(式(6)のとき)のMR、及びGEMF出力を示し、細線は電流変化のない場合($I = I_0$)の各出力を示す。図からわかるように、GEMF出力は電流変化の影響をほとんど受けず、信号磁界に対応した交流出力が得られている。これに対してMR出力は電流変化の影響が現れ、0.015%の電流変化でも出力特性が大きく変調されることがわかる(図6-1(a))。これらのMR、GEMFに関する諸特性は、実験においても同様な結果が得られた。

<4.2>出力特性の安定性 前項に示したようにMR効果では微小な電流変化に対して出力が大きく影響されることがわかった。(4)式から明らかのように V_{GEMF} は試料電流(密度)に比例するため、電流の変化量が直接、出力の変化となる。すなわち0.015%の電流変化に対して0.015%の出力変化を生じることとなる。一方、MR効果でも(3)式より V_{MR} は V_{GEMF} と同様に電流変化分に相当する変化を示す。しかしながら、MR効果では実際に出力となるのは(1)式の $V_{\parallel}$ であり、 $V_0 + V_{\text{MR}}$ の特性を測定することとなる。図6

に示した計算結果では磁化方向(θ)を 45° 付近で交流磁界印加により微小に振動($\pm 1.3^\circ$)させているが、この様な状態で試料電流を0.015%変化させた場合を考えると、 V_0 の変化量は信号磁界により変調を受けた V_{MR} よりも大きくなり、図6-1(a)に示したように、MR出力が電流変化で波をうった様な結果になる。

以上のように、定性的な考察ではあるが、GEMF効果の出力特性が電流変化に対して安定であることが明らかとなった。温度変化などに対しても同様にGEMF出力の安定性が期待できることから、今後GEMF効果の素子応用を積極的に検討していきたい。

なお、MR効果の素子応用に関して、ブリッジ構成や差動構成の導入など⁽¹⁰⁾により出力の直流成分のオフセットやノイズ対策、温度特性向上等が行われている。前述のように本論文ではMR効果とGEMF効果の本質的な違いに起因した諸特性の比較を目的としたが、GEMF効果を用いた素子ではブリッジなどの構成なしでも第3章・第4章に述べたような諸特性を得ることができる。

5. 結論

電流磁気起電力(GEMF)効果について、その基礎特性を考察した。GEMF効果はMR効果とともに磁界印加により起電力が生じるという同一の現象であるが、その観測方向が電流方向(MR効果)、電流と垂直方向(GEMF効果)と異なる。このことが出力特性を特徴づけ、GEMF効果では、広く応用されているMR効果とは異なる有用な基礎特性が得られることを示した。

(平成6年3月15日受付、同6年5月25日再受付)

文 献

- (1) R. D. Hunt: IEEE Trans. Magn. MAG-7, 150 (1971)
- (2) 山田一彦: 日本応用磁気学会誌 16, 636 (1992)
- (3) D. A. Thompson, L. T. Romankiw and F. Maydas: IEEE Trans. Magn. MAG-11, 1039 (1975)
- (4) 川井哲郎・相良武彦・諸野脇幸昌・田中彰: 日本応用磁気学会誌 16, 643 (1992)
- (5) J. P. Jan: "Solid State Physics vol. 5", Academic Press, 17 (1957)
- (6) K. Kakuno and Y. Takemura: J. Mag. Mag. Mat., 印刷中 (1994)
- (7) 山川薫・山田努・竹村泰司・角野圭一: 電気学会研究会資料 MAG-93-131, 35 (1993)
- (8) Kittel: "Quantum Theory of Solids", John Wiley & Sons, 241 (1967)
- (9) K. Kakuno: Jpn. J. Appl. Phys. 33, 1334 (1994)
- (10) センサハンドブック、培風館 305 (1986)
- (11) P. Ciureanu: "Thin Films Resistive Sensors", Institute of Physics Publishing, 265 (1992)

(12) M. Shibasaki, Y. Takemura, T. Yamada and K. Kakuno:
to be presented in Int. Conf. Magn. (1994)

芝崎 雅則

(非会員) 1992年横浜国立大学工学部
電子情報工学科卒業。1994年同大学大学院
修士課程(電子情報工学専攻)修了。
現在、富士写真フイルム株式会社。

竹村 泰司

(正 員) 1988年東京工業大学工学部
電子物理工学科卒業。1993年同大学大学院
博士課程(電気電子工学専攻)修了。
現在、横浜国立大学工学部電子情報工学科
助手。主に半導体物性、磁性体物性の研究
に従事。工学博士。

角野 圭一

(正 員) 1962年横浜国立大学工学部
電気工学科卒業。横浜国立大学工学部電気
工学科助手、講師、助教授を経て、1983年
同教授。現在同大学工学部電子情報工学科
教授。主として磁性工学の研究に従事。
工学博士。