有限要素法を用いたフラックスガイド型半導体磁気抵抗素子の解析

Analysis of a Nonmagnetic Semiconductor in a Magnetoresistive Sensor with Flux-guide-type using Finite Element Method

高山裕樹・小峰啓史・杉田龍二・村野井徹夫・長谷川靖洋*

茨城大学工学部, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 (〒316-8511)

*埼玉大学大学院理工学研究科, 埼玉県さいたま市桜区下大久保 225 (〒338-8570)

H. Takayama, T. Komine, R. Sugita, T. Muranoi, and Y. Hasegawa*

Dept. of Media and Telecomm. Eng., Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi, Ibaraki, 316-8511, Japan

*Graduate School of Science and Technology, Saitama University, 225 Shimookubo, Sakura, Saitama, 338-8570, Japan

We investigate the magnetoresistance of a magnetoresistive element consisting of a nonmagnetic semiconductor, four electrodes, and a metallic shunt, with varying locations of the voltage electrodes. The optimum location of the voltage electrodes is estimated from MR ratios calculated by using the finite element method. The MR ratio of 6.9%, which was obtained at an applied magnetic field of 0.005 T for an MR element with asymmetrical voltage electrodes separated by a distance of 25 nm, is higher than that for the MR element with symmetrical electrodes. In order to improve the MR ratio at a low applied field, a flux-guide-type MR element is proposed in this study. An MR ratio of 124% at an applied field of 0.005 T was obtained for a flux-guide-type element with asymmetrical electrodes.

Key words: magnetoresistive sensor, semiconductor, flux-guide-type

1. はじめに

HDD の高記録密度化に伴い、再生感度の高いヘッドの開発が急務である。S. A. Solin らは半導体の磁気抵抗効果を利用した EMR (Extraordinary magnetoresistance) 素子を提案した¹⁾。彼らは、提案した EMR 素子において 0.05 T の磁場で 250% の磁気抵抗比を得たと報告している^{2,3)}。しかし、最適な電極配置についての詳細な議論はされておらず、また、低磁場での抵抗変化率が低いという問題がある。低磁場での特性改善には、フラックスガイドが有効であると期待でき、これまでも磁性体とのハイブリッドについての報告がされている⁴⁾が、詳細には議論されていない。本研究では、EMR 素子の最適な電極配置について議論するとともに、低磁場での再生感度を向上させるため、磁性体を組み合わせたフラックスガイド型 MR 素子を提案し、その特性を数値解析により検討した。

2. 計算方法

2.1 半導体の磁気抵抗素子

半導体中のキャリアは磁場 $\mathbf{B}$ によりローレンツ力を受ける。

このとき、半導体中の電位分布 ϕ は電流密度 $\mathbf{J}$ を用いて、(1) 式のように表すことができる。

$$-\nabla\phi = \rho\mathbf{J} + R_H\mathbf{B} \times \mathbf{J} \equiv \underline{\rho}(\mathbf{B})\mathbf{J} \quad (1)$$

ここで、 ρ は電気抵抗率、 R_H はホール係数、 $\underline{\rho}$ は電気抵抗率テンソルである。磁場 $\mathbf{B}$ が z 成分のみ、つまり $\mathbf{B} = (0, 0, B)$ であるとき、テンソル $\underline{\rho}$ は(2)式のように表される。

$$\underline{\rho}(\mathbf{B}) = \begin{pmatrix} \rho & -R_H B & 0 \\ R_H B & \rho & 0 \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix} \quad (2)$$

電流の湧き出しが 0 であることを用いれば、(1)式は

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\underline{\rho}^{-1}(\mathbf{B})\nabla\phi) = 0 \quad (3)$$

となる。(3)式を適当な境界条件のもとで解けば、電位分布がわかる。

本研究では、半導体部に高い移動度を持つ InSb、電極とシャントには電気抵抗率の小さい Au を想定した。数値計算で用いた材料の特性を、Table 1 に示す。ホール係数 R_H の値は、InSb の移動度 $4.0 \text{ m}^2/\text{Vs}$ 、キャリア密度 $2.11 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ から算出した値であり、高移動度な半導体を用いれば実現可能な値である。Au のホール係数は $10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$ 程度であるが、本研究では $0 \text{ m}^3/\text{C}$ として扱った。また、実際の素子では InSb-Au 接合においてショットキー障壁の可能性があるが、本計算においてはオーミック接合が形成されていると仮定した。

Table 1 Material parameters used in the calculations.

Material	ρ [Ωm]	R_H [m^3/C]
InSb	7.35×10^{-5}	2.96×10^{-4}
Au	2.21×10^{-8}	0

Fig. 1 にフラックスガイド MR 素子とハードディスク媒体との位置関係を示す。Solín らが提案した MR 素子では、半導体の片側の側面には金属電極 (Shunt) が付与されており、他方の側面には電流端子、電圧端子が配置されている。本提案では、さらに素子の上下部にフラックスガイドを付与した。

抵抗を評価するため端子 1-4 間に定常電流 I_{14} を流し、端子 2-3 間の電圧を V_{23} とする。このとき、抵抗 R を

$$R = \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (4)$$

により定義する。磁場 B を印加したときの抵抗 $R(B)$ を同様に評価し、磁気抵抗比 $\Delta R/R(0)$ は、

$$\frac{\Delta R}{R(0)} = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \quad (5)$$

(5)式は Solin らの論文の定義式と異なり、(6)式のように、

$$\frac{\Delta R}{R_{\min}} = \frac{R(B) - R_{\min}}{R_{\min}} \quad (6)$$

と定義されている。ここで、 $R_{\min}$ は抵抗の最小値である。本研究では、GMR ヘッドなどの再生ヘッドと比較するため、(5)式の定義式を用いた。

Fig. 1 Schematic representation of an EMR read head with magnetic flux guides.

Fig. 2 には、EMR 素子の半導体部における電流分布の模式図を示した。(a)は磁場があるとき、(b)は磁場がないときである。半導体にシャントを付与することで、磁場がないときにはほとんどの電流がシャントを通過するが、磁場があるときには Fig. 2(b)のように電流経路が変化し、半導体部に流れる電流が増加する。その結果、 V_{23} で得られる電圧が増加し、磁気抵抗が得られる。また、シャントが付与されていない場合、磁気抵抗はほとんど見られない。

Fig. 2 The current distributions in elements (a) with and (b) without an applied field (top view of Fig. 1).

2.2 磁気抵抗比の電極配置依存性

Fig. 3 に本研究で検討した電極配置を示す。(a)、(b)ともに半導体は $200 \text{ nm} \times 10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$ 、シャントは $200 \text{ nm} \times 90 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$ とし、電圧端子間の距離を変え、最適な電極配置について検討した。

両端の電流端子を固定して、電圧端子を中心線に対して対称に配置したものが(a)であり、非対称に配置したものが(b)である。

非対称配置のとき、一方の電圧端子（電極 2）は中心線上にあり、電極 3 は電極 2 と 4 の間に配置されるものとする。(a)の電圧端子間を d_{sym} 、(b)の電圧端子間を d_{asym} とし、距離を変化させて、それぞれの磁気抵抗比を計算した。

Fig. 3 MR elements with (a) symmetrical and (b) asymmetrical electrodes. The dimensions of the MR element used in this study are also shown.

2.3 フラックスガイド型 MR 素子

フラックスガイド間の磁場分布の解析には、三次元有限要素法を用いた。Fig. 4 は本研究で用いた計算領域と材料の配置例を示している。一様に印加した磁場 H に対して、EMR 素子部での有効磁場 H_{eff} を計算した。

Fig. 4 Schematic illustration of calculation model for analysis of magnetic field around EMR element.

Fig. 5 には、フラックスガイド型 MR 素子の模式図を示す。低磁場での特性改善のため、最適なフラックスガイドの形状についても検討した。形状については、Table 2 に示す 3 つの形状 (Type A, B, C) を仮定して、半導体部に発生する磁場を有限要素法により解析した。フラックスガイドとして用いる磁

性体には $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ を想定し、その透磁率を 10^4 、飽和磁化を 2.26 T とした。そして、フラックスガイドの結果をもとに、フラックスガイド型 MR 素子の磁気抵抗比について検討した。

Fig. 5 Schematic representation of an MR element with magnetic flux guides. The dimensions of the top and bottom flux guides are indicated in this figure.

Table 2 Dimensions of the flux guides used in this study.

	Magnetic flux guide (nm)			
	Top			Bottom
	L_t	W_t	H_t	H_b
Type A	200	10	10	10
Type B	200	10	100	100
Type C	200	100	400	100

3. 計算結果

3.1 EMR 素子の電流分布

Fig. 6 は、磁場があるときとないときの EMR 素子部における電流密度分布を示している。Fig. 6 中の断面 A, B において、全体の電流量 I に対する半導体部の電流量を計算すると、 $B=0 \text{ T}$ のとき、0.08% であるのに対して、 $B=2 \text{ T}$ のときには 2.7% となる。つまり、磁場の印加によって、約 30 倍も電流が増加するために大きな磁気抵抗比が得られると理解できる。

Fig. 6 The current distributions were showed by arrows in elements (a) with and (b) without an applied field.

Fig. 6 の左側には、電極付近の電流密度分布を示す。これを見ると、電流経路が曲げられていることが分かり、電圧電極の配置により磁気抵抗比が変化することが期待できる。

3.2 磁気抵抗比の電極配置依存性

Fig. 7 はフラックスガイドのない MR 素子において、電圧電極配置を変えたときの磁場 0.05 T における磁気抵抗比を示している。(a) は電極が対称なとき、(b) は非対称なときである。対称な電極配置において、電極間距離 d_{sym} が 45 nm 離れているときに磁気抵抗比が最大となり、55% の磁気抵抗比が得られた。一方、電極を非対称に配置したときには、電極間距離 d_{asym} が 25 nm 離れているときに、158% の磁気抵抗比が得られた。この結果から、EMR 素子は高い磁気抵抗比を得る最適な電極配置が存在し、本計算の素子では、電極を非対称、電極間 25 nm に配置したときに高い磁気抵抗比が得られることがわかった。この磁気抵抗比の結果は、Solin らの結果¹⁾とほぼ一致した。

ここで扱った EMR 素子は抵抗変化率が大きいものの、電流端子間の抵抗は数 $\text{k}\Omega$ であり、GMR の素子抵抗と比べ、3 桁も大きいので、今後ノイズの影響を検討する必要がある。

(a)

(b)

Fig. 7 MR ratio in an MR element as a function of the distance between the (a) symmetrical and (b) asymmetrical electrodes. A magnetic field of 0.05 T was applied.

Fig. 8 は、電圧電極が対称なとき、非対称なときの MR 素子における磁気抵抗比の磁場依存性を示している。それぞれの電極配置は Fig. 7 で得られた最適値とした。電圧電極が対称なとき 0.005 T の磁場で 0.5%、非対称なとき 0.005 T で 6.9% の磁気抵抗比を得た。低磁場においては、従来の GMR ヘッドなど

に比べて MR 比が小さいため、この素子を再生ヘッドとして用いるためには低磁場側での特性改善が必要である。

Fig. 8 MR ratios of elements with symmetrical and asymmetrical electrodes as a function of the applied field.

3.3 フラックスガイド型 MR 素子

Fig. 9 は、磁性体の形状が Table 2 の Type C のときのギャップ中心部における磁場分布を示している。Type A, B の比較では、 H_0 を大きくしたことで反磁界の影響が小さくなり、磁場を増加させることができた。また、Type C については、上部磁性体を下部磁性体に比べて大きくすることにより、より多くの磁束が集まり、磁場を増加できることが分かった。また、Fig. 9 のピークの部分に半導体部があるので、下部磁性体の大きさは半導体部と同等の大きさにすればよいことが分かる。

Fig. 10 には印加磁場に対して、Type A~C のギャップ中心部で得られる有効磁場を示した。印加磁場に対して有効磁場は比例関係にあり、Type C のように上部磁性体を $200 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 400 \text{ nm}$ 、下部磁性体を $200 \text{ nm} \times 10 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ とすることで、磁場を 7.8 倍まで強められることが分かった。

Fig. 9 Schematic of field distribution between flux guides of Type C at a field of 0.005 T.

Fig. 11 は、フラックスガイドのある MR 素子と、ない素子での磁気抵抗比の磁場依存性を表している。フラックスガイド MR 素子は、磁場を 7.8 倍に強めた Type C の場合である。また、電極配置は 3.2 で検討した非対称配置とし、電極間距離 d_{asym} は 25 nm とした。この結果からフラックスガイド型 MR 素子では、 0.005 T の低磁場で 124% の磁気抵抗比が得られることがわかった。

Fig. 10 Effective magnetic field between magnetic flux guides for an applied field.

Fig. 11 MR ratios of elements with and without magnetic flux guides.

4. まとめ

本研究では、EMR 素子の電圧電極の最適配置とフラックスガイド型 MR 素子の磁気抵抗比について検討した。

EMR 素子の磁気抵抗比は電圧電極の配置に依存することが分かり、本研究で設定した素子の形状の場合、電極が非対称で 25 nm 離れているときに最も高い磁気抵抗比を得た。

低磁場での特性改善のため、フラックスガイド型 MR 素子についても検討した。フラックスガイドを付与することで、磁気抵抗比を向上することが出来た。結果として、 0.005 T の低磁場で 124% の磁気抵抗比を得た。本提案によるフラックスガイド型 MR 素子は、低磁場でも十分に大きな磁気抵抗比を得られることが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、H16 年度 NEDO 産業技術助成事業の支援によって行われた。

References

- 1) T. Zhou, D. R. Hines, S. A. Solin: *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 667 (2000)
- 2) S. A. Solin, D. R. Hines, J. S. Tsai: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 89 (2002)
- 3) S. A. Solin, D. R. Hines, A. C. H. Rowe: *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 4012(2002)
- 4) W. Y. Kim, J. Y. Chang, S. H. Han, S. G. Chang, W. Y. Lee : *physica status solidi*, **201**, 8, 1980(2004)