

# 磁気インピーダンス効果を応用した高感度磁気センサ

秋田県産業技術総合研究センター高度技術研究所 (AIT) 丹 健 二<sup>1</sup>  
電子デバイス研究所 大森賢一<sup>2</sup>・系井和久<sup>2</sup>・長洲勝文<sup>2</sup>・上道雄介<sup>2</sup>・相沢卓也<sup>3</sup>

## High Sensitivity Magnetic Field Sensor Utilizing Magneto-Impedance Effect

K. Tan, K. Ohmori, K. Itoi, K. Nagasu, Y. Uemichi, and T. Aizawa

磁気インピーダンス効果 (Magneto-Impedance Effect) 素子は、小型化、高感度化が可能な磁気センサとして注目されている。しかしながら、正負の磁界に対して対称な特性を示すため、ゼロ磁界付近に動作点を有する磁界センサとして利用するためには、バイアス磁界が必要となる。われわれは、バイアス磁界を印加するための薄膜永久磁石を集積化した薄膜型磁気インピーダンス効果素子を試作・評価し、ゼロ磁界付近で感度を有するセンサが実現可能であることを確認した。また、得られるバイアス磁界の大きさは、薄膜永久磁石の着磁方向に依存することを明らかにし、従来、永久磁石を用いた素子では困難であった素子作製後のバイアス磁界の調整が着磁方向をコントロールすることにより可能であることを実証した。

The magneto-impedance sensor is very attractive due to its small size and high sensitivity with magnetic fields. However, a certain amount of bias field is required for the operation around zero magnetic fields because its response is symmetrical with respect to the magnetic field. Then that is why we've developed a thin film magneto-impedance sensor integrated with a thin film permanent magnet to generate the bias field, and ultimately confirmed that the sensor has sensitivity around zero magnetic fields. In addition, we've found the magnitude of the bias field depends on the magnetizing direction of the permanent magnet. Therefore, it was demonstrated that the bias field was adjustable even after fabrication of the sensor element by controlling the magnetizing direction.

### 1. ま え が き

磁気インピーダンス効果 (Magneto-Impedance Effect, 以下 MI 効果) は、零磁歪アモルファス磁性体に高周波電流を通電したときに、周回方向の透磁率が外部磁界の印加により大幅に変化することに起因して表皮深さが変化することにより、インピーダンスが変化する現象である<sup>1)2)3)</sup>。MI 効果を応用した磁気センサは、小型化、高感度化、低消費電力化が可能であり、携帯電話における方位センサをはじめ、車載用途や生体磁気計測などの分野への展開が期待されている。

しかしながら、その外部磁界に対する応答は正負対称な特性を示すため、ゼロ磁界付近では非常に小さいものとなっている。したがって、ゼロ磁界付近の微小な磁界を検出するためには適切なバイアス磁界が必要とされる。バイアス磁界の印加方法として巻き線コイルによるものや<sup>4)</sup>、薄膜によりコイルを形成したもの<sup>5)6)</sup>、永久磁石を集積したもの<sup>7)</sup>などが提案されている。しかし、

携帯電話等のモバイル機器用途においてはデバイスの轻薄短小化が要求されるため、これらに搭載されるセンサ素子も小型化、薄型化が求められ、巻き線コイルやバルク磁石は適用が難しい。また、薄膜コイルを用いたバイアス磁界の印加方法は、コイルへの通電電流により正確にバイアス磁界を制御できるといった利点を有するものの、センサ駆動時に数十 mA の電流をコイルに供給しなければならず、消費電力が増大するといった問題がある。一方、アモルファス SmCo 薄膜をバイアス磁石として集積化した構造の MI 素子が提案されているが<sup>8)9)</sup>、保磁力が 200 Oe 程度と小さく磁石としての特性が十分でないうえに、薄膜永久磁石の膜厚や寸法、磁気特性のばらつきによりバイアス磁界を正確に制御することが難しいといった問題がある。そこで、われわれは小型化、集積化が容易な薄膜型 MI 素子と、作製プロセス上親和性の高い薄膜永久磁石を集積化したセンサ素子の試作・評価を行うとともに、バイアス磁界の調整方法に関する検討を行った。その結果、面内方向に等方的な磁気特性を有する FePt 薄膜を用いることで、その着磁方向によりバイアス磁界の制御が可能であることを見出し、消費電力なしに正確なバイアス磁界の印加が可能な高感度磁気センサを実現した。

1 主任研究員 (工学博士)  
2 マイクロデバイス開発部  
3 マイクロデバイス開発部 グループ長

## 2. 実 験 方 法

われわれが試作したセンサ素子の上面図を図 1 に、断面図を図 2 に示す。後述するブリッジ回路による磁界検出のため、1つの薄膜永久磁石パターン上に2つのMI素子を構成した。MI素子となる磁性体膜として、零磁歪アモルファス組成であるCoNbZrを用い、短冊形状にパターニングした後、通電領域がメアンダ形状になるようAl電極を形成した。また、磁性体膜の磁化容易軸が素子幅方向になるように磁界中熱処理をほどこした。

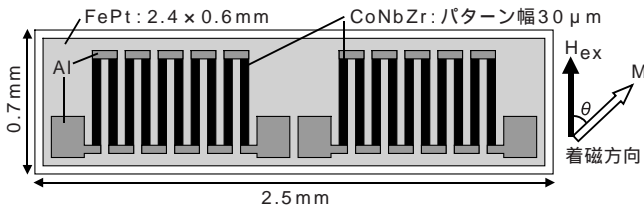


図 1 試作したセンサ素子の上面図  
Fig. 1. Top view of the fabricated sensor element.

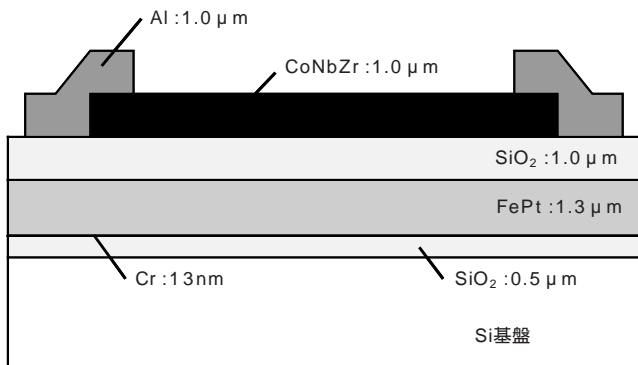


図 2 試作したセンサ素子の断面図  
Fig. 2. Cross sectional view of the fabricated sensor element.

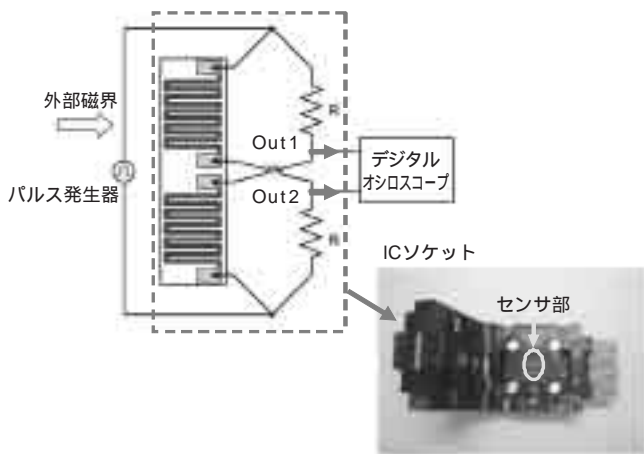


図 3 MI素子により構成したブリッジ回路の模式図とICソケットの写真  
Fig. 3. Schematic diagram of the bridge-connected sensor and photograph of the IC socket.

薄膜永久磁石は、高温での熱処理により規則相を形成することで、kOe オーダーの高い保磁力を示す FePt を用いた。薄膜永久磁石と MI 素子は、1 μm の絶縁層により絶縁されている。

センサ素子の作製プロセスは以下のとおりである。

- 1) 熱酸化膜を形成した Si ウェハ上に、FePt を RF マグネトロンスパッタにより成膜した後、600 °C にて熱処理をほどこす。
- 2) 薄膜永久磁石と MI 素子を電氣的に絶縁するために、プラズマ CVD により SiO<sub>2</sub> を成膜する。
- 3) CoNbZr を RF マグネトロンスパッタにより成膜し、短冊形状にパターニングした後、高周波電流を通電するための Al 電極を形成する。
- 4) 回転磁界中熱処理により、成膜時に誘導される不均一な一軸異方性や残留応力を取り除いたのち、静磁界中熱処理により短冊形状の幅方向に一軸異方性を付与する。
- 5) ダイシングによりセンサ素子を個片化した後、10 kOe の直流磁界を印加することにより薄膜永久磁石に着磁を行う。

磁気インピーダンス (MI) 特性は、ヘルムホルツコイルにて外部磁界を印加しながらインピーダンスアナライザを用いて評価した。このとき、永久磁石の着磁方向によりバイアス磁界が制御可能であるか検討するため、MI 素子の感磁方向である長手方向に対して角度をつけて着磁を行い、MI 特性の評価を行った。得られた MI 特性の動作点のシフト量からバイアス磁界を算出した。また、実際のセンサとしての駆動方法を考慮し、MI 素子と抵抗によりブリッジ回路<sup>10)</sup>を形成し、評価を行った。ブリッジ回路の模式図と IC ソケットの写真を図 3 に示す。ブリッジ回路は、2 個の抵抗を搭載した IC ソケットに、作製したセンサ素子を内蔵することで構成し、パルス発生器およびオシロスコープへ同軸ケーブルにより接続した。パルス電流が通電されると、抵抗と MI 素子

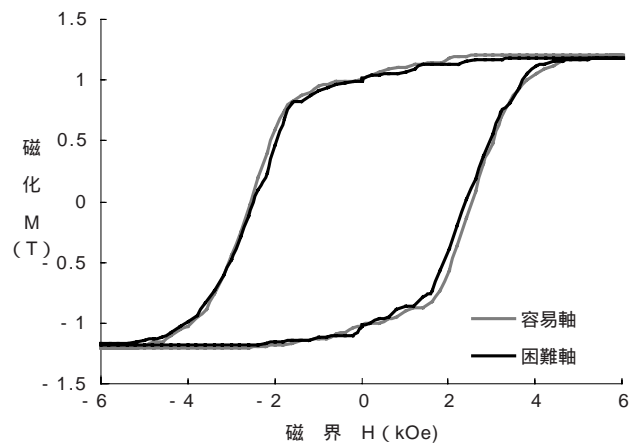


図 4 3 kOe の磁界中にて 400 °C の熱処理をほどこした後の FePt 薄膜の磁化曲線  
Fig. 4. Magnetization curve of the FePt film after magnetic field annealing at 400 °C in the field of 3 kOe.

のインピーダンスの違いにより、ブリッジのそれぞれの端の電圧波形は時間的な差を生じるため、これらの差分をとることにより出力波形が得られる。この出力波形は磁界の印加による MI 素子のインピーダンス変化に応じて変化するため、この出力波形のピーク値をデジタルオシロスコープにより取得した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 薄膜永久磁石の特性

薄膜永久磁石には以下の特性が要求される。

1. MI 素子作製プロセスとの親和性が高く、薄膜永久磁石、MI 素子の製造工程においてそれぞれの特性に影響をおよぼさないこと。
2. 使用される機器内にて発生する外乱磁界による影響を受けないだけの、十分に大きい保磁力を有すること。
3. 膜面内の着磁方向によりバイアス磁界を制御するため、任意の方向に着磁が可能な面内等方的な磁気特性を有すること。

特に、1. については、MI 素子に一軸異方性を付与するために 400 程度の温度で磁界中熱処理をほどこす必要があるため、この温度における耐熱性を有する必要がある。FePt 合金は、40 ~ 60 at% Pt 組成近傍で L1<sub>0</sub> 規則相を形成し、数 kOe の高い保磁力を有することが知られている<sup>11)12)</sup>。規則相形成には 600 程度の熱処理が必要であり、この温度は MI 素子作製時の磁界中熱処理の温度よりも十分に高いため、磁界中熱処理時における熱履歴の影響を受けにくいと考えられる。図 4 に、40.2 at%Pt 組成の FePt 薄膜を 600 で熱処理したのち、400 , 3 kOe の磁界中で熱処理をほどこした後の磁化曲線を示す。図中の容易軸は、磁界中熱処理時に印加した磁界の方向であり、困難軸はそれと面内に垂直な方向である。容易軸、困難軸とも約 1 T の残留磁化と、2.5

kOe の保磁力が得られており、磁界中熱処理後も良好な等方性を有していることが確認できる。また、FePt 膜の保磁力はセンサの動作磁界範囲よりも 3 桁以上大きいいため、被検出磁界によるバイアス磁界の変動はほとんど無いものと考えられる。

#### 3.2 バイアス磁石集積 MI 素子の磁気インピーダンス特性

図 5 は、同一のセンサ素子における着磁前後での MI 特性である。図中の角度は、MI 素子の感磁方向と着磁方向のなす角度である。着磁前の状態では、FePt 薄膜の磁化の向きは、MI 素子の作製工程における磁界中熱処理の方向、すなわち幅方向であり、磁石から発生する磁界は MI 素子の感磁方向成分をもたないため、バイアス磁界はほぼゼロである。一方、感磁方向に着磁したときのバイアス磁界は 13.1 Oe であり、MI 素子の動作点に対して十分に大きいバイアス磁界が付与されている。また、バイアス磁界は感磁方向と着磁方向のなす角度に依存して変化しており、着磁方向によるバイアス磁界の

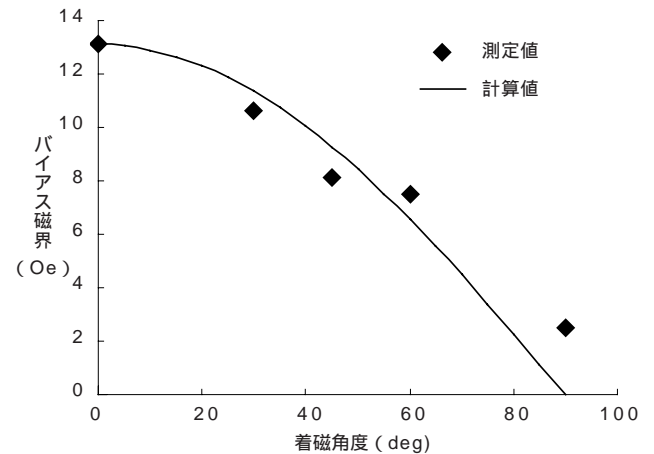


図 6 着磁角度によるバイアス磁界の変化  
Fig. 6. Obtained bias field as a function of the magnetizing angle.

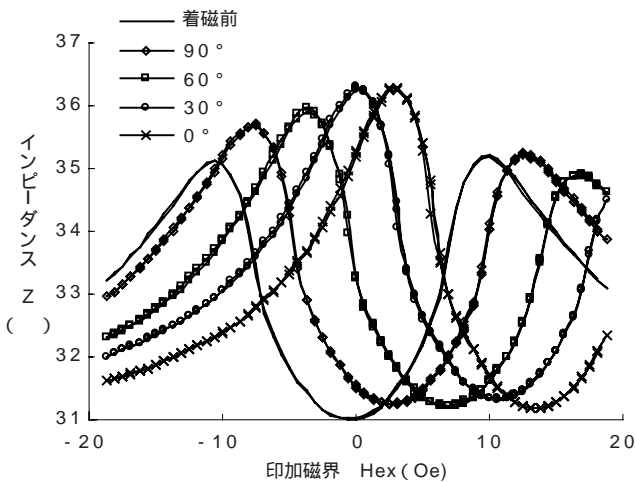


図 5 FePt 薄膜に角度をつけて着磁をしたときの磁気インピーダンス特性  
Fig. 5. Magneto-impedance properties with various magnetizing angles of integrated FePt bias magnet.

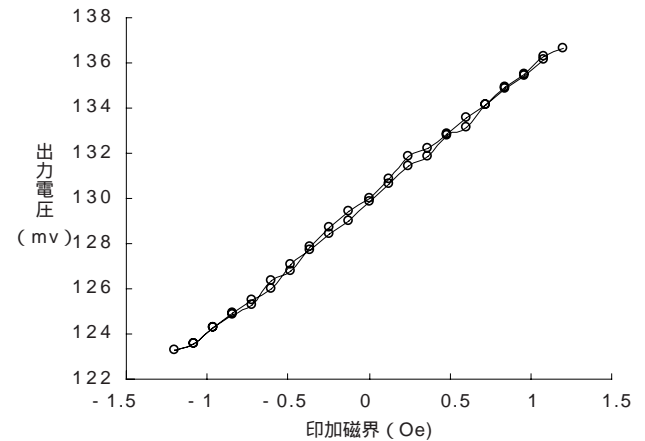


図 7 バイアス磁界調整後のブリッジ出力  
Fig. 7. Output voltage of the bridge connected sensor element after adjusting the bias field.

制御が可能であることがわかる。測定結果から、着磁方向を  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の範囲で変化させることにより、バイアス磁界を 10 Oe 程度変化させることが可能であった。図 6 は、着磁方向に対するバイアス磁界をプロットしたグラフである。薄膜磁石から発生する磁界は、着磁方向に対して磁石の形状異方性を加味した方向に発生するが、MI 素子は長手方向にのみ感度を有するため、磁石からの発生磁界のうちの余弦成分のみがバイアス磁界としてはたらく。実線は素子長手方向に着磁したときのバイアス磁界から、各着磁方向における余弦成分を計算したものであるが、実験結果とよい一致を示している。実線とプロットの間はずれは、磁石の形状異方性により着磁方向と実際に磁石から発生する磁界の方向にずれがあることに加え、同一の素子に繰り返し着磁を行ったことによる残留磁界の影響であると考えられる。したがって、より正確にバイアス磁界を制御するためには、薄膜永久磁石の形状異方性が小さく、面内で局所的に不均一な磁界が発生しない形状が望ましいと考えられる。

図 5 および図 6 から、センサの動作点における感度もっとも大きくなる着磁角度は、 $45^\circ \sim 60^\circ$  であることがわかる。そこで、 $45^\circ$  方向に着磁した素子において、ブリッジ回路によるセンサ特性の測定を行った結果を図 7 に示す。周波数 1 kHz、パルス幅 30 ns、立ち上がり 3 ns のパルスをパルス発生器により発生させた。測定系に起因するノイズが含まれているものの、 $\pm 1.2$  Oe の範囲で良好なリニアリティを有する出力が得られていることがわかる。このときの感度は  $5.9 \text{ mV/Oe}$  であり、センサ素子における消費電力は  $3 \mu\text{W}$  であった。

#### 4. む す び

FePt 薄膜永久磁石を同一基板上に集積化した MI 素子の試作と評価を行い、バイアス磁界制御方法の検討を行った。FePt 薄膜の等方的磁気特性により、バイアス磁石は任意の方向に着磁することが可能であった。これにより、素子作製後に着磁方向によりバイアス磁界を制

御できることを明らかにした。また、本センサを用いてブリッジ回路を構成し、パルス電流を通電することにより、低消費電力で高感度な磁気センサが実現可能であることを示した。今後は、駆動回路の IC 化や、センサ素子の構造最適化を行う予定である。

最後に、本センサの開発にあたり、懇切なるご協力をいただきました東北大学電気通信研究所石山研究室殿、その他の関係各位にこの場を借りて御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama and M. Noda : IEEE Trans. Magn. Vol. 31, No. 2, pp. 1249-1260, 1995
- 2) T. Uchiyama, K. Mohri, L. V. Panina and K. Furuno : IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 6, pp. 3182-3184, 1996
- 3) 内山剛, 毛利佳年雄, L. V. Panina, 古野和秀 : 電学論 A, 115 巻 10 号, pp. 949-955, 1995
- 4) 武士田健一, 内山剛, 毛利佳年雄 : 電学論 A, 115 巻 10 号, pp. 943-948, 1995
- 5) 比嘉孝治, 内山剛, 沈麗萍, 毛利佳年雄, 宇ノ木保元, 菊池和政 : 日本磁気学会誌, 21, pp. 649-652, 1997
- 6) 高山昭夫, 湯口昭代, 梅原多美雄 : 電気学会マグネティクス研究会, 資料番号 MAG-00-24, pp. 79-84, 2000
- 7) 西部祐司, 太田則一 : 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 35, No. 4, pp. 15-20, 2000
- 8) M. Takezawa, Y. H. Kim, K. Ishiyama, M. Baba, N. Ajiro, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp. 3682-3684, 1999
- 9) 中居倫夫, 山口正洋, 石山和志, 荒井賢一 : 日本磁気学会誌, 28, pp. 132-135, 2004
- 10) 青山均, 本蔵義信 : 日本磁気学会誌, 20, pp. 237-240, 1996
- 11) K. Aimuta, K. Nishimura, S. Hashi, and M. Inoue : IEEE Trans. Magn. Vol. 41, No. 10, pp. 3898-3900, 2005
- 12) M. Takezawa, H. Kikuchi, K. Suezawa, M. Yamaguchi, K. Ishiyama, and K. I. Arai : IEEE Trans. Magn., Vol. 34, No. 4, pp. 1321-1323, 1998