半導体磁気抵抗素子での磁気バイアス値の決定

正員 増田 昇 (工学院大学)

正員 根岸 照雄 (工学院大学)

Determination of Magnetic Bias for Semiconductive Magnetoresistance Element

Noboru masuda and Teruo Negishi (Kogakuin University)

This paper shows determination of magnetic bias for InSb semiconductive magnetoresistance elements including magnetic sensor.

The semiconductive magnetoresistance element has two kinds of linear and square characteristics in magnetic resistance change bordering at a low and high applied magnetic flux strength. Also, the border characteristics show clearly experimental method.

It needs to make clear between an influence for dispersion with the initial resistance and magnetic bias to the magnetoresistance elements, connecting to the series with a divided potential circuit. A magnet give the most suitable magnetic bias to the magnetoresistance elements included in a magnetic sensor is discussed.

キーワード：半導体磁気抵抗素子，磁気センサ，磁気バイアス，磁界特性

1. まえがき

半導体磁気センサは，S/N比や空隙特性が優れており，紙幣識別装置や磁気カードリーダ等に応用されている。また，ごく最近に至って，周波数特性が良い点に着目したトランジェントを持つ大電流検出に関心が集まっている。

半導体磁電変換素子の開発は，本邦では片岡，山田，藤定，杉山等，ドイツではワイズ，ウエルカー等によって進められた^{(1)・(2)}。

一方その応用品の開発は，増田等によって進められ，DDモータへの適合性の検討^{(3)・(4)}，紙幣識別装置^{(5)・(6)・(7)}，非接触ポテンショメータ^{(8)・(9)}，位置センサ⁽¹⁰⁾等の多くの実用品を生み出しているが理論上で解明すべき点も多い。

半導体磁気抵抗素子に用いられる単結晶半導体材料は，移動度(μ)が大きく高い磁界感度を示すインジウムアンチモナイド(InSb)やインジウム砒素(InAs)が多用されている。

しかし，単結晶InSb半導体は，他のどの半導体にも増して移動度が大きく，抵抗の温度係数もまた2%/°と大きいため，温度特性を改善する必要がある。そこで，前述したほとんどの応用品では，2個の磁気抵抗素子を直列に接続した分圧法や分圧複合素子を構成し，それぞれの素子に交差的に磁界変化を与えて，分圧回

路の中性点から出力信号を取り出す温度補償方法が用いられている⁽¹⁰⁾。

また，磁界変化だけでなく軟磁性体の変位が検出できる半導体磁気センサでは，単結晶半導体磁気抵抗素子に磁気バイアス用マグネットを取り付けることで，磁界感度を向上する方式を用いている⁽¹¹⁾。

さらに，最近の動向として，2素子の磁気抵抗素子を一体に形成した分圧複合素子から，トランジェント検出器のように分圧回路を構成するそれぞれの素子を離れた位置に設置したものが検討されている。

つまり，このように離れた位置に半導体磁気抵抗素子を2素子設置すると，素子に加える磁気バイアス値にバラツキが生じ易く，磁気バイアスと素子の関係を良く把握することが重要になる。

そこで，この報文では磁気抵抗素子に印加する磁気バイアス値と磁気センサを構成する磁気抵抗素子の2素子間の抵抗値の偏差が，磁気センサの電圧感度にどのような影響を与えるかを検討すると共に磁気バイアスの最適値を求める。

2. 半導体磁気センサの動作原理と特性

<2・1> 半導体磁気抵抗素子の構造と特性⁽¹⁾

<2・1・1> 半導体磁気抵抗素子 磁気センサに組み込む半導体磁気抵抗素子は，印加磁界の増加に従って素

子の抵抗値が増加する特性を持つが、低い磁界では2乗特性、高い磁界では線形特性と、著しく異なる特性を持つことが良く知られている^{(1)・(12)}。

磁気抵抗効果には磁性薄膜を持つ磁気抵抗効果と半導体片のホール効果にもとづく磁気抵抗効果とがあるが、ここで論じる磁気抵抗効果は、後者、半導体磁気抵抗効果にもとづく磁気抵抗素子である。

また、半導体磁気抵抗素子には、蒸着法で作成した蒸着素子と単結晶から加工するバルク素子とがある。

実用されている素子のほとんどがバルク素子で、ここで検討する素子は、後者、単結晶バルク素子である。

〈2・1・2〉 半導体磁気抵抗素子の形状と加工によって生じる抵抗値のバラツキ 良く知られているように半導体磁気抵抗効果は、素子の形状によって印加磁

a). 磁気抵抗素子の構造

b). 分圧複合素子の構造

図1. 半導体磁気抵抗素子の構造

Fig.1. Construction of magnetoresistors.

界に対する抵抗変化特性が著しく異なる^{(1)・(2)}。

そのため実用素子では半導体片上に金属導体、いわゆる、メタルバーを設けて長方形素子に区切り、形状 (ω/l) が高い感度を示す値に設定するが、⁽¹³⁾メタルバーの形状によってラスタプレート、バーバポール、シェブロン素子と呼ばれる素子がある。

この研究ではラスタプレート素子を用いた。

InSb半導体を用いた実用素子での (ω/l) は、一般的に0.2から0.4の値が用いられる。また、実用抵抗素子では、単結晶InSb半導体の抵抗率 ρ が $0.45 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$ と低いため、端子間の抵抗値が小さく、周辺回路との整合性が難しい。そこで、図1に示すようにサブ

エレメントを100から200個直列に構成して基本素子としたり、温度特性を改善するため、2素子を一体で構成した分圧複合素子とする。磁気抵抗素子の斜視図と分圧複合素子の平面図を図1にそれぞれ示す。

〈2・1・3〉 磁気抵抗素子の加工⁽¹⁴⁾ この研究に用いた単結晶InSb半導体の形状は、直径2インチ、厚み0.3mm、結晶軸が $\langle 111 \rangle$ 面、また、室温での物性値は、ホール係数 R_H が $300 \text{ cm}^3/\text{C}$ 、 μ が $78,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 、 ρ が $0.45 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$ 、のN形である。この物性値を持つ半導体を概略図2に示す工程に従って磁気抵抗素子に加工した。

図2. 単結晶半導体磁気抵抗素子の加工工程図

Fig.2. A flow chart of manufacturing process for semiconductive magnetoresister.

ところで、図示した工程に従って素子を加工すると、ウエハーに傾きが生じる。そこで図3(a)に示す傾きを仮定し、最大厚みを d_0 、素子の入力抵抗を R_{in} とすれば、抵抗値の分布 N は、(1)式となる⁽¹⁵⁾。

$$N = \frac{8\zeta \cdot r^2}{d_0} \sqrt{\frac{\zeta}{d_0 R_{in}^5} - \left(\frac{\zeta}{d_0 R_{in}^3} \right)^2} \dots \dots (1)$$

ただし、 ζ はシート抵抗 $(\rho \cdot l / d \cdot \omega)$ である。磁気抵抗素子に用いた単結晶InSb半導体の導電率 ρ

を $0.45 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$ 、サブエレメントを150としてその実効形状 (ω/l) を0.02/0.375、 d_0 を $10 \mu\text{m}$ 、 r を1.5cmとして(1)式に用い N を求めると、図3(b)の破線で示す理論曲線が得られる。この結果から単結晶磁気抵抗素子を加工するときに生じる初期抵抗値の偏差は、一番低い抵抗値に対して5倍もの抵抗値に分布することがわかる。以後この値をもととして検討を進める。

〈2・2〉 半導体磁気センサ

〈2・2・1〉 半導体磁気センサの構造と分圧回路 磁気抵抗素子の基礎特性は、低い磁界での感度が著しく低いので、小さな磁界変化や軟磁性体に感应するセンサを構成するためには、磁界感度を向上させるための手法が必要になる。また、前述したように、この素子の高磁界感度が低磁界感度にくらべて高く、一定の変化

図3(a)．傾きのモデル

Fig.3(a). Calculation model of slope.

図3(b)．傾きによる抵抗値分布

Fig.3(b). Resistance distribution of Magnetoresister.

図3．半導体磁気抵抗素子の抵抗値の度数分布
Fig.3. Calculation model and resistance distribution of Magnetoresister.

率をもっている。そこで、この素子に磁気バイアスを加えることで動作点を適正点に設定すれば、磁界感度

も低磁界より高く、感度のバラツキも小さくなるものと考えられ、図4(a)に示すように、InSb磁気抵抗素子の背面に磁気バイアス用永久磁石を取り付けることでバイアス磁界を与えた磁気バイアス法が多用されている。しかし、その適正值は求められていない。

図4(b)、(c)に磁気センサの基本構造と被検出体と磁束との関係、磁界抵抗変化と出力電圧の関係を模式的に示す。また、このセンサでは同一磁極面上

(a)．磁気抵抗素子とマグネット (b)．磁性体と磁束変化

(c) 磁気抵抗変化と出力特性 (d) 分圧回路

図4．半導体磁気センサの構造と動作模式図

Fig.4. Construction of semiconductive magnetic sensor and action.

に装着した2個の磁気抵抗素子 R_{M1} 、 R_{M2} を直列に接続し、図4(d)に示す分圧回路を構成する。

〈2・2・2〉 磁気バイアス値の決定 磁気バイアス値を決定するためのおおまかな目安は、磁気抵抗素子の磁界特性が2乗特性と線形を示す境界値以上の磁界強度にバイアス値を設定することである。

一方、コンピュータを用いて解析すれば、2乗特性と線形特性を断続させることなく、連続して算出できる理論も提案⁽¹⁾⁽²⁾されているが、2乗特性と線形特性の境界値を明確に示していない。

そこで、この研究では、半導体磁気抵抗素子の磁界抵抗特性を実験で求め、さらに、実験データを回帰することによって正確な境界値を求める事とした。

図5は、磁気抵抗素子の磁界抵抗特性を実測した多くの実験データから代表的なものを選定して磁界特性とその微分値、直線からの誤差をそれぞれ図示したも

のである。なお、図5に示す特性で磁界零の初期抵抗値 R_0 が正の方向にずれている理由は、標準磁界発生器の磁心のシヒステリシス差による。そこで、このヒステリシス差を加味すると共に、図示した微分値と直線からの誤差を考慮して、半導体磁気抵抗素子の磁界抵抗値の2乗特性と線形特性の境界値をつぎのように判定する。

図5. 磁気抵抗特性 R_M の実験値と磁束密度 B に対する微分値

Fig.5. Experimental data of magnetoresistance R_M vs. applied magnetic flux density B and differential-calculus.

すなわち、直線からの誤差曲線が0.12Tでほぼ零になり微分値 dR_M/dB も1に近づくことから、その境界値は0.12T近傍に存在することがわかる。

また、ごく普遍的に容易に入手できる稀土類系磁石のような、0.12T以上の強い磁界のマグネットによる磁気バイアスでは、常に磁気抵抗素子の磁界特性が線形性を示す範囲にあり、線形領域での磁気バイアスとなる。

しかし、この研究では磁気バイアスマグネットとして外形寸法が $5 \times 4 \times 7 \text{ mm}$ 、表面磁束密度が $0.15 \text{ T} \pm 10\%$ のストロンチウム系フェライト磁石を用いた。

〈2・2・3〉 半導体磁気センサの動作 半導体磁気抵抗素子の特性と磁気センサの構造をすでに述べたが、磁気センサの動作は、次の通りである。

図4(a)に示す磁気バイアスされた磁気抵抗素子は、同図(d)に示すように分圧回路を構成する。この状態で、同図(b)に示すように磁性体が素子面に平行して近づくと、被検出体の磁性体にバイアスマグネットの磁束が集中することで、磁気バイアスマグネットの磁束に磁気ゆらぎを生じさせる。その時生じる磁界変化を磁気抵抗素子が受けて、この磁界変化に相当した抵抗値の微小抵抗値 ΔR_M が同図中(c)の破線で示すように生じると同時に、図(d)の分圧回路の中性点に図(c)中に実線で示す出力電圧 V_{out} を出力する。

〈2・2・4〉 磁気センサの出力特性 図4において、第1素子(R_{M1})と第2素子(R_{M2})に線形領域で磁気バイアスが増えられるものとする。まず抵抗変化比 k を初期抵抗値 R_0 と磁界抵抗値 R_M とで示し^{(1)・(16)}、 $k = R_M / R_0$ とすれば、磁気バイアス点での両素子の抵抗値は $k_1 R_{01}$ 、 $k_2 R_{02}$ になる。さらに、磁気抵抗素子に磁気バイアスを加えた状態で、磁性体が素子に接近し、第1素子の磁界が増加する時に生じる微小抵抗値を ΔR_{M1} とし、図4(b)の関係と分圧回路、同図(d)の関係から、入力電圧を V_{in} とすれば、中性点での出力電圧 $V_{out<+>}$ が次式となる。

$$V_{out<+>} = \frac{k_1 R_{01} + \Delta R_{M1}}{k_1 R_{01} + \Delta R_{M1} + k_2 R_{02}} V_{in} \quad \dots \dots \dots (2)$$

次いで磁性体がさらに移動して第2素子に磁性体が近づき、第2素子の磁界が増加して素子の微小抵抗値 ΔR_{M2} が加わると、中性点の出力電圧 $V_{out<->}$ は、次式となる。

$$V_{out<->} = \frac{k_1 R_{01}}{k_1 R_{01} + k_2 R_{02} + \Delta R_{M2}} V_{in} \quad \dots \dots \dots (3)$$

磁性体が素子の近傍になく、磁気抵抗素子に磁界変化が加わらなければ微小抵抗値 ΔR_M が存在しない。そこで、磁気バイアス値が等しく、 $R_{M1} = R_{M2}$ の時の出力電圧、すなわち、中性点の電圧 $V_{out<0>}$ は、

$$V_{out<0>} = \frac{k_1 R_{01}}{k_1 R_{01} + k_1 R_{01}} V_{in} = \frac{1}{2} V_{in} \quad \dots \dots \dots (4)$$

となり、一種の基準値を与え中性電圧と呼ぶ。

また、図5(C)から尖頭値電圧 $V_{out< p-p >}$ は、

$$V_{out< p-p >} = V_{out<+>} - V_{out<->} \quad \dots \dots (5)$$

となる。
次いで、磁気抵抗素子と出力電圧間のディメンジョンの影響を無くすように、2個の磁気抵抗素子の初期抵抗値、 R_{01} 、 R_{02} に偏差 α を導入し、この α を次式のように定義すれば

$$R_{01} / R_{02} = 1 + \alpha \quad \dots \dots \dots (6)$$

となり、(2),(3),(5),(6)式から

$$\begin{aligned} V_{out< p-p >} &= \frac{k_1 / k_2 (1 + \alpha) (1 + \delta_1)}{k_1 / k_2 (1 + \alpha) (1 + \delta_1) + 1} - \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha + k_2 / k_1 (1 + \delta_2)} \quad \dots \dots (7) \end{aligned}$$

が導かれる。

ただし、 $\delta = \Delta R_0 / R_0$ である。

(7)式において初期抵抗値と磁気バイアスの関係を求める時には $\delta \ll 1$ となり、さらに、(7)式の k に着目すると、第1項では (k_1/k_2) 、第2項では (k_2/k_1) である。この k_1 、 k_2 は、まず、第1項では第2素子の k_2 に対して第1素子の k_1 が、また、第2項では第1素子 k_1 に対して第2素子の k_2 となっているので、これは、2素子間の印加磁界の相互関係を示す。つまり、これらの両素子の k_1/k_2 、 k_2/k_1 は、それぞれの素子に磁界を加えることによって発生する変数であるから、この項は両素子間の磁気バイアスの状態や磁界を加えた時に素子相互間の磁界差によって得られる出力特性を示すことになる。両素子間の磁気バイアス差についての問題は、次報にゆだね、あくまでも初期抵抗値に対する磁気バイアス値の関係について検討するものであるから、(7)式の第1項では磁気バイアスの基準を第2素子の初期抵抗値とすれば、 k_2 は1、また、同様に第2項では k_1 を1とし(7)式の関係から(8)式を得る。

$$\frac{V_{out} \langle p-p \rangle}{V_{in}} = \frac{k_1 (1+\alpha)}{1+k_1 (1+\alpha)} - \frac{1+\alpha}{1+k_2+\alpha} \dots \dots (8)$$

また(7)式では R_{01} に対して R_{02} が規準化され、かつ、分圧回路を構成するそれぞれの磁気抵抗素子の初期抵抗値を抵抗値偏差 α で示すものである。

また、(8)式は、両素子に交差的に磁界を切り替えた場合の尖頭値出力電圧をも意味している。

図6. 式(9)の計算結果

Fig.6. Calculation $d\eta/d\alpha$ from equation (9).

3. 初期抵抗値のバラツキが感度に与える影響

図5の特性から磁気バイアス値の下限値は、容易に

求めることができるが上限値を求めることができない。また、初期抵抗値のバラツキと磁気バイアスが感度にどの程度の影響を与えるかの定量的な検討を加えていないため、この状態では磁気バイアスの最適値は、いまだ曖昧なものとなっている。

一方、もし初期抵抗値のバラツキが感度のバラツキに影響を与えるとすれば、このバラツキはセンサの特性を阻害し、実用上で歩留に問題が生じる。

ここで、 $V_{out} \langle p-p \rangle / V_{in}$ を η とおけば、 η は明らかに入力電圧 V_{in} に対する出力電圧の比であるから、ここで η を電圧感度と定義する。

次いで、2素子間の抵抗値偏差と V_{in} によって生じる直流電圧の変化分を除去するために、 η の α に対する導関数を求める。さらに、ここでは2素子に加わるバイアス磁界がほぼ等しいとして $k = k_1 \approx k_2$ とし、かつ、常数とすれば(8)式から(9)式を得る。

$$\frac{d\eta}{d\alpha} = \frac{k(1+k+\alpha)^2 - k(1+k+k\alpha)^2}{(1+k+\alpha)^2(1+k+k\alpha)^2} \dots \dots (9)$$

(5)式で $\alpha=0$ の時、すなわち、 $R_{M1} \approx R_{M2}$ となる。また、中性電圧は(4)式と同様にほぼ $1/2 V_{in}$ となる。

ここで、 α と k に対する $d\eta/d\alpha$ を数値計算しその一部をグラフで示すと、図6を得る。

以上述べた内容を踏まえ、(6)式で R_{01} の R_{02} に対する抵抗値の差を5倍と仮定すれば、 α が4になる。また磁気センサに多用する磁気バイアス値、0.2T(テスラ)を用い、この磁気バイアス値での磁気抵抗素子の抵抗変化比を図5の磁気特性から求めると $k=2$ を得る。この値 k を(9)式に代入して $d\eta/d\alpha$ を算出すれば、0.024となる。

また一方、このように両素子の抵抗値が異なると、中性点の直流電圧は、両素子の抵抗値の分圧比で与えられるので、当然、 $1/2 V_{in}$ と異なった値を持つ。そこ

図7. 測定系と増幅回路

Fig.7. Measurement and amplifier circuit.

で、この直流電圧を除去する方法、例えば、被検出体が定速度で移動する時には、その出力信号を交流信号回路で処理することで直流成分が除去され、交流信号成分だけが取り出せる。つまり、電圧感度は R_{M1} と R_{M2}

の抵抗値との間に5倍にもおよぶ抵抗値差があっても、初期抵抗値のバラツキに対して、わずか2.4%の誤差を持つ出力信号となる。

4. 実験

〈4・1〉 実験回路と被検出体⁽¹⁶⁾ 以上の結果から、交流結合回路を用いる磁気センサでは、分圧回路を構成する磁気抵抗素子の初期抵抗値の偏差 α は、電圧感度にほとんど影響しない。しかし、磁界特性を始めとした諸特性をすべてにわたり実験的に検証するためには、膨大なサンプルと時間を必要とする。

そこで、この関係を簡便な実験によって確認できる方法を案出した。

実験に用いた測定系と増幅回路の構成を図7に示す。

図8. 測定用センサの構造

Fig.8. Construction of magnetic sensor for measurement.

また、試作した8チャンネル(CH)アレー化磁気センサの部分構成図、測定用センサの構造を図8に示す。

このセンサでは、磁気バイアスマグネットとして、前述したストロンチウムフェライトマグネットを用いた。さらに、各センサごとに独立した増幅器を接続し、それぞれ8個の独立した並列信号からなるデータを収集する。

増幅器に汎用オペレーショナルアンプを用い、増幅度は60dB、周波数特性は2KHzである。

カード上に構成した磁気インクと素子との配置を平

図9. 試験片上の磁性インクと素子の配置

Fig.9. Arrangement between magnetic ink on a paper and magnetoresistors.

面的な模式図として図9に示す。また、磁気センサと被検出体カード、つまり、試験片との関係は、すでに図4(a)に示すように設定した。

カード上に構成した磁性体の大きさを、 1.2ϕ として磁気センサがもつ分解能を十分満足するものとし、さらに、実験精度を高めるために図示したようにマークとして磁性体ドットを付けた。

この実験では、事前に標準用磁気センサを用いて被検出体の磁性濃度を測定し、それぞれのCH間の誤差が1%以下のものを用いた。

図10に示す出力波形は、この被検出体カードをセンサ面に対して平行を保ち、 $7\text{mm}/20\text{msec}$ の定速度

図10. 出力波形

Fig.10. Output waveform.

で移動させた時のものである。

図9に示す磁性体と素子との配置関係によれば、出力信号波形の形状から、センサの特性が判定できる。すなわち、図9で示す評価用カードから得られる出力波形が中心ドットの出力波形に対して左右対称であれば、素子と被検出体の位置関係や素子の傾きがなく正常、上下対称な波形を示せば2素子間の感度が等しく、磁気バイアス量も均一に機能しているものと言える。

〈4・2〉 抵抗値のバラツキとセンサの出力電圧 すでに、交流増幅回路に結合した分圧回路の出力は、初期抵抗値のバラツキにはほとんど関係しない特性をもつことを示した。

そこで、半導体ウェハの傾きによって生じ得る磁気抵抗素子の抵抗値のバラツキの限界と磁界感度との関係を考慮して2素子間の抵抗値偏差が約2倍のもの、全抵抗値が $0.371\text{k}\Omega$ から $1.919\text{k}\Omega$ のものなどを組み合わせた資料を、各チャンネルごとに用意した。

図7の測定系と図8に示す構造のセンサと図9の被検出体とによって得た8個の出力波形データの中から代表的なデータを図10に示す。

5. 考 察

すでに、磁気バイアス値を磁気抵抗素子の磁界特性の線形領域に設定すれば、バラツキの少ないセンサが構成できることを述べた。しかしながら、図5に示すデータで、単に、磁気抵抗特性のデータだけから、その境界値を求めようとしても、センサとして必要な磁気バイアス値の下限が正確かつ定量的な値として求めることはできない。ところが、図5に示すように磁界特性に加えて dR_M/dB と、直線からの誤差を示す曲線を付加することによって、正確かつ定量的に2乗と線形特性との境界値を見いだすことができ、磁気バイアスの下限値がわかる。

すなわち、図5に於いて、 dR_M/dB は一種の磁界抵抗感度とも言えることから、この値、 dR_M/dB がほぼ一定値になる磁界領域で磁気バイアスを与えれば、磁気抵抗値 R_M は、個々の磁気バイアスマグネットが持つ磁界のバラツキ値に従って初期抵抗値を k 倍した抵抗値となる。

また、図5に示すように dR_M/dB が大きな傾斜を持つことが明かであるから、境界値以下で磁気バイアスを加えたときの素子の磁気抵抗値 R_M は、磁気バイアスマグネットの磁界のバラツキが dR_M/dB 特性の傾斜に対応して拡大されたものとなる。

また同様に、境界値以下で磁気バイアスを加えたセンサの感度のバラツキは、それぞれのセンサ単品間や両素子間の磁気バイアスのバラツキが、 dR_M/dB に従って、さらに大きく拡大されるものとなる。

そこで、2乗特性を示す領域での磁気バイアス値と線形領域での磁気バイアス値とを仮定して具体的な値を求める。

まず、磁気バイアス値として、磁束密度を0.02 Tと仮定すれば、図5の微分特性から dR_M/dB が0.44となる。また、この範囲で磁束密度を0.01 T増加して0.03 Tとすれば、 dR_M/dB のそれは、0.82となり、磁束密度がわずか0.01 T変化すると、 dR_M/dB が1.8倍も変化することがわかる。

また、すでに述べたように図5に示す直線からの誤差を求めた曲線は、0.12 T以上の磁束密度に対してほぼ零を示すので、0.12 T値が磁気バイアスの下限値と考える。

そこで以上に述べたと同様に0.12 Tにおける dR_M/dB を図から求めると、0.12 Tでの dR_M/dB が0.985となり、また、 dR_M/dB 値の1からの差分が0.015となる。このことは磁束密度を増加し、 dR_M/dB が1に近づくような大きな磁束密度変化を加えても、 dR_M/dB は1.5%しか変化しないことを意味する。

つまり、2乗特性と線形特性の境界値以下では、0.01 Tのわずかな磁束密度の変化に対して dR_M/dB が、180%も変化するのに比べ、線形領域での R_M/dB 値は、

磁束密度を大きく変えても1.5%以下のはるかに小さな値にとどまることである。

以上詳述したように、磁界特性から磁気バイアス値の下限と磁気バイアス値の差分に対する誤差を明らかにしたものの、このような検討範囲では抵抗偏差 α と磁気バイアスの関係には全く触れていない。そこで、この関係を図6に示す数値解析によって得たデータをもとにして考察する。

まず図6では k が増加するに伴って電圧感度の変化率 $d\eta/d\alpha$ が増加する。このことは、磁気バイアス値や検出磁界が高くなると出力電圧の変動や誤差が大きくなることを示している。

ここでさらに図6から得られる知見を整理すれば、まず、2素子間の抵抗値偏差 α が1の近傍で最大値を示す。また、(6)式から R_{02} の初期抵抗値に対して R_{01} が2倍の抵抗値の素子で分圧回路を構成した磁気センサの $d\eta/d\alpha$ が最も大きな値になることがわかる。さらに、 α が大きくなると、 $d\eta/d\alpha$ が逆に小さくなり、図5の磁界特性から k を3倍になるように磁気バイアス値を設定した時の α の値が4.5のものと、同一磁気バイアス値での α の値が0.2での $d\eta/d\alpha$ が 3×10^{-2} となり、両者の $d\eta/d\alpha$ はほぼ近い値となる。

また、図6に図示した $d\eta/d\alpha$ の実用上での許容値を満足する k は、2以下となり、この値は、 α の大小に関係せず、 α として実際にあり得るすべての範囲にわたり、実用上の限界値を満足するものとなる。

そこで、この $k=2$ 、つまり、 $R_M/R_0=2$ であるから、図5の磁気抵抗特性から初期抵抗値が2倍の磁束密度を求めれば約0.2 Tが得られ、この0.2 Tが磁気バイアスの上限値となる。

実験回路と試験片によって得た出力信号レベルは、図10中に示す実験データのように、2素子間の抵抗値偏差が2倍程度あっても波形の対称性が良く、また、CH5とCH6に示すように抵抗値差が5倍あっても、両者間では、ほとんど、出力電圧に差のない結果となった。

この報文ではそのデータを示さないが、境界値より低い磁気バイアス値を与えた磁気センサは、出力信号レベルも小さく、また、出力電圧も大きくバラツキ実用に至らなかった。⁽¹¹⁾

つまり、2素子間の抵抗値の差によって生じる直流オフセット電圧を交流増幅回路を用いて除去すれば、抵抗値の偏差が電圧感度あまり影響しない。換言すれば、理論値とかなり良く符合しているものと言える。

また同時に、交流増幅器を用いる磁気センサでは、電圧感度に影響する要素、例えば、磁性インク差によって生じる誤差や、取り付けによって生じる2素子間の磁気バイアス差が重要な問題点であると考えられる。この詳細については、あらためて報告する予定でいる。

さらに、2乗特性と線形特性の境界値以上で、必要以上に大きな磁気バイアスを付与した磁気センサでは、

入力抵抗値が増加し消費電力の低減には役立つが、磁気センサの感度の向上にほとんど役立たない。換言すると、感度の向上に対しては、全く無意味であり、かえって精度を悪化させることになる。

以上述べたことを総括すると共に、図6中に示す実用上での許容限界値を考慮すると、半導体磁気センサの適正な磁気バイアス値は、0.12Tから0.2Tの範囲にあると考える。

6. むすび

半導体磁気抵抗素子の概要を述べ、次いで、半導体磁気抵抗素子の磁界特性の線形特性と2乗特性の境界が0.12T近傍にあることを実験によって得た磁気抵抗特性と、この磁気抵抗特性を回帰分析したデータを用いて明らかにした。さらに、磁気抵抗素子を用いた半導体磁気センサの動作特性を述べ、直流中性電圧の影響が除去できる交流増幅方式では、電圧感度が初期抵抗値の偏差に依存しないことを理論上からも実験的にも明らかにした。

最後に半導体磁気センサでの磁気バイアスの適正值が磁気抵抗素子の磁界特性と実用的に許容できる電圧感度のバラツキとを加味して、0.12Tから0.2Tの範囲にあると決定した。

磁気センサアレーを構成する上での今後に残された課題として、傾きによって生じる磁気バイアス値のバラツキが電圧感度にどのように影響するかの検討もあるが、別に報告する予定でいる。

7. 謝 辞

この研究は、電気音響(株)から(株)村田製作所で継続して実施したものである。

筆者は、この研究にご協力いただいた(株)村田製作所本多修一、戸蒔健治、大沢哲夫氏を始めとした多くの方々と、終始ご指導ご鞭撻を賜った村田製作所専務取締役有吉昶氏、村田製作所横浜開発センタ所長、西川俊夫取締役、同所村田充弘前第一開発グループ部長、並びに前電子総合研究所デバイス部部长、元シャープ(株)東京支社長 片岡照栄氏に心から感謝いたします。

(平成7年10月23日受付、同8年3月11日再受付)

文 献

- (1). 片岡照栄 磁電変換素子 日刊工業新聞社 昭和40年1月.
- (2). H. Weiss, Structure & Application of Galvano Magnetic Devices, Pergamon Press 1969.
- (3). 増田昇 半導体磁気センサの実戦的活用(ホールモータを中心として)技術情報センタ資料 昭和55.4.4.
- (4). 増田昇 回転計測センサ 自動化技術 16巻6号1983. pp. 52.
- (5). Noboru Masuda, Galvanomagnetic Element and Their Applications in Japan. IEEE Tokyo Section DENSHI TOKYO No.15. Oct. 1976.
- (6). 矢崎他 磁気抵抗素子を用いた文字認識用検出器 電気学会技術委員会 資料 ED-77-10.
- (7). 竹田他 ニューラルネットワークを用いた高速搬送紙幣の識別. 電学論文C, 112巻4号 平成4年4月.
- (8). 増田他 磁気抵抗素子によるポテンシオ(1). 昭和52年電気通信学会 全国大会 217.
- (9). Noboru Masuda Contactless Magnetoresistors Potentiometers Achieve Impossible Applications. JIEE may '77 PP.24.
- (10). Noboru Masuda, Temperature Dependence of Divided Potential Circuit Comprised of N-type InSb Magneto Resistance Element. Proceeding of 1st Sensor Symposium 1981. pp. 297-301.
- (11). 増田他 コンビネーション磁気抵抗素子 52年電気通信学会全国大会 218.
- (12). 藤定 広幸 InSb磁気抵抗素子における基礎的效果に関する研究 電総研研究報告, 第791号 昭和53年10月.
- (13). 藤定 広幸 プレーナ磁気抵抗素子の形状効果, 電気通信学会研究会 CPM78-10 1978.
- (14). 電気音響(株) ホトエッチングを用いた磁電変換素子に関する工業化試験 通産省重要研究終了報告書 44, 10, 857 昭和45年4月30日.
- (15). 西田他 ウエハー加工に伴う抵抗値分布 電気音響(株)技術資料 昭和49年.
- (16). 増田, 大澤, 戸蒔 半導体磁気センサアレー 電気学会 100周年 記念講演会, センサ技術研究会資料 S7-88-1(1988/8/24).

増田 昇(正員)

学客員研究員, 電子情報通信学会, 電気学会, 次世代センサ協議会会員。

昭和36年3月工学院大学電気工学科卒業電気音響(株)入社, 3値パルス伝送方式の研究, 模写通信方式, 透明媒体を用いた静電記録の研究, 半導体磁気センサ等の開発に従事(株)村田製作所入社後は, 磁気センサアレーの開発, セラミック共振形静電センサの開発に従事, 同所 定年退職, 現在, 京都科学技術学園顧問, 工学院大学客員研究員。

根岸照雄(正員)

昭和41年3月工学院大学電気工学専攻修士課程終了, 昭和61年同大学電気工学科教授, この間一貫して応用計測に関する研究とセンサ工学に関する研究に従事, 工学博士, 日本応用磁気学会, 計測制御学会, 電気学会会員。