

Siホール素子を用いた高性能な磁気センサ

High-Performance Magnetic Sensor Technologies Using Si Hall Elements

武田 徹 倉島 杏子 望月 美穂

■ TAKEDA Toru ■ KURASHIMA Kyoko ■ MOCHIZUKI Miho

近年、磁気センサは、開閉機構を持つ携帯電話やノートPC（パソコン）、手振れ補正機能を持つデジタルカメラやデジタルビデオカメラなど電子機器に広く使用されるようになってきた。これらの磁気センサは、検出素子に化合物系ホール素子が多く用いられているが、小型・低コスト化が難しいという課題があった。

東芝は、化合物系ホール素子に代わり、シリコン（Si）ホール素子を検出素子とするSiモノリシック磁気センサを開発した。一つのSiチップ上にSiホール素子と回路を形成し、この回路を用いてSiホール素子を使用するうえでの課題を解決することでモノリシック化することができた。化合物系ホール素子に代わる小型で、低コストかつ高性能な磁気センサとして、幅広いニーズに対応できる。

In recent years, magnetic sensors have come to be used in various applications including opening/closing detection systems in cellular phones and notebook PCs, and image stabilizing systems in digital cameras and digital video cameras. Although compound semiconductor Hall elements are widely used as the magnetic transducer in such systems, it is difficult to reduce the overall size and cost due to the need for additional circuits for signal amplification and so on.

Toshiba has developed compact, low-cost, monolithic magnetic sensors offering high performance, using silicon (Si) Hall elements as the magnetic transducer. These magnetic sensors consist of a Hall element and electrical circuits, which have been newly developed to solve problems in the practical use of Si Hall elements, in one Si chip.

1 まえがき

磁気センサのキーパーツとして、ホール効果を利用したホール素子が多く使用されている。ホール効果とは、電流が流れている物体に磁場をかけると磁束密度に応じた電圧が発生する現象である。従来の、ホール素子を用いた磁気センサは、磁気電気変換のための化合物半導体ホール素子と、信号増幅などのための付加回路で構成されている。ホール素子とSi ICのハイブリッド構成となっている場合もあるが、小型化、低コスト化の面で課題があった。

東芝は、これらの課題を解決するため、一つのSiチップ上に回路と同時に作製したSiホール素子を用いたモノリシックタイプの小型で、低コストかつ高性能な磁気センサを開発した。ここでは、磁気センサの概要と、Siモノリシック磁気センサを実現するために開発した回路技術について述べる。

2 磁気センサの概要

磁気センサは、大別すると磁場の有無に応じた論理値を出力するデジタル出力磁気センサと、磁束密度に比例したアナログ信号電圧を出力するリニア出力磁気センサとに分けられる。デジタル出力磁気センサは主に開閉の検知に用いられ、リニア

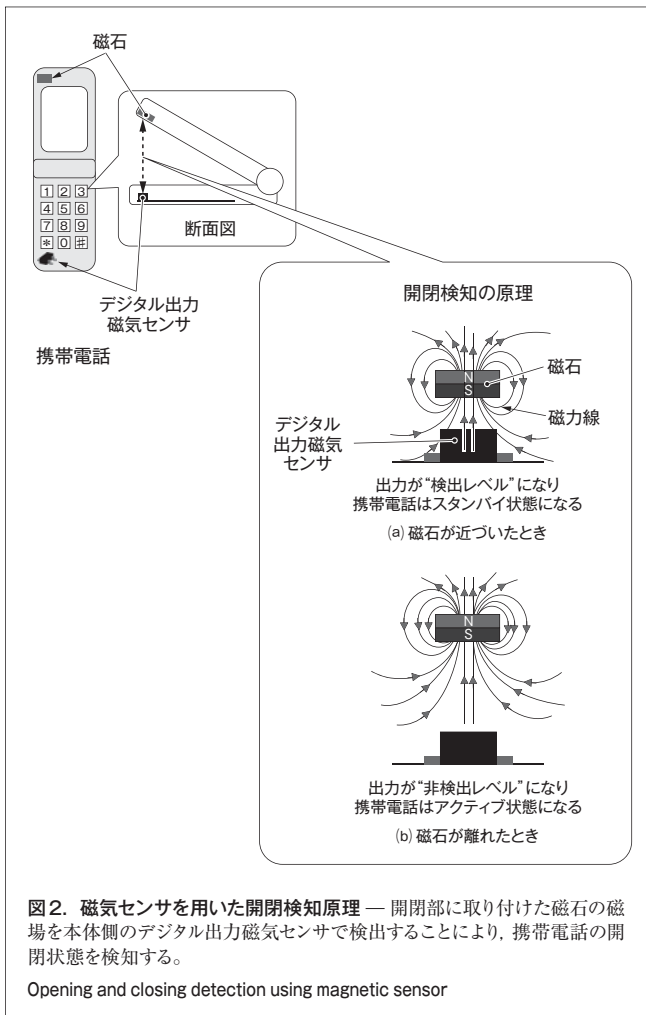
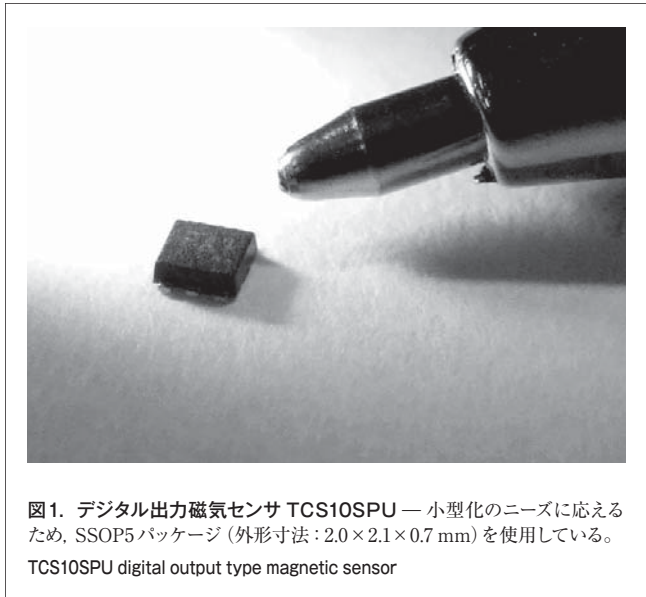
出力磁気センサは主に位置の検出に用いられている。

2.1 デジタル出力磁気センサ

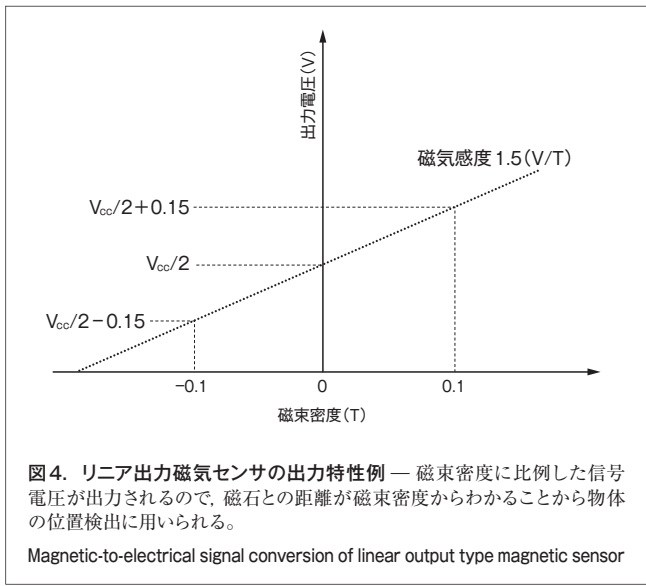
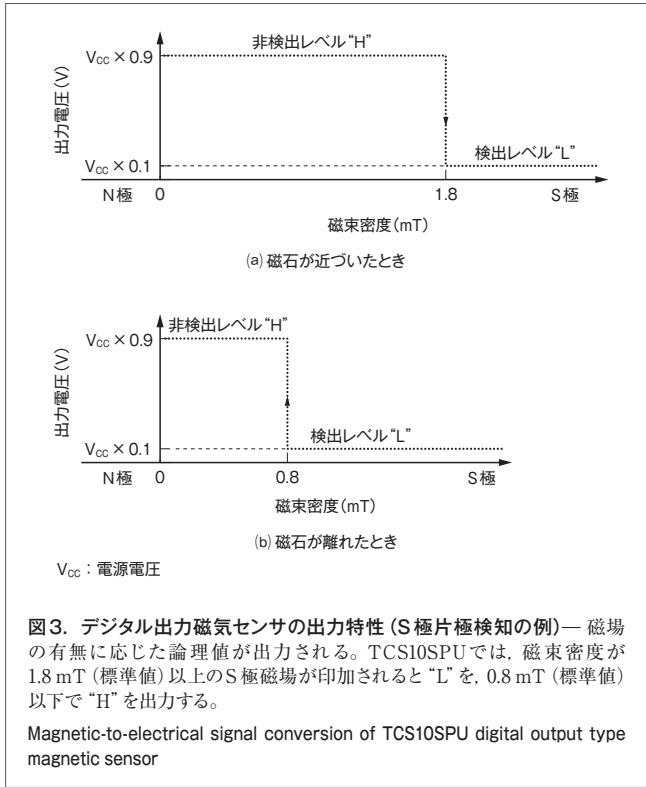
携帯電話やノートPCのディスプレイなどの開閉検知には、従来、メカニカルスイッチ式の開閉検知方式が採用されていた。しかし、スイッチの耐久性に難点があること、また取付けの際、筐体（きょうたい）に開けた穴からほこりや水などが混入し信頼性が低下するという問題もある。そのため近年では、信頼性、更にはデザイン性向上のため、磁気式の開閉検出が主流となっている。

磁気式の開閉検知機構では、開閉部に磁石、その反対側に磁気センサ（図1）が搭載される。携帯電話を例に、開閉検知原理を図2に示す。開閉部が開いた状態では、磁気センサは磁石から離れているため磁場非検出状態で、開閉部が閉じて磁石に接近するとその磁場を検知し磁場検出状態となる。磁気センサの出力を読み取ることによって開閉状態を認識できる。

このような用途で用いられるデジタル出力磁気センサは、磁場の有無に応じた論理値を出力する。当社が開発したTCS10SPU（S極の片極検知）を例に説明する（図3）。磁束密度が1.8 mT（標準値）以上のS極磁場が印加されると検出状態になって検出レベル“L（ロー）”を出力し、磁束密度が0.8 mT（標準値）以下になると非検出状態になって非検出レベル“H（ハイ）”を出力する。



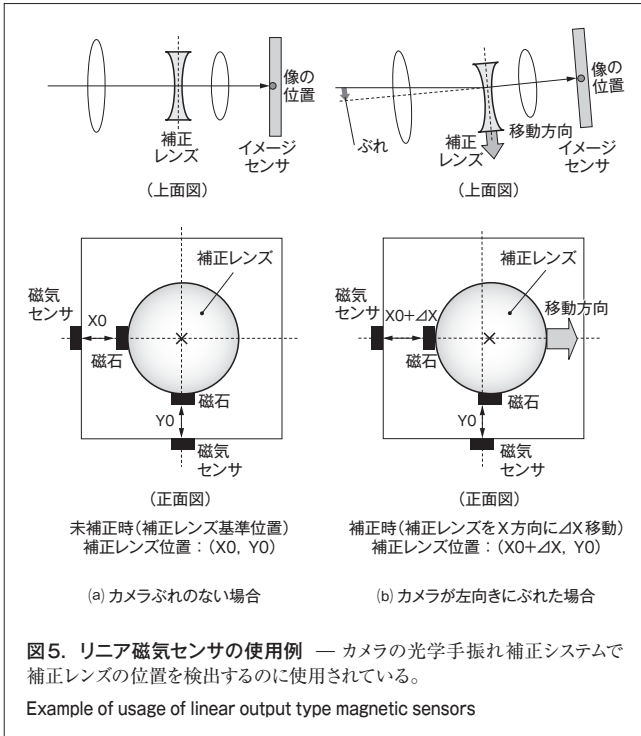
デジタル出力磁気センサは、携帯電話やノートPCのほか、最近ではデジタルビデオカメラでもモニタの開閉検知用に使用されるなど、様々な用途で需要が高まってきている。



2.2 リニア出力磁気センサ

リニア出力磁気センサは、磁束密度に比例した信号電圧を出力する（図4）。磁束密度から磁石との距離がわかるため、物体の位置を検出する用途で用いられる。その中でも近年、カメラの光学手振れ補正用として需要が増えている。

デジタルカメラやデジタルビデオカメラの高性能化に伴い、既に約90%の製品に光学手振れ補正機能が搭載されている。光学手振れ補正機構は、角速度センサで検出した手振れの大きさに応じて補正レンズを動かし、イメージセンサ上の像



の位置が一定になるように制御する(図5)。このとき、補正レンズの位置を検出する目的でリニア出力磁気センサが用いられている。今後携帯電話でも搭載したカメラのレンズ性能向上のために、更にこの用途向けの需要が増大する可能性がある。

現在は、リニア出力磁気センサの磁気電気変換素子として温度特性などの性能面からガリウムヒ素(GaAs)ホール素子が多く採用されている。

3 半導体ホール素子の特性

ホール素子を用いた磁気センサで利用しているホール効果は、磁場の中のキャリア(担体)が受けるローレンツ力により生じる現象である。半導体ホール素子に電流を流し、電流に対して垂直な磁場をかけると、キャリアには電流方向と磁場方向の両方に直交する向きのローレンツ力が発生する。その力によってキャリアが移動することで電荷分布が偏り電場が発生する。このとき発生する電場を、ホール電場 E_H と呼ぶ。電流密度を J 、磁束密度を B とすると、 E_H は(1)式で表わされる。

$$E_H = R_H JB \quad (1)$$

ここで、 R_H をホール係数と呼ぶ。半導体ホール素子に流れる電流を I 、電流方向に垂直な端子間の距離を d とすると、この端子間に発生する電圧(ホール起電力) V_H は(2)式で表わされる。

$$V_H = R_H JBd = R_H BI \quad (2)$$

すなわち、半導体ホール素子を一定電流で駆動した場合の V_H は R_H に比例する。キャリア濃度を n 、キャリアの電荷を q とすると、 R_H は(3)式で表わされる。

$$R_H = 1 / (nq) \quad (3)$$

n はキャリア移動度 μ と電気伝導率 σ を用いて、

$$n = \sigma / (q\mu) \quad (4)$$

と表わされることから、(3)式と(4)式より

$$R_H = \mu / \sigma \quad (5)$$

となる。 R_H は μ に比例し σ に反比例する、すなわち、半導体ホール素子の物理的特性で定電流駆動時の V_H に影響するのは、(2)式と(5)式から μ と σ であることがわかる。

磁気センサは磁場検知の感度及び精度が高いことが必要であるため、 R_H が大きく磁気感度が高いこと、 R_H の温度依存性が少なく磁気感度が温度の影響を受けにくいことが求められる。 R_H は μ が高ければ大きくなるので、半導体ホール素子は正孔よりも μ が高い電子をキャリアとするn型半導体で形成される。また、 R_H の温度依存性はバンドギャップが広いほど小さくなる⁽¹⁾。

これらより、半導体ホール素子の材料としては表1に示すように、高精度用途ではバンドギャップが広いため R_H の温度依存性が小さいGaAsが用いられる。また高感度用途では、 μ が高いインジウムアンチモン(InSb)が用いられており、Siは μ が低い場合ホール素子単体では用いられていない。

しかし、製造コスト及び環境配慮の観点から、既存の半導体プロセスで製造できるSiを用いた磁気センサの開発が求められるようになってきており、当社は、このような要求に合致する低コストと低環境負荷を実現できるSiモノリシック磁気センサを開発した。

表1. 半導体のキャリア移動度とバンドギャップ
Carrier mobility and band gap of semiconductor materials

半導体組成	室温における移動度 μ (cm ² /Vs)		バンドギャップ E_g (eV)	
	電子	正孔	E_g (0 K)	E_g (300 K)
Si	1,350	480	1.17	1.11
GaAs	8,000	300	1.52	1.43
InAs	30,000	450	0.43	0.36
InSb	82,000	750	0.23	0.17

InAs: インジウムヒ素

出典: Kittel, C. 固体物理学入門第7版(上)⁽¹⁾

4 Siモノリシック磁気センサの高性能化

Siモノリシック磁気センサを実現するにあたり、高性能化のための課題に対して開発した回路技術について述べる。

4.1 Siホール素子を用いるうえでの課題

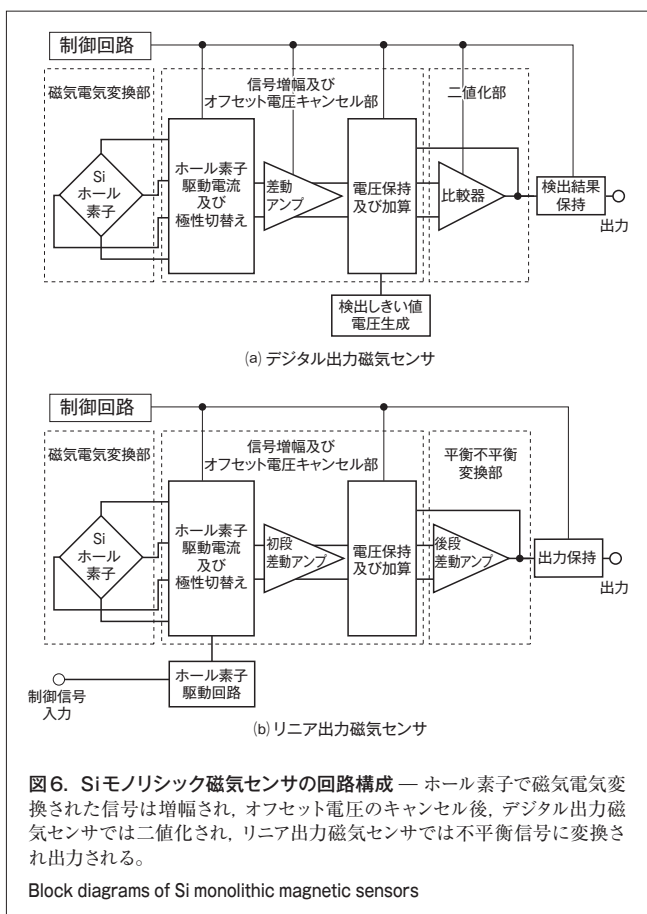
Siホール素子を用いてSiモノリシック磁気センサを開発するうえでの大きな課題は、オフセット電圧（不平衡電圧）と磁気感度の温度係数の2点である。

オフセット電圧は、入力信号がゼロのときに発生している電圧で、信号に対する誤差となる。Siホール素子の感度が低いため、検知が必要な磁束密度での V_H は、Siホール素子及びアンプが持つオフセット電圧より小さな値しか得られないので、Siホール素子の出力をそのまま増幅しても磁気センサを実現できない。また、これらのオフセット電圧はSiホール素子やトランジスタの製造過程で生じるばらつきや、応力によって起こるピエゾ抵抗効果により発生するため、製品ごとにばらついた値となり容易に補正できない。このため、これらのオフセット電圧をキャンセルする回路を新たに開発した。

一方、磁気感度の温度係数は、特にリニア出力磁気センサの場合に重要となる。温度係数が大きいと、同じ磁束密度に対する出力電圧が温度によって大きく変化し、信号に対する誤差となる。温度依存性を小さくするため、温度補償機能を持たせたホール素子駆動回路を新たに開発した。

4.2 回路構成

前述の機能を盛り込んで開発したSiモノリシック磁気センサの回路構成を図6に示す。



Siホール素子に発生した V_H はオフセット電圧のキャンセル機能を持った信号増幅部（図6の信号増幅及びオフセット電圧キャンセル部）で増幅され、同時にオフセット電圧がキャンセルされる。デジタル出力磁気センサの場合（図6(a)）、増幅された信号は磁場の検出しきい値に相当する基準電圧と比較され、磁場の有無に応じて二値化され出力される。一方、リニア出力磁気センサの場合（図6(b)）、平衡不平衡変換部で不平衡出力に変換され出力される。

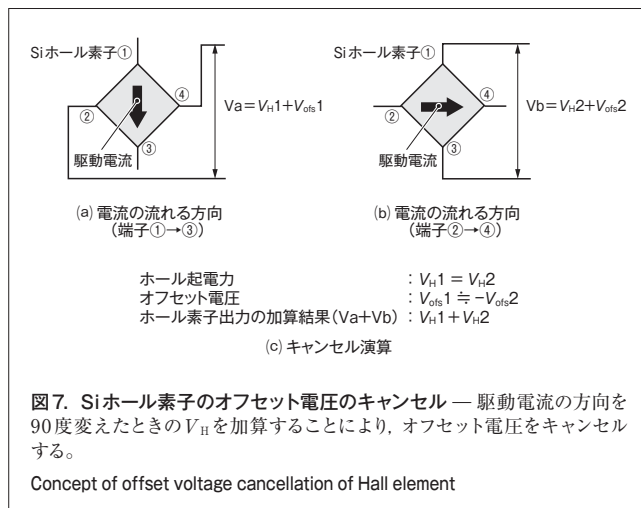
オフセット電圧のキャンセルなど回路全体の動作は、制御回路でコントロールされている。また、リニア出力磁気センサの場合は感度を可変にできるホール素子駆動回路を持っており、この回路で温度補償が行われる。

4.3 オフセット電圧の低減

開発したSiモノリシック磁気センサは、Siホール素子、差動アンプ、及び比較器で各々オフセット電圧のキャンセル動作を行い、オフセット電圧を低減している。

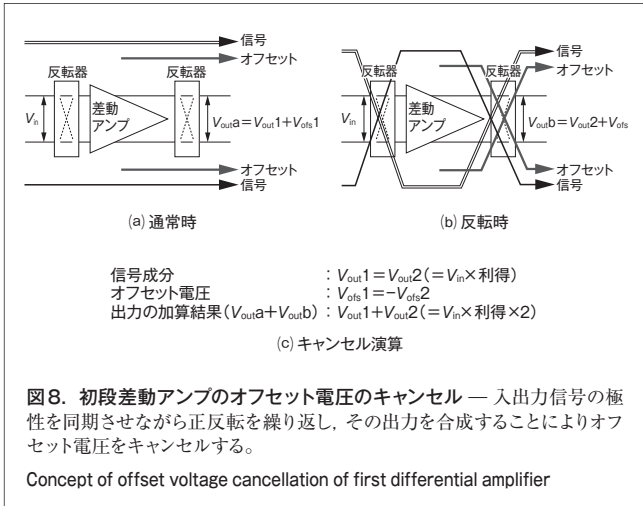
4.3.1 Siホール素子のオフセット電圧

四隅に端子を持つ正方形のホール素子は、図7に示すように、駆動電流の方向を90度変えたとき、 V_H は変わらずに、オフセット電圧は極性が反転し絶対値はほぼ同じという特性を持っている。この特性を利用して、駆動電流の方向を90度変えたときの出力電圧を加算することで、Siホール素子のオフセット電圧をキャンセルしている。



4.3.2 差動アンプのオフセット電圧

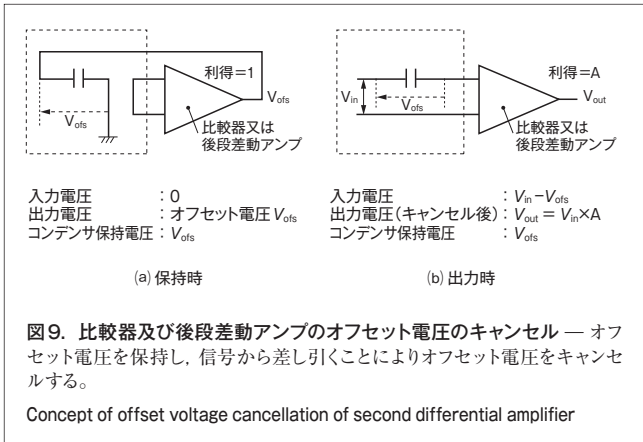
差動アンプのオフセット電圧は、図8に示すように、差動アンプの入力信号と出力信号の極性を同期させながら正反転を繰り返す、その出力を合成することでキャンセルしている。信号成分が反転されて差動アンプに入力されたときは出力後に再度反転されるので、出力される信号の極性はいつも変わらない（図8(b)）。しかし、差動アンプで発生したオフセット電圧は出力側だけで反転されるので、反転時の極性は通常時と逆極性となる。最後



に通常時と反転時の出力信号を加算することで、差動アンプのオフセット電圧をキャンセルしている。

4.3.3 比較器及び後段差動アンプのオフセット電圧

比較器及び後段差動アンプのオフセット電圧は、まず、図9に示すように、入力信号をゼロにしてオフセット電圧だけを出力させてこの値を保持し、次に信号から保持したオフセット電圧を差し引くことでキャンセルしている。



4.4 磁気感度の温度依存性改善

磁気感度の温度係数を小さくするため、リニア出力磁気センサではホール素子駆動回路に温度補償機能を持たせている。

ホール素子は、定電流で駆動した場合、ホール効果に関係する μ とホール素子の抵抗成分に関係する μ が相殺され、定電流で駆動するよりも温度係数が小さくなる。この特徴を生かして、リニア出力磁気センサのホール素子駆動回路は定電流駆動型としている。また、温度係数を更に小さくするために、駆動電流の温度係数を調整できる駆動回路を設計した。駆動電流の温度特性を V_H の温度特性を打ち消すように設定することで、磁気感度の温度係数を更に小さくすることが可能になった。

4.5 そのほかの特長

Siモノリシック磁気センサは回路部を持っているため、様々な機能を持たせることが可能である。

デジタル出力磁気センサでは、開閉検知に用いられる場合、特に低消費電流であることが要求される。今回開発したセンサでは間欠動作を行うことによって消費電流を低減している。磁気検出動作を1秒間に約20回実施し、検出動作を行っていないときには検出回路の電源を遮断することで消費電流の低減を実現した。

一方、リニア出力磁気センサは、制御端子を設けてここに印加された制御電圧に応じてホール素子の駆動電流を変えることにより、磁気感度を任意に設定できる機能を持たせている。ホール素子単体でも駆動電流を変えることにより感度を任意に設定する用途があるが、この場合、電圧制御の定電流駆動回路が別途必要となる。更に、この駆動回路の温度特性も適切な値にしなければ良好な温度特性を得ることはできない。

5 あとがき

Siホール素子を採用したモノリシックタイプの小型で、低コストかつ高性能な磁気センサを実現させるために、当社が開発した技術について述べた。

今後はこのSiモノリシック磁気センサの開発で培った技術を生かし、更に市場のニーズを満たす製品開発を進めていく。

文献

- (1) Kittel, C. 固体物理学入門第7版(上). 東京, 丸善, 1998, 386p.



武田 徹 TAKEDA Toru

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 先端集積デバイス開発部主務。アナログICの設計に従事。
Discrete Semiconductor Div.



倉島 杏子 KURASHIMA Kyoko

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 小信号半導体応用技術部。アナログICの応用技術の開発に従事。
Discrete Semiconductor Div.



望月 美穂 MOCHIZUKI Miho

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 先端集積デバイス開発部。アナログICの開発に従事。
Discrete Semiconductor Div.