サブミクロンプロセスで製造された2次元集積化磁気センサにおける感度特性に関する研究

Investigation of Sensitivity of Two-Dimensional Integrated Magnetic Sensor Fabricated in Sub-micron CMOS Process

正会員 木村 孝之[†], 古谷 仁^{††}, 増澤 徹[†]

Takayuki Kimura[†], Hitoshi Furuya^{††} and Toru Masuzawa[†]

Abstract To realize a high-resolution two-dimensional integrated magnetic sensor, the process rule was changed from 0.35 to 0.18 μm . The fabricated magnetic sensor was an n-type Hall sensor that uses an inversion layer under the gate oxide of the MOSFET. The decided sensor area size was $6.6 \times 6.6 \mu\text{m}^2$. The Hall sensors were arrayed in 32×32 pixels. The average sensitivity of the fabricated magnetic sensors was $34.6 \text{ mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$, and this value was the same as that of fabricated magnetic sensors in the $0.35 \mu\text{m}$ standard CMOS process. No degradation of sensitivity was introduced to a magnetic sensor fabricated in 0.18 μm process rule. From the result of two-dimensional integrated magnetic sensor, two-dimensional magnetic flux distribution was successfully measured from the 1-mm diameter Nd-Fe-B rare-earth permanent magnet. By changing the position of the probe that measures Hall voltage, the sensitivity of magnetic sensors was increased by 17%.

キーワード: CMOS, ホールセンサ, 2次元磁気センサ, 磁束像, 位置検出, 微細化

1. ま え が き

QOL(Quality of Life)向上を目指して人工心臓の開発が行われている。人工心臓では耐久性向上を目指し、磁気浮上型モータを適用することが検討されている。このような磁気浮上系は負のバネ定数を持つため、その実現にはフィードバック制御が不可欠であり、浮上インペラの位置を計測するために複数の磁気センサが必要となる。しかし、デバイスの耐久性、小型化の観点からセンサは可能な限り少なくかつ小さくしたい。このようなスペースの問題を解決し、小型化を実現するために集積化2次元磁気センサシステムが考案されている¹⁾²⁾。このセンサシステムでは、n形MOSトランジスタの反転層の電子にHall効果を起こし、磁束の測定を行う³⁾。これまでの研究で、 64×64 画素を持つ2次元磁気センサ¹⁾において、3000rpmで回転するモータの検出に必要なフレームレート7813frame/secを実現した²⁾。これらの研究により、3000rpm程度で回転するモータの制

御への可能性が示されたが、制御の対象となるモータ軸の振動の振幅は0.1mm以下であるため、さらなる磁気センサの微細化が必要である。

これまで、磁気センサの微細化のために、0.8 μm プロセスで製造されたホールセンサに関する研究が行われ⁴⁾、また、構造に関する指針も示されている⁵⁾。しかし、より微細なホールセンサに関する研究は行われていない。

本研究では、磁気浮上型モータの制御に必要な分解能を実現するために、磁気センサの微細化と最適化の検討を行う。まず、センサの製造プロセスを変更し、微細化したセンサを試作する。つづいてその特性を評価し、微細化の実現可能性について検討を行う。

2. 画素構造と読出し回路

本研究では、画素の微細化が感度に及ぼす影響を調べるため、試作チップは0.18 μm 標準CMOSプロセス(以下0.18 μm プロセスと略)ルールで設計された。プロセスルールの変更によりセンサの特性の変化が起きるため、センサの構造は0.35 μm 標準CMOSプロセス(以下0.35 μm プロセスと略)で試作されているセンサから大きく変えない方針で設計した。そのため、0.35 μm プロセスでのセンサから1/4縮小、つまり磁気センサの大きさを $6.6 \times 6.6 \mu\text{m}^2$ とし、画素のサイズを $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ とした(図1(a))。さらに、ホール電圧を測定する端子(以下ホール端子と略)の位置を

2010年10月1日受付, 2011年1月12日再受付, 2011年1月19日採録

[†]茨城大学 工学部

(〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1, TEL 0294-38-5201)

^{††}茨城大学 大学院 理工学研究科

(〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

[†]Faculty of Engineering, Ibaraki University

(4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan)

^{††}Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

(4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan)

図 1 ホールセンサの構造. (a) は磁気センサアレイでの端子位置. (b) は TEG での端子位置.

Structure of Hall sensor. The position of Hall probes in (a) sensor array and (b) TEG.

図 3 試作された磁気センサ
Photograph of a fabricated sensor.

図 2 磁気センサから読み出し出力までの回路
Circuit from Hall sensor to readout.

表 1 試作されたセンサの仕様
Specification of the fabricated sensor.

Process technology	0.18μm, 1P5M standard CMOS
Active area size	0.8×0.8mm ²
Pixel size	25×25μm ²
Hall element size	6.6×6.6μm ²
Operation voltage	1.8V

変化させた画素 TEG(Test Element Group) を配置し、最も高い出力電圧が得られる位置を調査できるようにした(図 1(b)). ホール端子はソースドレインの中心からドレイン側に 0.6μm 単位で最大 2.4μm ずらした. また、微細化した画素で画像を取得するための 32×32 画素からなる磁気センサアレイを配置した.

図 2 に磁気センサから出力までの回路を示す. 磁気センサには、ホール端子が 2 個配置されている. ホール端子からの出力は、画素内の p-MOS ソースフォロアで選択・増幅後、列に配置された n-MOS ソースフォロアで選択と増幅が行われる. 32 列の出力信号は時系列に選択された後、オフチップのオペアンプによるボルテージフォロアを通過し、差動アンプにより増幅される. 磁気センサで発生するオフセットは、磁束印加後の信号から磁束印加前の信号を引くことにより除去される.

3. 試作チップと測定方法

図 3 に試作したチップ写真を、表 1 にその仕様を示す. 本チップ内で最も高速に動作するデジタル回路は水平シフトレジスタである. フレームレートを上げると水平シフト

レジスタの動作周波数が上がり、スイッチングノイズが増加してしまう. 本チップではアナログ回路へのスイッチングノイズの影響を防ぐために、水平シフトレジスタの動作周波数をシグナルゼネレータの最低発振周波数の 12.5kHz とした. この時のフレームレートは 12frame/sec であった. チップからの信号は、オフチップの差動アンプで 20 倍に増幅後、14 ビット AD 変換器でデジタル信号に変換され、パーソナルコンピュータ (PC) に送られる. PC ではオフセット除去と画像への再構成が行われる. 磁気センサの感度特性に関しては、均一磁場を得られる磁気回路により印加する磁束密度を 0.45T として測定を行った. 2 次元磁束分布の撮像対象は直径 1mm、長さ 10mm の円筒型ネオジム磁石とし、磁石の中心を磁気センサアレイの右上角とした. また、チップ表面から磁石までの距離は 1mm とした.

4. 結果と考察

4.1 微細化した磁気センサの諸特性

まず試作した磁気センサの感度を、均一磁場を発生させる磁気回路により測定した. 製造プロセスの違いによる出力電圧の変化の測定結果を図 4 に示す. 0.18μm プロセスで製造されたセンサの大きさは、0.35μm プロセスで製造されたホールセンサの大きさの 1/4 であり、電源電圧は 1.8V

図 4 製造プロセスの違いと出力電圧
Output voltage from a sensor fabricated by different processes.

図 5 磁石を測定した際の復元画像
Reproduced image of magnetic field from a magnet.

表 2 端子位置をずらして試作されたセンサの出力電圧
Output voltage of the fabricated sensor with different geometry of Hall probes.

offset(μm)	0	0.6	1.2	1.8	2.4
output voltage(mV)	65.7	71.2	75.0	77.0	74.6
increasing ratio(%)	0	+8.4	+14.2	+17.2	+13.5

Magnetic Flux Density : 0.45T

に低下している。それにも関わらず、ほぼ同じ大きさの出力電圧が得られていることがわかる。感度の平均値は $0.18\mu\text{m}$ プロセスでは $34.6\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ であり、 $0.35\mu\text{m}$ プロセスでは $27.0\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ であった。この結果から感度が製造プロセスの微細化により低下しないことが確認できた。

図 5 に、磁気センサアレイの右上に直径 1mm の磁石を近づけた際の撮像結果を示す。この画像から、磁石からの磁束を円状の分布として確認できる。よって、 $0.18\mu\text{m}$ プロセスで製造された磁気センサアレイでも、 $0.35\mu\text{m}$ プロセスで製造されたセンサと同様に磁束像を測定できることが確認できる。さらに、微細化により、1 画素が $25\times 25\mu\text{m}^2$ となり、 $0.35\mu\text{m}$ プロセスで製造されたセンサの 4 倍の解像度を実現できたと言える。なお、図 5 には 10mV 程度のバラツキが見られる。オフセットは測定の際に除去しているため、これはランダム雑音と感度のバラツキによって生じていると考えられる。また、フレームレートを 7813frame/sec まで上げるとスイッチングノイズにより S/N 比が悪化してしまった。そのため、今後高フレームレートを実現するためには、アナログ回路とデジタル回路との分離方法についてさらに検討する必要がある。

4.2 出力端子位置による出力電圧の変化

n 形 MOS トランジスタの反転層を使用するホールセンサでは、ホール端子が図 1(a) のように、MOSFET のソースとドレインの間に対向するように配置されている。これまでの報告⁴⁾⁵⁾では、このホール端子をソースドレインの中心から 20%ドレイン側に近づけることで、最大のホール電圧が得られている。本研究での結果を表 2 に示す。この結果から最大の感度を得られているのは、ホール端子をドレイン側に $1.8\mu\text{m}$ (27%) ずらした場合であり、これまでの報告の 20%と同じ傾向であることがわかる。このことから、 $0.18\mu\text{m}$ プロセスでもホール端子をドレイン側に配置する事により、17%の感度向上が見込まれる。以上の検討から、さらなる微細化の際にもホール端子の位置の最適化は必ず検討すべき項目になると考えられる。

5. む す び

2 次元集積化磁気センサの解像度を上げるため、磁気センサの微細化を検討した。CMOS 製造プロセスルールを $0.35\mu\text{m}$ から $0.18\mu\text{m}$ に変更する事で微細化を実現した。プロセスルールの変更に伴いセンサの特性の変化が起こりうると考え、センサの大きさは $0.35\mu\text{m}$ プロセスの $1/4$ の $6.6\times 6.6\mu\text{m}^2$ とした。感度を測定したところ $34.6\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ であり、 $0.35\mu\text{m}$ プロセスでの感度 $27.0\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ から減少することはなかった。また、2 次元集積化磁気センサの撮像結果から、 $0.18\mu\text{m}$ プロセスで製造した磁気センサによって $0.35\mu\text{m}$ プロセスで製造した磁気センサと同様の磁束分布を測定できることを確認した。さらに、ホール端子の位置を変更することにより、感度を 17%上昇可能であることを確認した。以上の結果から、プロセスルールを変更しても感度の低下を招くことなく微細化が可能であることが明らかとなった。

最後に、本研究は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、ローム (株)、凸版印刷 (株)、シノプシス株式会社、日本ケイデンス株式会社およびメンター株式会社の協力で行われたものである。

〔文 献〕

- 1) T. Kimura, K. Takasaki, T. Masuzawa : "Characteristics of a Two-dimensional Integrated Magnetic Sensor for Position Sensing and Motor Control", IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, **1**, 2, pp. 188-193 (2006)
- 2) 木村, 横山, 増澤 : "二次元集積化磁気センサのフレームレート向上に関する研究", 映像学誌, **64**, 3, pp. 416-418 (2010)
- 3) R. V. Gallagher and W. S. Corak : "A Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) HALL Element", Solid-State Electronics, **9**, pp. 571-580 (1966)
- 4) H. M. Yang, Y. C. Huang, T. Fu Lei, C. L. Lee, S. C. Chao : "High-resolution MOS magnetic sensor with thin oxide in standard submicron CMOS process", Sensors and Actuators **A** **57**, pp. 9-13 (1996)
- 5) N. Mathieu, P. Giordano, A. Chovet : "Si MAGFETs optimized for sensitivity and noise properties", Sensors and Actuators **A** **32**, pp. 656-660 (1992)

木村 孝之 1998 年、豊橋技術科学大学大学院博士後期課程修了。同年、茨城大学工学部助手。現在、同大学准教授。撮像デバイス、画像信号処理システム、デバイス材料などの研究に従事。博士 (工学)。正会員。

古谷 仁 2009 年、茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程システム工学専攻修了。現在新日本無線 (株) に勤務。

増澤 徹 1987 年、東京電機大学大学院理工学研究科博士課程応用システム工学専攻単位取得後満期退学。1987 年、東京大学工学部精密機械工学科助手。1996 年、国立循環器病センター研究所人工臓器部人工臓器研究室室長を経て現在茨城大学工学部教授。工学博士。医工学 (人工心臓用磁気浮上型モータ) に関する研究に従事。