

HIGH PRECISION MINIATURIZED MAGNETIC ANGULAR ENCODER

THÈSE N° 2269 (2000)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Frédéric BURGER

Ingénieur en microtechnique diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Freienwil (AG)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. S. Popovic, directeur de thèse
Dr F. Gueissaz, rapporteur
Prof. J. Korvink, rapporteur
Prof. R. Siegwart, rapporteur

Lausanne, EPFL
2000

CONTENT

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 1 |
| Résumé | 3 |
| 1 Introduction | 5 |
| 1.1 Motivations | 5 |
| 1.2 How to Measure an Angular Position? | 6 |
| • Mechanical | 7 |
| • Resistive | 8 |
| • Inductive | 9 |
| • Capacitive | 10 |
| • Optical | 11 |
| • Magnetic | 12 |
| • Solutions summary | 15 |
| 1.3 The Concept | 16 |
| 1.4 The Challenge | 18 |
| 1.5 The Content of the Thesis Research | 19 |
| 2 Basics of the Hall Effect | 23 |
| 2.1 Hall Effect: Plate as Sensor | 23 |
| 2.2 Hall Effect: Material Properties | 26 |
| • Modified resistivity | 27 |
| • Scattering effect | 29 |
| • Anisotropy effect | 31 |
| • Mean s-power of the relaxation times | 34 |
| • Numerical values | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 Hall Effect: from Material Properties to Device Sensitivity . . . | 37 |
| 2.4 Design of Vertical Hall Sensors | 40 |
| 2.5 Conform Mapping and Geometrical Correction Factor | 43 |
| • Conform mapping | 43 |
| • Geometrical correction factor | 44 |
| 2.6 Junction Field Effect | 45 |
| 2.7 Conclusions | 46 |
| 3 Angular Encoder Microsystem | 49 |
| 3.1 Optimized Magnetization and Sensor Position | 49 |
| • Magnet characteristics. | 49 |
| • Sensors centered below the magnet. | 50 |
| • Sensors off-centered below the magnet. | 52 |
| • Sensors at the periphery of the magnet | 54 |
| • Our choice | 55 |
| 3.2 Multidimensional Hall Sensors | 56 |
| • 2-D vertical Hall sensor (VH2D) | 57 |
| • 3-D Hall sensor (VH3D) | 58 |
| • Stability and strain influence. | 59 |
| • Symmetrical sensor design | 61 |
| • Electronic solutions for the sensor use | 62 |
| • Sensor characteristics | 63 |
| • Prototype of an angular position encoder | 67 |
| 3.3 Signal Processing of the Angular Position | 69 |
| • Mathematical method (arctangente) | 69 |
| • Phase shift method | 72 |
| • Cordic Algorithm | 74 |
| • Summary | 75 |
| 3.4 Improvements of the Measurement Precision | 76 |
| • Magnet influences | 76 |
| • Mechanical Influences. | 77 |
| • Sensor behavior influences | 79 |
| • Error source summary | 83 |
| 3.5 Contactless Potentiometer: an Industrial Product | 83 |
| 3.6 Conclusion | 86 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Control of Brushless Micromotors | 87 |
| 4.1 | Brushless Micromotors | 87 |
| 4.2 | VH-Sensor with 3 Branches (VH120). | 90 |
| | • Prototype with discrete sensors | 90 |
| | • New integrated Y-shaped VH-sensor | 91 |
| 4.3 | Sensor Assembly | 99 |
| 4.4 | Electronic Circuit. | 102 |
| 4.5 | Performances Improvements | 105 |
| 4.6 | Conclusion | 110 |
| 5 | Other Applications | 111 |
| 5.1 | Compass. | 111 |
| 5.2 | Measurements in Hostile Environment | 114 |
| 5.3 | Angular Position Encoder with Crossing Shaft. | 117 |
| 5.4 | Inclinometer. | 120 |
| 5.5 | Joystick | 123 |
| | • Single sensor solution for pitch and roll measurement | 123 |
| | • Multiple sensors solution with force feedback | 125 |
| 6 | Anisotropy in Silicon Hall Sensors | 131 |
| 6.1 | Measurements Definitions. | 132 |
| | • Unidimensional vertical Hall sensors | 132 |
| | • Unidimensional CMOS Hall plates sensors | 133 |
| 6.2 | Vertical Hall Sensor Measurements | 135 |
| | • Sensitivity for perpendicular magnetic field | 135 |
| | • Rotation of the magnetic field | 137 |
| | • Angular shift as function of the magnetic field amplitude | 139 |
| | • Practical considerations | 139 |
| 6.3 | CMOS Hall Plate Measurements. | 141 |
| | • Sensitivity for perpendicular magnetic field | 141 |
| | • Rotation of the magnetic field | 142 |
| | • Planar Hall effect. | 143 |
| | • Practical considerations | 145 |

| | |
|---|------------|
| 6.4 Modeling of Material-Related Non-Linearities for Hall Devices in Anisotropic Material | 146 |
| • Anisotropy effect at high magnetic fields | 146 |
| • Scattering effect at high magnetic fields | 148 |
| • Mean values of the relaxation times T_{is} | 149 |
| • Total current | 150 |
| • Special case: weak magnetic field | 151 |
| • Simulation strategy | 152 |
| 6.5 Simulation on the Vertical Hall Device | 153 |
| • Sensitivity for perpendicular magnetic field | 153 |
| • Angular shift as function of the magnetic field amplitude | 155 |
| 6.6 Simulation on the CMOS Hall Plate | 156 |
| • Sensitivity for perpendicular magnetic field | 156 |
| • Rotation of the magnetic field | 157 |
| • Planar Hall effect | 159 |
| 6.7 Conclusion | 160 |
| 7 Conclusions and Outlook | 163 |
| Appendices | 167 |
| A.1 Vectorial Permutation | 167 |
| A.2 Vectorial to Matrix Equivalence | 169 |
| A.3 Electronic Set-Ups | 171 |
| A.4 Absolute Contactless Potentiometer | 177 |
| A.5 Feedback Sensor for the Control of Micromotors | 183 |
| A.6 Compass Integrated in a Watch | 185 |
| References | 189 |
| Symbols and Abbreviations | 197 |
| Acknowledgments | 203 |
| Curriculum Vitae | 205 |

ABSTRACT

In this thesis work we have developed new knowledge in the field of magnetic angular position encoders. Particularly, new Hall sensors have been designed and fully characterized. These are 2-D Vertical Hall sensors with three branches and 3-D Hall sensors. With these analyses, we have measured the influence of the silicon anisotropy on the Hall effect for the first time. This has been confirmed theoretically. We demonstrate that the use of a magnetic solution for our angular encoders allows them to be miniaturized and contactless. They are able to measure an absolute angular position with an accuracy of more than 1 ‰ over 360°. The presented novelties also make it possible to simplify the electronic control of brushless micromotors as well as to at least double the efficiency of such motors with 5 mm diameter.

The measurement principle we use to obtain an angular position consists of measuring the magnetic field direction with Hall sensors. This magnetic field can be created in different ways, but in our case it is created by a permanent magnet. We have compared this principle with other technologies available on the market. From this review of the state of the art, we have determined that our solution is the most promising. It combines a high accuracy, small size, the contactless principle, and the 360° absolute measurement range. The requirements of such a realization imply a detailed analysis of the components of this system. We can classify these components in three categories: the permanent magnet, the sensor, and the signal processing.

A poor alignment between the permanent magnet and the sensor introduces measurement error. This can be reduced through the sensor's disposition. Regarding this consideration, we have optimized the sensor's positioning as well as the magnet geometry. The goal is to have the sensor positioned in the best homogeneous area. This is under the permanent magnet aligned with the rotation axis and the magnetic field components measurement has to be done in a single point. To this purpose, we have designed and fabricated new multidimensional Hall sensors based on the vertical Hall technology, allowing the system to fulfill the "point like" measurement requirement.

From the sensor point of view, the offset voltage, the noise, and the nonlinearities are the limiting factors for a high accuracy. The influences of the first two effects can be strongly decreased by increasing the magnetic field. However, the third one then becomes significant. That is, the high-field phenomena in the Hall element become important. The study of the high-field phenomena has allowed us to highlight the influences of the silicon anisotropy on the Hall effect. These have been successfully explained by comparing the performed measurements with the simulation results obtained by our new model. In this model we have included the anisotropy effect as well as the scattering effect. We have adapted the simulation parameters to our applications. The parameters are the sensor orientation regarding the silicon crystal axes and the direction of the magnetic field with respect to the current direction.

For the last category of the system components, different possibilities of signal processing have been analyzed. Some effects such as that of the temperature, of the offset, and of the junction field effect can be reduced or cancelled out with adapted electronic modules. These are already well known. On the other hand, many possibilities to calculate the angular position from sine shape signals exists. What emerges from this analysis is that the numerical processing is the most adapted thanks to its high accuracy, its low cost, and its low component number.

The excellent performances reached by our angular position encoder have been illustrated with three commercial applications which are partially based on the results of this thesis. These are:

- an absolute contactless potentiometer with $\pm 0.35^\circ$ accuracy over 360° . This will be soon commercialized by Novotechnik, Germany.
- a patented feedback sensor which significantly improves the performance of smooovy[®] micromotors. This is already commercialized by RMB, Switzerland.
- a compass integrated in a watch where a very small size and low power are required. This watch will be soon commercialized by Tissot, Switzerland.

RÉSUMÉ

Au cours de ce travail de thèse, nous avons développé de nouvelles connaissances dans le domaine des encodeurs magnétiques de position angulaire. En particulier, de nouveaux capteurs Hall ont été dessinés et entièrement caractérisés, tels que des capteurs Hall verticaux 2-D à trois branches et des capteurs Hall 3-D. Leur étude a permis de mettre en évidence pour la première fois l'influence de l'anisotropie du silicium sur l'effet Hall. Cette observation a d'ailleurs été confirmée théoriquement. Nous démontrons que pour mesurer une position angulaire, la solution magnétique est sans contacts et peut être miniaturisée. Cette méthode est capable d'effectuer une mesure absolue de la position angulaire avec une précision meilleure que 1 ‰ sur 360°. Les nouveautés que nous présentons rendent également possible la simplification de l'électronique de contrôle d'un micromoteur "sans-balais" tout en doublant au moins le rendement d'un tel moteur de 5 mm de diamètre.

Le principe de mesure que nous utilisons pour mesurer la position angulaire est basé sur la détermination de la direction d'un champ magnétique à l'aide d'un capteur à effet Hall. Ce champ peut être créé de différentes manières; pour notre cas, il est généré par un aimant permanent. Nous avons comparé ce principe à d'autres technologies disponibles sur le marché, cela nous a permis de constater que notre solution est la plus prometteuse. En effet, elle combine une haute précision, un faible encombrement, la mesure sans contacts et la mesure absolue d'un angle sur 360°. La réalisation d'un tel système exige une analyse détaillée de tous ses composants. Nous pouvons les classer en trois catégories: l'aimant permanent, le capteur et le traitement du signal.

Un mauvais alignement entre l'aimant permanent et le capteur génère une erreur de mesure. Elles peuvent être réduites en fonction de la disposition du capteur. Suite à cette considération, nous avons optimisé le positionnement du capteur ainsi que la géométrie de l'aimant, le but est que les capteurs soient disposés dans la zone où l'homogénéité du champ est la meilleure. C'est-à-dire que cette position se situe sous l'aimant et est alignée avec l'axe de rotation, de plus le champ magnétique doit être mesuré en un point. C'est pour cette raison que nous avons conçu et réalisé des nouveaux capteurs Hall verticaux

multidimensionnels, ils sont en effet capables de mesurer les trois composantes du champ en un seul point.

Du point de vue capteur, la tension d'offset, le bruit et les non-linéarités sont des facteurs empêchant une mesure à haute précision. Les influences des deux premiers effets sont fortement diminuées en augmentant le champ magnétique. Mais, à ce moment le troisième effet devient significatif. C'est-à-dire que les phénomènes à haut champ magnétique des éléments Hall deviennent importants. Cette étude nous a permis de mettre en évidence les effets de l'anisotropie du silicium sur l'effet Hall. Nous avons pu les expliquer avec succès en comparant les mesures effectuées avec les résultats de simulation obtenus à partir de notre nouveau modèle. Nous avons inclus dans ce modèle les effets de l'anisotropie ainsi que ceux de la "scattering". Les paramètres de simulation ont été adaptés à notre application. En effet, nous tenons compte de l'orientation du capteur avec le réseau cristallin du silicium et de la direction du champ magnétique en fonction de la direction du courant.

Pour la dernière catégorie des composants du système, nous avons analysé plusieurs possibilités de traitement des signaux. Les influences de la température, de l'offset et de l'effet de champ peuvent être réduits ou annulés à l'aide de modules électroniques adaptés. Ceux-ci sont déjà bien connus. Par contre, il existe plusieurs manières de calculer une position angulaire à partir de signaux sinusoïdaux. Il ressort de cette analyse que le traitement numérique des signaux est le mieux adapté grâce à sa haute précision, son faible coût et au petit nombre de composants nécessaires.

Les excellentes performances obtenues avec notre encodeur de position angulaire ont été illustrées par la commercialisation de trois applications partiellement basées sur les résultats obtenus dans cette thèse. Elles sont les suivantes:

- un potentiomètre absolu sans contact précis à $\pm 0.35^\circ$ sur 360° . Il sera prochainement commercialisé par Novotechnik, Allemagne.
- un capteur breveté de contre-réaction pour l'amélioration des performances des micromoteurs smooVy[®]. Il est déjà commercialisé par RMB, Suisse.
- une boussole nécessitant très peu de place ainsi qu'une faible consommation a été intégrée dans une montre. Cette montre va être sous peu commercialisée par Tissot, Suisse.