

Plus petits et moins sensibles aux variations thermiques que les traditionnels capteurs à effet Hall, les capteurs magnétiques à effet GMR connaissent actuellement un fort développement. Ils sont notamment utilisés dans la mesure de distances, de vitesses et de courant électrique, ainsi que dans les têtes de lecture des disques durs.

CAPTEURS D'AUTOMATISMES

Les capteurs magnétiques GMR rivalisent avec l'effet Hall



Les capteurs magnétiques sont utilisés dans une grande variété d'applications, de la mesure de distances ou de vitesses à la détection de pièces métalliques, en passant par la mesure de courant. La plupart du temps, ces capteurs sont basés sur l'effet Hall. Le principe, connu depuis longtemps, est bien maîtrisé. Il permet d'obtenir des capteurs dotés d'une grande plage de mesure et peu onéreux... mais sensibles aux variations de température. Pour pallier cet inconvénient, on utilise alors des capteurs magnétorésistifs, et notamment des capteurs GMR (à magnétorésistance géante) très sensibles et peu dépendants des variations de température...

Lorsqu'on évoque les avantages des capteurs magnétiques par rapport à ceux d'autres capteurs d'automatismes (optiques, capacitifs...), il vient souvent à l'esprit les critères de robustesse et de durée de vie. Pourtant, ce qui devrait frapper en premier, c'est l'ex-

En bref...

- ▶ Il existe une grande variété de capteurs d'automatismes basés sur un principe magnétique
- ▶ Les plus courants, les capteurs à effet Hall, sont intéressants en termes de coût et de linéarité, mais ils sont sensibles aux variations thermiques
- ▶ Les capteurs magnétorésistifs de type GMR permettent de pallier cet inconvénient
- ▶ Associés en pont de Wheatstone, ces composants offrent de très nombreuses applications

trême diversité de leurs applications : ils sont en effet capables de pouvoir à la fois détecter une position, mesurer une distance, une vitesse, un champ magnétique ou même un courant... Le plus souvent, c'est l'effet Hall qui est à la base de ces applications. Un peu à l'image de la loi d'Ohm dans les mesures électriques, cet effet est connu depuis plus d'un siècle et très largement utilisé aujourd'hui. Son principe est basé sur l'ap-

parition d'une tension électrique sur les faces latérales d'un barreau conducteur lorsqu'il est parcouru par un courant, et soumis à un champ magnétique perpendiculaire au sens du courant. La tension qui apparaît (appelée "tension de Hall") est directement proportionnelle au champ magnétique et au courant qui circule dans le barreau. Un capteur à effet Hall permet ainsi d'accéder au champ, et à toute autre grandeur physique qui l'influence (la position d'une pièce métallique, son déplacement, etc.).

Ces capteurs présentent de nombreux avantages. Ils sont notamment intéressants en termes de coût et de linéarité, et ils offrent une large gamme de mesure (puisque'il n'y a pas de saturation). Mais ils souffrent aussi d'un inconvénient : la température ayant une grande influence sur la mobilité des électrons, ils sont aussi très sensibles aux variations thermiques.

Fort heureusement, pour mesurer un champ magnétique, il n'y a pas que l'effet

Hall. Si on laisse un peu de côté les systèmes extrêmement sensibles que l'on utilise pour des applications spécifiques (des magnétomètres à saturation – ou fluxgates – utilisés notamment dans les systèmes de navigation aérienne, des magnétomètres à supraconductivité employés en géophysique...), il existe aussi les capteurs magnétorésistifs. Le plus souvent, ce sont des capteurs de type AMR (Anisotropic Magnetoresistance ou à magnétorésistance anisotrope). Leur principe est basé sur la variation de résistance électrique d'un matériau en fonction de la direction du champ magnétique qui lui est appliqué. En effet, lorsqu'un matériau ferromagnétique est parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique, les moments magnétiques de ses électrons s'alignent dans la direction de l'aimantation, créant ainsi une certaine conduction électrique. Lorsqu'on change la direction de l'aimantation, on modifie alors l'orientation des moments magnétiques, et donc la résistivité du matériau...

Ces capteurs offrent une sensibilité élevée (de l'ordre de 1 mV/gauss), mais leur plage de mesure est limitée à ± 25 gauss. D'autre part, la variation de résistance observée en sortie est relativement faible (de l'ordre de 3 %). Pour avoir un signal exploitable, il faut donc qu'ils soient traversés par un courant relativement important...

L'effet GMR, une sorte "d'effet AMR amplifié"

Une autre technique permet de pallier ces limitations. Appelée GMR (*Giant Magnetoresistance* ou Magnétorésistance Géante), son principe est relativement récent et moins connu que l'effet Hall ou la magnétorésistance anisotrope, mais elle connaît actuellement un fort développement.

L'effet GMR est découvert à la fin des années 80 grâce aux progrès réalisés dans les procédés de dépôts et de caractérisations des films minces. Des chercheurs constatent que les matériaux métalliques constitués d'un empilement de couches ferromagnétiques et non magnétiques de quelques nanomètres d'épaisseur présentent un effet remarquable : lors de l'application d'un champ magnétique, leur résistance électrique diminue dans une proportion importante (de 10 à 20 %), proportionnellement à l'intensité du champ magnétique. C'est la magnétorésistance géante des multicouches (ou GMR).

Pour comprendre un tel phénomène, il faut connaître le comportement des électrons. Comme pour l'effet AMR, la magnétorésistance géante est due en effet à l'influence du spin sur la conduction électrique d'un matériau ferromagnétique. Mais ici, les couches ferromagnétiques agissent avec les électrons comme des filtres de polarisation avec les photons de la lumière, autorisant ou non leur passage suivant leur orientation.

En l'absence de champ magnétique, les aimantations de deux couches minces

voisines s'orientent naturellement dans des directions opposées (mécanisme d'interactions d'échange). Les électrons des deux directions de spin (up et down) ont donc un comportement contraire : les électrons de spin up, par exemple, sont très mobiles dans la première couche et pas dans la deuxième, alors que les électrons de spin down traversent difficilement la première couche, mais ils sont plus mobiles dans la deuxième... Conséquence, le passage à travers les deux couches des deux types d'électrons est globalement difficile. Dans ce cas, la résistivité du matériau est maximale.

Mais lorsqu'on applique un champ magnétique, la situation s'inverse. Les moments magnétiques des deux couches successives s'alignent parallèlement au champ. Dans ce cas, une direction de spin est favorisée : les électrons de spin up, par exemple, sont très peu mobiles, mais les électrons de spin down traversent facilement les deux couches. Globalement, la résistivité du matériau est alors très faible.

Ces capteurs ne manquent pas d'intérêt. Comme dans le cas des capteurs de type AMR, c'est l'amplitude de la magnétorésistance (c'est-à-dire l'écart maximal de résistance rapporté à la résistance à champ nul) qui permet d'accéder à la variation de champ magnétique. Le terme GMR porte bien son nom. Alors qu'elle est d'à peine 3 % pour les capteurs AMR, la magnétorésistance des capteurs GMR s'élève à près de 16 %, et ceci sur une plus large gamme de mesure. Enfin, les capteurs GMR sont stables en température (avec un coefficient de variation de 0,15 %/°C jusqu'à 200 °C).

De nombreuses applications

Les composants magnétorésistifs à effet GMR sont principalement destinés à deux types de capteurs : les gradiomètres (qui détectent une variation du champ magnétique entre deux points) et les magnétomètres (qui permettent de mesurer l'intensité d'un champ magnétique).

Pour cela, il suffit de constituer un pont de Wheatstone avec quatre magnétorésistances GMR. Lorsque le pont est soumis à un champ magnétique uniforme, les quatre résistances "voient" une intensité identique et la tension de sortie du pont est nulle. Dès que le champ n'est plus uniforme, le pont se déséquilibre, entraînant l'apparition d'une tension de sortie proportionnelle à la variation de champ magnétique. On obtient ainsi un gradiomètre.

Pour en savoir plus

- ▶ <http://www.nve.com/technical/index.html>
- ▶ <http://www.megatron.fr>
- ▶ <http://www.spm.cnrs-dir/quoi/publications/IP2000/14a.pdf>
- ▶ http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/capteurs/phys/chap_m1.htm
- ▶ Techniques de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle (R 416)

Principales caractéristiques

Type de capteurs	Étendue de mesure	Sensibilité	Température d'utilisation	Stabilité thermique	Dimensions	Fonctionne en continu	Coût
À effet Hall	Infinie (pas de saturation)	De l'ordre de 0,05 mV/Gauss	De -40 à 150 °C	Faible	Typiquement (4x3x1,5 mm)	Oui	Faible
À bobine inductive	Infinie (pas de saturation)	Dépend de la fréquence et du champ magnétique	De -40 à 175 °C	Dépend de l'électronique	Quelques cm ³	Non	
Magnétorésistifs (AMR)	± 25 gauss	De l'ordre de 1 mV/Gauss	De -40 à 175 °C	Moyenne (de l'ordre de 0,3 %/°C)	Typiquement (5x5x1,5 mm)	Oui	Élevé
Magnétorésistifs (GMR)	± 400 gauss	De l'ordre de 5 mV/Gauss	De -40 à 175 °C	Élevée (de l'ordre de 0,15 %/°C)	Faibles (<3x3x1 mm)	Oui	Moyen

Pour en faire un magnétomètre, il suffit ensuite de blinder deux des quatre résistances du pont en les recouvrant d'un dépôt métallique. Ces résistances servent alors de référence. Elles permettent de mesurer la valeur absolue du champ magnétique (et non plus seulement ses variations relatives) jusqu'à près de 400 gauss. (Pour donner un ordre d'idées, le champ magnétique terrestre est d'environ 0,5 gauss, et le champ créé par un petit aimant s'élève à près de 1 000 gauss à 0,25 mm).

Grâce à leurs propriétés, les capteurs GMR ne cessent de voir s'élargir leur domaine d'applications. Contrairement aux capteurs AMR, où l'on doit construire des capteurs relativement encombrants pour compenser un effet magnétorésistif, les capteurs GMR peuvent être miniaturisés. On les trouve ainsi dans les têtes de lecture des disques durs.

Depuis leur introduction sur ce marché en 1997 (par des sociétés comme IBM ou Hitachi), ils ont d'ailleurs permis de porter la densité de stockage des informations contenues sur les disques durs à près de 20 Gbit/in² (3,1 Gbit/cm²).

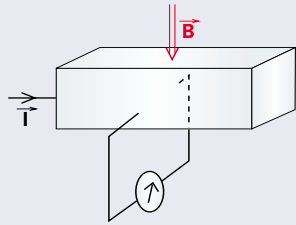
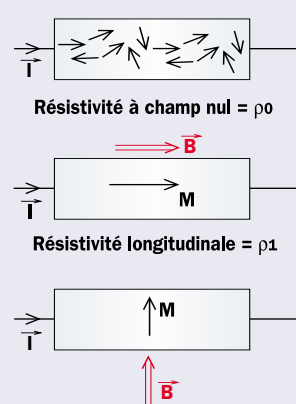
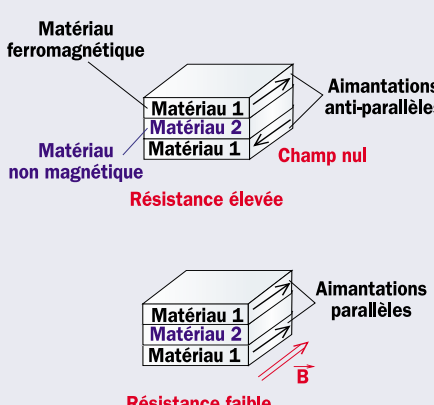
Autre application, la mesure de vitesse. Des gradiomètres de la société américaine NVE (représentée en France par Megatron) sont ainsi utilisés pour mesurer la vitesse de rotation et la position d'engrenages. Pour cela, un gradiomètre est monté à proximité des dents et polarisé par un aimant placé juste derrière (à une distance de 2 mm). Le tout est réglé de telle manière que lorsque la dent se trouve devant le capteur, le champ magnétique soit uniforme. Dans ce cas, les quatre résistances qui constituent le pont de Wheatstone sont équilibrées. Lorsque la roue est en rotation, les dents

viennent perturber les lignes de force du champ magnétique créé par l'aimant. Les quatre résistances ne voient donc pas la même intensité magnétique et le pont est déséquilibré, entraînant l'apparition d'une tension en sortie. Ainsi, le capteur permet non seulement de mesurer la vitesse de rotation de l'engrenage, mais aussi de connaître la position d'une dent et de compter le nombre de tours.

La mesure de courant électrique est une autre application. Les magnétomètres GMR peuvent mesurer un champ allant du continu à plus d'1 MHz, avec une bien meilleure sensibilité et un meilleur comportement en température que les capteurs à effet Hall. Pour cela, ils peuvent être montés directement sur un circuit imprimé, la piste à mesurer passant juste sous le boîtier.

Lorsqu'ils sont associés à une électronique

Principe des capteurs magnétiques

CAPTEURS À EFFET HALL	CAPTEURS À MAGNÉTORÉSISTANCE ANISOTROPE (AMR)	CAPTEURS À MAGNÉTORÉSISTANCE GÉANTE (GMR)
<p>Principe. Apparition d'une tension V (tension de Hall) sur les faces latérales d'un barreau conducteur ou semi-conducteur traversé par un courant I et un champ magnétique B d'orientation perpendiculaire à I.</p>  <p>Tension de Hall $V = k \cdot B \cdot I$ (k = constante de Hall)</p>	<p>Principe. Variation de la résistance électrique d'un matériau en fonction de la direction de l'aimantation qui lui est appliquée.</p>  <p>Résistivité à champ nul = ρ_0</p> <p>Résistivité longitudinale = ρ_1</p> <p>Résistivité transversale = ρ_2</p> <p>Magnétorésistance : $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$</p>	<p>Principe. Diminution de la résistance électrique d'un matériau lors de l'application d'un champ magnétique.</p>  <p>Résistance élevée</p> <p>Résistance faible</p>

Principaux capteurs magnétiques

Type de capteurs	Principaux avantages	Principales limitations	Exemples d'applications
A effet Hall	- Faible coût - Bonne linéarité sur une grande plage de mesure	- Sensibilité aux variations de température - Répétabilité	Mesure de courant, claviers, etc.
A bobine inductive	- Robustesse - Tenue en température	- Encombrement - Peu adapté aux basses vitesses	Capteurs fin de course, compte-tours, capteurs angulaires...
Magnétorésistifs (AMR*)	- Mesure de champs faibles - Sensibilité	- Consommation élevée - Coût	Détecteur de position, mesure de vitesse angulaire, détecteur de proximité, mesure de champ magnétique, capteur de courant, etc.
Magnétorésistifs (GMR**)	- Sensibilité - Stabilité thermique	- Stabilité dans les champs faibles - Hystérésis	Détecteur de position, mesure de courant, commutateur magnétiques

*AMR : Anisotropic Magnetoresistance
**GMR : Giant Magnetoresistance

ront jamais totalement les capteurs à effet Hall, notamment en termes de coûts. Quant aux capteurs magnétorésistifs de type AMR, ils resteront intéressants dans la mesure de champs faibles en raison de leur grande sensibilité. Enfin, les capteurs GMR ne pourront jamais concurrencer les systèmes de mesure de champ (tels que les fluxgates ou les magnétomètres à Squids) dans les applications médicales ou géophysiques.

**Denis Stremplewski,
François Mortier
Megatron***

*Megatron est le distributeur exclusif de la société américaine NVE en France. Il propose une large gamme de produits (imprimantes, composants, etc.) destinés principalement aux fabricants de machines et d'équipements (OEM).

Filiale du groupe Megatron Elektronik AG & Co, la société est implantée en Haute-Savoie à Allinges.

Tél. : 0450705454 - Fax : 0450705656

<http://www.megatron.fr>

de conditionnement du signal, les magnétomètres peuvent être aussi utilisés comme des commutateurs magnétiques sans contact ("switchs digitaux"). Ces composants sont notamment destinés à la détection de mouvement des tiges de vérin hydraulique ou pneumatique. Il suffit de loger un aimant dans le vérin, et de fixer le commutateur magnétique GMR

sur le corps du vérin (à l'extérieur), à quelques millimètres de la tige.

On trouve enfin des ponts GMR associés à des électroniques complexes qui permettent de réaliser des codeurs magnétiques linéaires et angulaires, et des réseaux de ponts permettant de détecter un motif dessiné par des encres magnétiques.

Malgré tout, les capteurs GMR ne remplace-