

Recent advances in semiconductor thin film magnetic sensors and development of applications

Ichiro SHIBASAKI

(The following is an excerpt from the boxed text, translated into English.)

半導体的な組成を極めて単純に制御し、厚さ1μmで、電子移動度が20,000~30,000cm²/V・sのInSb薄膜を工業的に量産する技術である。更に、ホール素子の高感度化の目的でウェイトの基板とフェライトの微小チップの間に磁気センサー部のInSb薄膜をサンドイッチする磁気増幅構造を採用し、従来のホール素子とは全く違った実用的な高感度を達成した。また、製作プロセスで、当時迄の技術で採用されていたフォトリソグラフィ技術を採用し、InSb薄膜のホール素子パターンや電極の高精度形成を行うことで、量産性のよいホール素子ウエハー製作プロセスを開発した。¹⁷⁻¹⁹

更に、このホール素子は時代の要請である小型、薄型化、面実装化、低コスト化等の電子部品としての重要且つ、基本的な課題をクリアし、電子機器に良質の動力を供給するホールモータの重要な磁気センサーとして多量に採られ電圧に至っている。

高感度InSb等素子ホール素子の応用であるが、従来の当初はオーディオプレーヤーのホールモータの回転検出用の磁気センサーに使用され、回転の検出が極めて良く音質の再現性に優れ、雑音も少ないダイレクトドライブのプレーヤーを実現した。次いで、1980年代になり、家庭用VTRやパソコンは、小型、薄型でノイズの少ない、制御精度に優れた、高品質の動力としてホールモータが採用され、軌道、情報機器等での必須の動力源として優れた性能を証明した。この結果、ホールモータは高感度ホール素子の大きな応用分野となった。

ホール素子は磁界に比例したホール電圧が得られる素子で、上述のように直接応用される場合もあるが、電圧の検出、非検出に对应してON-OFFの信号が得られる制御回路付きで使われる場合も多い。即ち、高感度薄膜のホール素子と、Siにのみなるデジタル増幅回路チップを一つのパッケージに納めたデジタル出力の磁気センサーが開発され、使われ始めている。¹⁸⁻¹⁹

このデバイスには、ハイブリッドホールIC(hybrid Hall IC)と呼ばれ、磁界の検出・非検出に对应し、電源電圧と同じレベルの電圧がON-OFFする電圧出力が得られるものとN極磁界、S極磁界の検出・非検出に对应してON-OFFする電圧出力がえられる。

このハイブリッドホールICは、非接触のスイッチや電子デバイスの冷却用ファンモータ、洗濯機、エアコンなど家電機器の省エネルギー目的で用いられるホールモータ(パワーホール素子)の磁気センサーに用いられている。Fig. 2aの写真にはパソコン用のCD-ROM駆動用ホールモータ、Fig. 2bの写真にはハイブリッドホールICを使った全自動洗濯機のホールモータの写真を示した。回転

子は約30cm径のリング状高性能永久磁石である。この様に、高感度薄膜ホール素子は、非接触でモータの回転の状態を検出し、目的に達した回転制御でより加動的な動力(インテリジェント動力)としてモータが利用出来ることを示した。

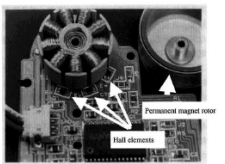


Fig. 2a. DC brushless motor for CD-ROM drive (spindle motor) with Hall elements

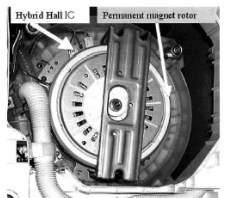


Fig. 2b. DC brushless motor for home washing machine with hybrid Hall IC as magnetic sensors

ホール素子は、ホールモータ以外にも応用は多い。例えば、ホール素子の磁界検出機能を使うと、①運動物体の位置、速度の検出、②加速度の検出が可能である。

自動車エンジンの非接触回転検出や産業用機械等の動力制御、屋外型のクレーン等大型システムのアーム位置検出等応用は多い。また、付帯のロボット制御技術でも欠かせない非接触センサーである。更に、直接磁束密度の検出ができるホール素子を使うと、③中心をむく磁束密度の検出が可能である。

従来の磁束密度の検出から、電気、電子機器の高精度、省電力制御はパワーエレクトロニクス分野の大きな課題である。インバータ技術に加え、非接触で電力計測が出来るホール素子は必須の技術である。

ところで、ホール素子の使用環境であるが、これまでVTRやパソコン等が使われる環境であり、主として室温周辺の約100℃の温度範囲であった。高感度InSb薄膜のホール素子は、耐温度性能を問われることもなく、高感度特性を最大限に発揮して機械的、電磁的ノイズが少ない、制御精度の良い非接触センサーとして大量に使われてきた。しかし、上述の様な新用途は従来の応用では、屋外や高温、低温等の厳しい環境条件下でホール素子が使われることが予想され、これまで要求されなかった広い温度範囲にわたる安定動作、長寿命、より小さな温度依存性等が要求される。一例として自動車用途の非接触センサーでは、-40~150℃の範囲で確実に動作することが要求される。この温度範囲は室温を含む100℃の温度範囲である。この使用環境の拡大はホール素子により新しい製造性能を要求する。

現在市販中の高感度薄膜InSbホール素子は、素子性能の温度依存性が-20℃で大きく、100℃以上の高温や-20℃以下の低温での動作を難しくしている。又、InSbホール素子に依りて開発され、現在市販されているGaAsホール素子は高温まで動作できるが、磁界での感度が低く、更に、低電圧オフセット電圧のドリフトが大きい等の問題がある。

この様な課題の解決のために新たな材料によるホール素子技術の提案がなされている。

InSbよりバンドギャップが大きいInAs(0.36eV)は電子移動度も大きく有力なホール素子材料である。²⁰ 温度依存性が少なく、高温で、駆動できる高感度薄膜InAs系ホール素子が製作できる。素子表面は、単結晶のInAs薄膜を分子線エピタキシー(Molecular beam epitaxy 略して、MBE)法により大面積で容易に量産製作する技術を開発した。MBE法により製作されたInAs単結晶薄膜を磁気センサー部に使うInAs系ホール素子は、100℃を超える高温や-20℃以下の低温でも安定動作する。¹⁷⁻¹⁹ 更に、InAsの深い量子井戸構造(超薄膜でサンドイッチした超薄膜InAs)を感磁部に使用したホール素子は、低温から

高温まで広い温度域で動作し、高感度、高出力が得られる。¹⁷⁻¹⁹

一方、InSb薄膜材料技術の進展も存在。筆者らは、MBE法により、電子移動度の大きいInSb単結晶薄膜にSiやSn等のドーパントを制御ドープして、その結果、これまで不可能視されていたInSb薄膜の温度依存性を一掃小さく低減出来ることを見出した。²¹⁻²² SiやSnをドープしたInSb単結晶薄膜は、ドーパによる電子移動度の低下は少なく、従って、大きな電子移動度を有しており、大きなホール効果や磁気抵抗効果を示す。因みに、この単結晶InSb薄膜を磁気センサー部として製作したホール素子は、高感度で、且つ、ホール素子の温度依存性が少なく、素子の駆動出来る温度範囲が大きく広がりを、磁気センサーとしての信頼性、実用性も向上した。

更に、このInSb単結晶薄膜のホール素子を磁気センサーに用いると、単純な駆動電圧が容易に1μmの超微細磁線や1mAの直流電流の非接触検出が可能となった。²³⁻²⁵

更に、詳細は他に譲るが、このSiやSnをドープしたInSb単結晶薄膜で製作された磁気抵抗素子は、温度安定性に優れ、駆動できる温度範囲も広い。この磁気抵抗素子はバイス磁界を加えることでホール素子と同様、微細な磁界や磁界の変化を高感度検出することが出来る。また、センサー部が薄膜のため柔軟性にも優れたなど合わせて有望である。このため、これまで難しく、もしくは、不可能であった自動車用途の非接触回転検出や、超高精度磁気エンコーダ等の新たな応用が期待されている。²⁶⁻²⁸

以下、著者が開発し、市場で最も多く使われている(市場占有率70%)、最近の生産量は年間14億個を超える)高感度InSb薄膜ホール素子を中心に薄膜ホール素子及び関連の技術や単結晶InSb薄膜とホール素子応用等の試みについて紹介する。

II. HIGH SENSITIVITY InSb THIN FILM HALL ELEMENTS

InSbは電子移動度が室温では最も高い材料で、純度の高いバルク単結晶で70,000cm²/V・s程度の値を有する。小型で磁束が容易に受けやすい高感度InSb薄膜ホール素子開発を望む。筆者らは、専用に開発した高感度素子装置により、厚さが均一で、電子移動度も高く、シート抵抗値が170Ω程度のInSb多結晶薄膜がウェイト基板上に高い収率で製作できるInSb薄膜を量産製作する独自の真空蒸着法、即ち、複数の蒸着層を使うマルチターゲット真空蒸着法を開発した。更に、このInSb薄膜をマイカより剥離して

Although it is an application of a high-sensitivity InSb thin-film Hall element, it was initially used in a magnetic sensor for detecting the rotation of the Hall motor of an audio player, and a direct-drive player with extremely good rotation uniformity, excellent sound quality reproducibility, and low noise was realized. Then, in the 1980s, Hall motors were adopted as high-quality power for home VTRs and personal computers with small size, low noise, and excellent control accuracy, and demonstrated excellent performance as an essential power source for video and information equipment. As a result, Hall motors have become a major application area for highly sensitive Hall elements.

Hall elements are devices that obtain Hall voltage proportional to the magnetic field, and are sometimes directly applied as described above, but they are often used with control circuits that can obtain signals ON-OFF in response to magnetic field detection and non-detection. In other words, a magnetic sensor with digital output that consists of a high-sensitivity thin-film Hall element and a digital amplification circuit chip consisting of a Si IC in a single

package has been developed and has begun to be used.^{10~12}

This device is called a hybrid hall IC, and there are two types of outputs that can be ON-OFF for detection and non-detection of magnetic fields, and ON-OFF outputs for detection and non-detection of N-pole magnetic fields and S-pole magnetic fields. The same level of voltage is output as the supply voltage.

This high-rated Hall IC is widely used in magnetic sensors for Hall motors (power Hall motors) used for energy-saving purposes in home appliances such as non-contact switches and cooling fan motors for electronic devices, washing machines, and air conditioners. The photo in Fig. 2a shows a Hall motor for CD-ROM drive for a personal computer, and the photo in Fig. 2b shows a Hall motor for a fully automatic washing machine using a hybrid Hall IC. The rotor is a ring-shaped high-performance permanent magnet with a diameter of about 30 cm. In this way, the high-sensitivity thin-film Hall element detects the rotation state of the motor without contact, and shows that the motor can be used as a more intelligent power delivery system with purpose-oriented rotation control.

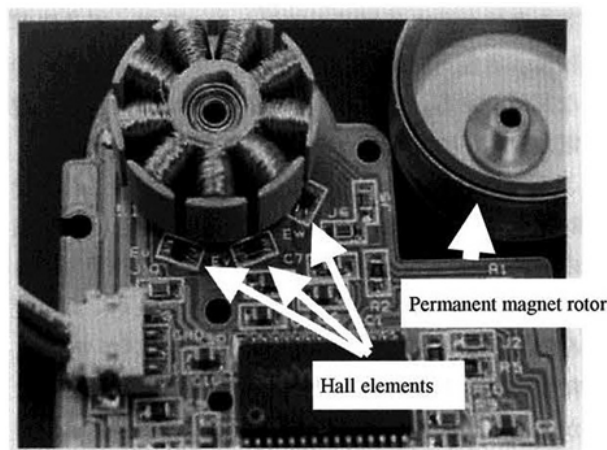


Fig.2a. DC brushless motor for CD-ROM drive (spindle motor) with Hall elements

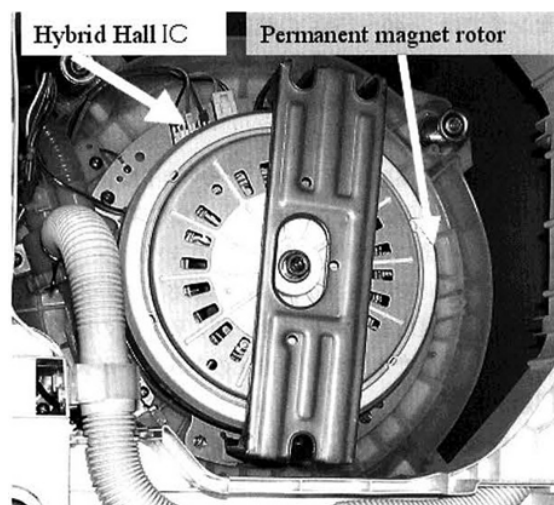


Fig.2b DC brushless motor for home washing machine with hybrid Hall IC as magnetic sensors

Hall elements have many applications other than Hall motors. For example, if you use the magnetic field detection function of the Hall element,

(1) It can detect the position, velocity and acceleration of moving objects.

It has many applications, such as non-contact rotation detection of automobile engines, power control of industrial machinery, and arm position detection of large systems such as outdoor cranes. It is also a non-contact sensor that is indispensable for future robot control technology. Furthermore, using a Hall element that can directly detect magnetic flux density

(2) Non-contact detection of transient current, including DC, is possible.

Due to the need to reduce environmental impact in the future, high-precision and power-saving control of electrical and electronic equipment is a major issue in the field of power electronics. In addition to inverter technology, Hall elements that can measure current and power without contact are essential technologies.

By the way, the environment in which Hall elements are used has been the environment where VTRs and personal computers are used, and the temperature range is mainly about 100°C around room temperature. Hall elements of high-sensitivity InSb thin films have been used in large quantities as highly accurate non-contact sensors with low mechanical and electromagnetic noise by maximizing their high sensitivity characteristics without being questioned for environmental resistance.

However, in the new or future applications mentioned above, Hall elements are expected to be used outdoors and under severe environmental conditions such as high and low temperatures, and stable operation over a wide temperature range, long service life, and smaller temperature dependence will be required, which were not required before. For example, non-contact sensors in automotive applications are required to operate reliably in the range of -40~150°C. This temperature range is a temperature range of 190°C including room temperature. This expansion of the operating environment requires more stringent environmental resistance performance from Hall elements.