

半導体薄膜磁気センサの現状と その応用

柴 崎 一 郎

(旭化成)

2003年（平成15年）3月14日

会 場：中央大学駿河台記念館

社団法人 日本応用磁気学会

半導体薄膜磁気センサの現状とその応用

Thin Film Technology and their Application to Magnetic Sensors

旭化成株式会社 研究開発本部

柴崎一郎

Ichiro Shibasaki (Asahikasei Corporation)

Abstract

Hall elements as mass production magnetic sensors are new application area for thin film technology such as vacuum deposition and MBE. Highly sensitive InSb thin film Hall elements formed by vacuum deposition are often applied as magnetic sensors for DC brushless motors used in electronic equipment. InAs Hall elements developed and produced by MBE have high sensitivity and stability over a wide temperature range and have potential for the present and future applications required by many electronic systems. InSb thin films grown by MBE were also studied for fabrication to magnetic sensors stable over a wide temperature range. Here, we review the recent status of application, production and the characteristics of thin film Hall elements for use as magnetic sensors.

キーワード：InSbホール素子、InAs ホール素子、薄膜磁気センサ、MBE法、デジタル磁気センサ

1. 序論

ホール素子は、これまであまり注目される半導体素子ではなかった。しかし、最近の薄膜技術により開発された高感度ホール素子は電子機器、特にVTRやパソコンに使用される精密制御の小型の直流駆動（DC）ブラシレスモータの磁気センサ（磁界の検出素子）として使われ、市場が伸びてきた。ホール素子を使うブラシレスモータは、別名ホールモータとも言われ、精密な回転制御が可能で、電子機器に良質の動力を供給する為に無くてはならない重要デバイスである。近年の電子機器の発展に伴い数多くの種類が開発され、今やモータ産業の重要な新規の一分野を形成している。

ホール素子の用途の90%以上は、オーディオ、ビデオのテープ走行制御、パーソナルコンピュータのメモリーであるフロッピーディスクやCD-ROM等の駆動に使われる小型で精密制御、更に、ローノイズが要求されるDCブラシレスモータ、即ち、ホールモータの磁気センサ用途である。ホール素子を磁気センサに使う動力源であるホールモータ無くしてはVTRもパソコンも動作しない。ホール素子は、今や、映像、情報機器などのIT産業を支える電子機器の重要なキー部品として位置付けられている。従って、過去二十余年、ホール素子はVTRやパソコンの発展とともにその需要が拡大し、年間の生産量（世界）は年々伸びて今や20億個に迫る勢いである。単品で単機能のセンサとしては最も多く生産されていると思われる。薄膜のInSbホール素子が最も多く生産され市場の凡そ85%程度を占め、次に多いのはGaAsホール素子で15%程度を占めると推定される。ホール素子は、半導体のホール効果⁽¹⁾を利用して磁界を検出して電圧信号として出力する磁気センサであり、磁界の計測や検出、各種の無接触センサとして使うことが出来る。この電圧信号はホール電圧と呼ばれ検出磁界の磁束密度に比例する。

図1には、ホール効果によるホール素子の原理を示した。Vinは駆動電圧、Icは駆動電流、Lはホール素子の長さ、Wは幅、dは半導体の膜厚である。表1にはホール素子の駆動法とホール電圧V_Hの表現を示した。ホール電圧は、磁束密度B、更に、ホール素子を構成する半導体の電子移動度 μ_H やホール係数R_Hに比例する^{(2)~(6)}。ホール素子は、薄膜化により、大きなホール電圧が得られ、消費電力の低減などのメリットもある。このため、ホール素子には、InSb、InAs、GaAs等の電子移動度が大きい化合物半導体の薄膜や薄層が使われる。

ところで、ホール素子研究の歴史は、1879年に磁界が導体を流れる電流に力を及ぼす現象がE. H. Hallに依って発見された。その後、1947年にBell研究所のG. L. Personはゲルマニウムのホール効果を利用して初めて磁界測定装置を製作した。1952年InSbの大きな移動度がW. Welkerにより発見された。更に、K. G. GunterはInSbの薄膜化の方法として、真空中でInSbを製作する三温度蒸着法を提案した。この様に、InSbホール素子の実用化研究の歴史は古く、米、欧に始まったが、実用化につながる重要な先駆的な研究が日本でも行われている。東京工業大学の酒井、大下はInSbの三温度蒸着法の研究を行いホール素子応用を指摘している⁽⁷⁾。更に、通産省の電気試験所（現産業技術総合研究所）の片岡は磁電変換素子研究の成果を名著磁電変換素子として著した⁽⁸⁾。これらの研究は、日本に於ける磁気センサの実用技術の開発の基礎となった。

ホール素子は、当初は高価で量産性に欠け、更に、小型化が難しく、一般的な電子部品として使用するには信頼性が低い等の問題があり、磁気センサとして容易に使える素子ではなく、応用は磁界計測の分野が中心であった。筆者らは1974～1975年当時、旭化成に於いて、新に考案した真空蒸着法で製作したInSb薄膜を磁気センサ部に採用することで、従来のホール素子のイメージを一新し、第二世代のホール素子とも言うべき新規の高感度ホール素子を開発した。この新たな真空蒸着法は、いくつかの蒸発源から順次InSbを蒸発させ、これまで難しかった化学量論的な組成を極めて単純に制御し、厚さ1μmレベルで、電子移動度が20,000cm²/V・sを超えるInSb薄膜を工業的に量産出来る技術である。更に、ホール素子の高感度化の目的で(2)フェライトの基板とフェライトの微小チップの間にInSb薄膜をサンドイッチする磁気増幅構造をホール素子に採用し、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^{(2)～(5)}。

その後、この素子は時代の要請である小型、薄型化、面実装化、低コスト化等の技術的な課題をクリアーして、前述した如く、ホールモータの磁気センサとして電子機器に良質の動力を供給する重要な磁気センサとして現在に至っている。開発の当初は音質を重視したオーディオプレーヤーのホールモータの磁気センサに応用された。1980年代になりノイズの少ない、制御精度の良いホールモータを動力源として必要とする家庭用VTRやパソコン等の映像や情報、電子機器の開発、実用化により高感度薄膜ホール素子の需要は急増した。

ところで、ホール素子はモータの磁気センサ以外にも重要な応用がある。ホール素子は、その磁界検出機能により、運動物体の位置、速度、加速度、DCも含む過渡的な電流等を非接触で検出出来るセンサである。この為、直流電流の無接触検出や、非電動機、例えば自動車用の無接触回転検出、更に、産業用機械の制御用の非接触の位置検出センサ等の応用も注目されている。

この様な新規応用ではホール素子の使用環境がこれまでの用途と大きく異なる特徴がある。ホールモータが使われるこれまでの環境はVTRやパソコン等では主として室温周辺の凡そ100℃の温度範囲であった。この様な使用環境では、InSb薄膜ホール素子は、特にその環境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、制御精度の良い無接触センサとして大量に使われてきた。然るに、電動機以外のシステムの回転や速度制御、大型インバーターの制御、大電流、電力計測等、屋外や高温、低温

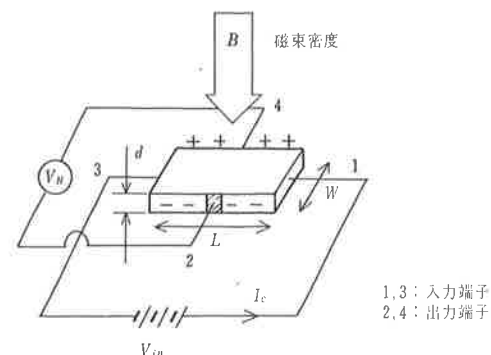


図1 ホール素子の駆動原理

表1 ホール素子の駆動法とホール電圧VHの表現

1) 定電圧駆動 (V_m = 一定)	
$V_H = \mu_H \cdot \frac{W}{L} \cdot V_{in} \cdot B$	V_H : ホール出力電圧 μ_H : 電子移動度 B : 印加磁場の磁束密度 V_{in} : 入力電圧 (駆動電圧)
2) 定電流駆動 (I_c = 一定)	
$V_H = R_H \cdot \frac{I_c \cdot B}{d}$	R_H : ホール係数 I_c : 入力制御電流

度等の厳しい環境条件下で使われる機器の制御センサ、車載センサへ等の新規用途では、これまで要求されなかった長寿命、広い温度範囲にわたる安定動作等が要求されている。一例として自動車用途の無接触センサでは、-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190℃の温度範囲である。市販されているSiの集積回路の場合は例外的ケースを除いて、125℃が使用温度の上限であり、この例からも一般の半導体素子には厳しい環境条件である。同様に、市販されている高感度InSbホール素子は、素子抵抗の温度依存性が-2%/℃と大きく、100℃以上の高温や-20℃以下の低温での駆動を難しくしている。又、InSbホール素子に次いで開発され、現在市販されているGaAsホール素子は高温まで駆動できるが、磁界での感度が低く、更に、低温でオフセット電圧ドリフトが大きい等の問題がある。InSbよりバンドギャップが大きい(0.36eV)InAsは電子移動度も大きく有力なホール素子材料である⁽⁹⁾。最近MBE法により製作され実用化が始まった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^{(10)～(12)}。更に、InAsの深い量子井戸構造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^{(13)～(14)}。更に、ホール素子に新たな機能を付加しよりインテリジェントな、即ち、高感度の化合物半導体薄膜のホール素子を磁気センサ部とし増幅回路と一体化し、これまで実現できなかった高感度、高信頼性のデジタル出力の磁気センサを製作する動きもある。

以下、著者らが開発し、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の現状を紹介する。更に、ホール素子の温度依存性を低減する最近の試みについて紹介する。

2. 高感度InSb薄膜ホール素子

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/Vsの値を有する。ホール素子は、当初、InSbの単結晶を研磨して薄くしたものを感磁部とし用いていた。このため、入力抵抗が一般に数オームと小さく、定電流で駆動するためホール電圧や素子抵抗の温度変化(-2%/℃)が大きく使いにくかった。さらに量産も難しく高価で、磁界計測などに使われ用途も限られていた。この様な初期のホール素子に対して、著者らが開発した、現在市場で大量に使用されている高感度薄膜InSbホール素子は、感磁部に真空中で薄いマイカ基板上に蒸着されたInSb多結晶薄膜を使う。技術の要点は、以下にまとめた^{(2)～(6)}。

1) 新規な真空蒸着法により、薄いマイカ基板上に電子移動度20,000～30,000cm²/V・secのInSb薄膜を製作し、独自のウエーブプロセスでホール素子化する工業的な量産製造技術である。

専用に開発された量産蒸着装置によって工業的に、厚さが均一で、電子移動度も高く、薄膜ゆえにシート抵抗値が170Ω程度あるものが量産ベースで高収率で得られる。ホトリソグラフィーの応用によるプロセスで、InSb薄膜の高精度のエッチング、本素子に特有の低温工程で製作される三層の素子電極形成、フェライト基板上に接着された厚さ0.8μmのInSbの薄膜に金線がワイヤーで接続される構造をj実現し、半導体の標準的な組立工程により樹脂パッケージングしてホール素子を量産製作する技術。

2) 厚さ0.8μmのInSb薄膜をフェライトでサンドイッチする新規な磁気増幅構造の高感度ホール素子。

この構造により、InSb薄膜に加わる磁界が3～6倍程度増幅され、効率的に感度アップができる。現在量産されている素子では、当該ホール素子がトップの高感度である。

3) 高入力抵抗素子の製作と定電圧駆動による室温周辺での温度依存性の低減。

真空蒸着法による高感度InSb薄膜ホール素子は、単結晶と比較して電子移動度は小さいが、薄膜をセンサ部に用いるので入力抵抗が(350Ω)と大きく、定電圧、即ち、1Vの入力電圧で駆動可能なホール素子を製作できる。この結果、ホール電圧の室温周辺での温度依存性が従来の値の1/10～1/20に小さくなった。これは、表1の定電圧駆動の式から明らかなように、電子移動度の温度依存性がホール電圧の温度依存性を決める定電圧駆動の大きな特徴である。真空蒸着で製作したInSb薄膜ホール素子で初めて可能となったメリットである。

この薄膜InSbホール素子の特性は、これまでの常識を破る高感度、低消費電力であり、特に、ホール電圧の温度依存性が一桁少ない定電圧駆動の、実用上のメリットは極めて大きく、磁気増幅構造による高感度化と併せて蒸着薄膜を感磁部とするInSbホール素子が大量に使われる要因となった。表2には、開発当初の高感度InSbホール素子の基本的な特性を示した^{(2)~(6)}。

表2 高感度薄膜InSbホール素子 (旭化成電子株HW-300A)

項目	特性	測定条件
ホール電圧	122~274mV	B=0.05T, Vin=1.0V
入出力抵抗値	240~550Ω	25℃
不平衡電圧	±7mV	B=0T, Vin=1.0V
V _H 温度係数	±0.1~0.2%/℃	Vin=一定 (定電圧駆動)
V _H 温度係数	-2%/℃	Ic=一定 (定電流駆動)
抵抗温度係数	-2%/℃	室温周辺
動作温度範囲	-20~100	

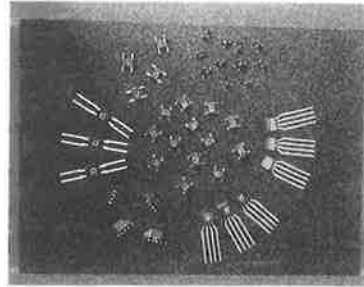


図2 高感度薄膜InSbホール素子写真

図2の写真は、このホール素子の市販品である。図3には、磁気増幅構造を有する高感度InSb薄膜ホール素子の断面構造(断面)、更に、図4にはホール電圧と磁束密度特性、図5にホール電圧の温度依存性を示した。

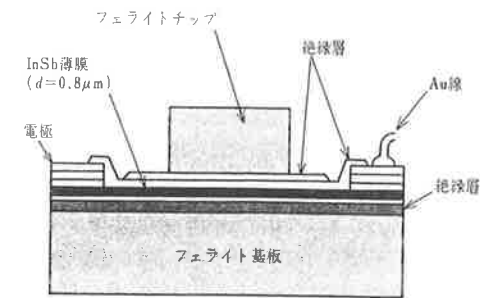


図3 高感度InSb薄膜ホール素子の磁気増幅構造(断面)

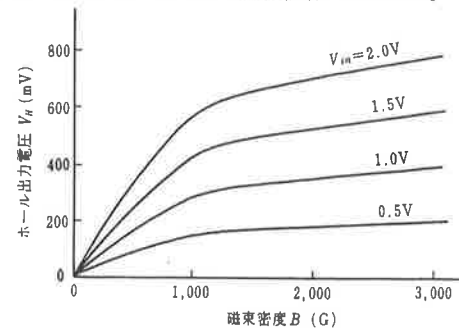
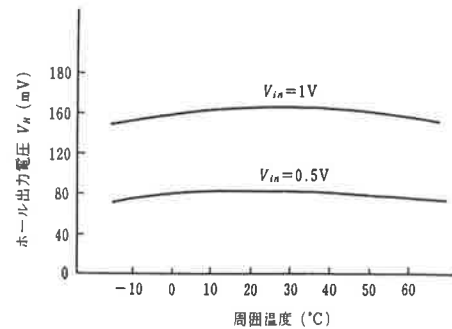
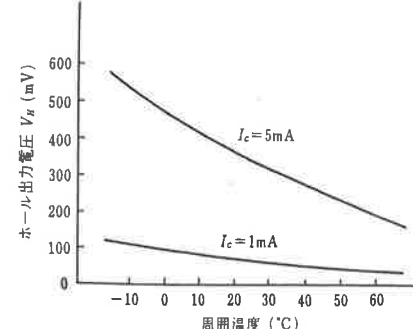


図4 ホール電圧の磁界特性 (V_H-B特性)



(a) 定電圧駆動



(b) 定電流駆動

図5 高感度InSb薄膜ホール電圧の温度依存性 (HW-300A)

この高感度InSbホール素子はホールモータに必須の磁気センサとして使われ、VTRやパソコン等に必要とされる精密な回転制御、低ノイズ特性、低価格の小型ホールモータの量産、供給が初めて可能になった。表3にはこのホール素子の特徴をまとめた。また、図6にはこのホール素子の使われているCD駆動用のホールモータの写真を示した。

表3 高感度InSb薄膜ホール素子の特徴

特徴	効果
高感度素子	低磁界で動作できる
定電圧駆動素子	温度依存性が少ない
低消費電力	バッテリー駆動に最適
高信頼性素子	安心して大量に使用できる
小型素子	機器の小型化に有利

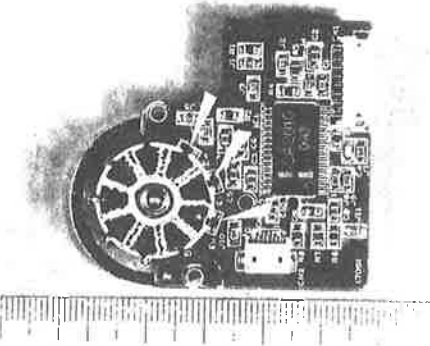


図7 市販のCD用ホールモータのステータ (矢印がホール素子)

3. 薄膜ホール素子の材料と温度依存性の低減

DCモータの無接触センサ以外にも、非接触の位置センサや電流センサ等、ホール素子の重要な応用分野がある。ホール素子を使えば電線を切らず、無接触で電流計測が可能であり、この様な電流センサはホール素子の最も特徴的な応用の一つである。電流センサとインバータ技術を組み合わせたパワーモータの制御は、ホール素子が使われる環境条件もVTRやパソコン等に比べて厳しく、高い信頼性も要求されるが、今後の広がりが期待されるホール素子の有力な応用分野である。更に、電動機ではないが非接触で回転の高精度検出や制御が要求される自動車用のセンサもホール素子などの磁気センサの有力な応用分野として期待されている。

ところで、小型のDCブラシレスモータとは違った応用を考えると、応用範囲の広い高感度InSbホール素子であるが、問題点も有る。0.17eVというInSbの狭いバンドギャップに帰因する素子抵抗の-2%/℃という大きな温度依存性により駆動できる温度範囲が室温周辺に限られることである。即ち、VTRやパソコンなどのホールモータの磁気センサとしてはこれらの機器が室温周辺での駆動を前提としており問題とはならなかった。

しかし、低温や100℃以上の高温でホール素子を使う応用、例えば、自動車用無接触センサ等のように広い温度域で使われる応用では問題となる。即ち、ホール素子の将来の用途として期待される自動車用等の無接触センサでは-40~+150℃の範囲で安定して動作することが期待されており、VTRやパソコン等の駆動温度範囲と比べて実質2倍の200℃に拡大する。将来、省エネルギーなどの応用が期待されている非接触の電流センサや各種の非接触センサ応用も高感度と優れた温度安定性は必要要件である。

斯くして、ホール素子の新規の応用の拡大を考えると非接触センサとしてのホール素子の温度依存性の改善は極めて重要である。この様な新たな応用に相応しい新規のホール素子について本節では最近の進展を述べる。

バンドギャップの大きい材料を使う考え方とInSbそのものの温度依存性を変える考え方がある。初めにInSbに比べてバンドギャップが少し大きいInAs薄膜をホール素子の感磁部に使う方法について概要を述べる。次に、InSbそのものの温度依存性を変える試みについてもふれる。薄膜成長方法は、単結晶の成長できるMBE法が有用であり、InAsやInSbの単結晶薄膜を大面積で製作することも現在では可能である。

3. 1 MBE法によるInAs薄膜ホール素子

InAsは、InSbに次ぐ高い電子移動度を有し、バンドギャップもInSbより大きく、0.36eV (300K)で、高感度でしかも低温から高温まで安定して働くホール素子が期待できる^{(8) (9) (15)}。

InAsは、格子定数は6.06Å、室温での電子移動度は33,000cm²/v・s、d(ΔE_g)/dTが0.35×10⁻⁴eV/Kである。室温周辺ではエネルギーギャップの温度依存性は少ない。

MBE法は、比較的簡単に特性の優れたInAs単結晶薄膜が製作できる方法である。又、超薄膜や、量子井戸構造の製作も容易であり、温度特性に優れ、且つ、高感度のホール素子製作が出来る薄膜製法として優

た方法である。実用的なInAsホール素子を開発する目的でInAs薄膜を製作するにはMBE法が簡便で安全性も高く、大面積の単結晶薄膜製作もでき有利である^{(12) (14)}。

3. 1. 1 SiドープInAsホール素子

InAs薄膜はMBEによる結晶成長中に不純物をドーピングして電子濃度を大きくすると、電子濃度の温度係数と電子移動度の温度係数を同時に小さくできる。

ホール素子を製作する目的で半絶縁性のGaAs基板の(100)面より2° Offした表面にSiをドーピングした膜厚0.5μmのInAs薄膜(GaAs基板とは7%というかなり大きな格子のミスマッチがあるが敢えて無視している)室温での電子移動度が10,000cm²/V・sを超える。更に、抵抗値(シート抵抗値)と電子移動度の温度依存性は、ドーピングの効果でアンドープの場合に比べて小さくなり、ホール素子製作に好適である⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾。

次に、このホール素子を量産する目的で大面積のInAs薄膜が成長できるMBEシステムが開発されている⁽¹⁴⁾。このMBE装置は1枚の基板ホルダーに2インチGaAs基板が12枚が同時にセットでき、SiをドープしたInAsの薄膜が12枚同時に成長できる。このMBE装置により、GaAs基板上に成長した厚さ0.5μm、SiドープInAs薄膜の標準的な特性は電子濃度 $8 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 、電子移動度は10,000~11,000cm²/V・sである。この薄膜を用い、感磁部が十字の対称パターンで、入力抵抗、出力抵抗を350Ω、チップサイズは0.36mm²角で設計し、本素子特有のウェーハプロセスにより素子化し、量産ラインでパッケージしInAsホール素子を製作した⁽¹²⁾。

図8の写真は開発したSiドープInAsホール素子チップである。磁界での特性は、表4に示した。この素子は、下記のような特徴がある^{(12) (16) (17) (18)}。

- 1) 磁界での出力の直線性に優れる。
- 2) 磁界での感度も市販のGaAsホール素子よりも50%程度高く、ホール素子の感度(ホール出力電圧)は100mV/6V・0.05Tが量産素子で得られている。
- 3) ホール出力電圧の温度依存性は-0.18%/°C、極めて小さい。適当な駆動条件を選ぶことで-40~150°Cの広い温度範囲で駆動できる。
- 4) ノイズやオフセット電圧のドリフトが少ない特徴もある。(電流検出などの応用で特に重要特性)

表4 InAsホール素子の基本特性

項目	特性	条件
ホール出力電圧 V_H	100mV	$V_{in}=6V$, $B=0.05T$
入力抵抗 R_{in}	350Ω	
出力抵抗 R_{out}	350Ω	
不平衡電圧 V_u	±mV以下	$V_{in}=6V$, $B=0.05T$



図8 SiドープInAsホール素子のチップ写真

ホール電圧の温度依存性も少なく、低温から高温まで安定して動作する。高温で駆動するときに重要な素子抵抗値の温度依存性では100°C以上でも室温レベルの抵抗値が維持されており、高温で過電流による素子は破壊の可能性が極めてなく信頼性も良い。

このようなSiドープInAsホール素子の小型モーター以外の主な応用例は電流検出で、直流も含む過渡的な電流を精度良く測定できる。この素子は、現在、直流や過渡的な電流を無接触で検出できる電流センサーの磁気センサとして実際に使われ好評である⁽¹⁹⁾。又、低温から高温まで動作する素子の特徴を生かし自動車用途の磁気センサとしても応用が検討されている。課題は、磁界での感度がInSbホール素子に及ばないことである。

3. 1. 2 InAsの深い量子井戸(DQW)構造ホール素子

InAsホール素子の温度依存性を少なく、且つ、磁界での感度もしくは出力を大きく得るには、センサー部のInAs薄膜に対して、高い電子移動度と高い電子濃度、更に、高いシート抵抗値が要求される。この矛盾した要求を満たすにはセンサー部のInAs薄膜を極めて薄くする必要がある。このような条件を実現するためにはInAsと格子整合の良い絶縁層が必要となる。InAsと格子整合する $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($0 \leq x \leq 1.0$, $0 \leq y \leq 1.0$)から成る4元系をポテンシャルバリアー層とした量子井戸構造のホール素子が製作されている。この系はInAsと伝導帯のバンドギャップ差が1eV以上有る。図9には、 $\text{Ga}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 層をInAsに格子整合するポテンシャルのバリアー層、即ち、バッファ層、及びキャップ層としてGaAs(100)基板上にMBE法により製作したInAsを動作層とする深い量子井戸構造(Deep quantum well:DQW)のホール素子(断面)を示した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾。

この素子は、ホール効果を生ずる動作層は厚さが150ÅのInAsで、室温の電子移動度として20,000~32,000cm²/V・secの値が得られた。この値は、これまでInAs薄膜で得られた電子移動度としては最も高い値である^{(20) (21) (22)}。

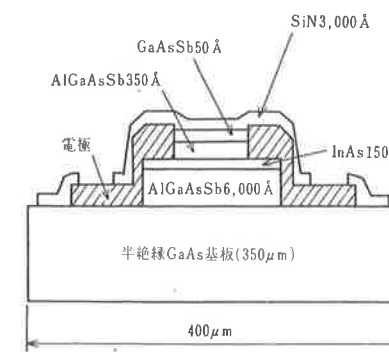


図9 InAs深い量子井戸構造のホール素子(断面)

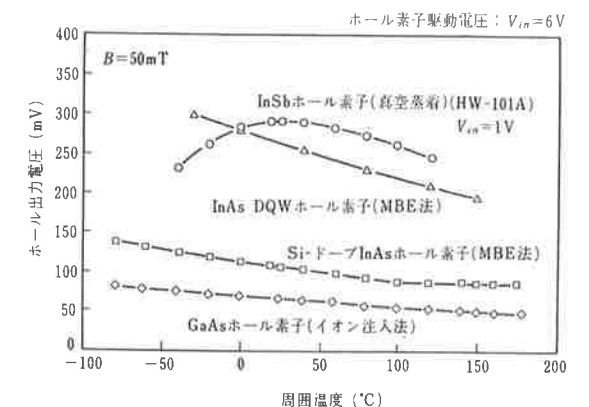


図10 各種ホール素子のホール出力電圧の温度依存性比較

このInAsDQW構造のホール素子では、ホール出力電圧がSiドープInAsホール素子の2.6倍の260mV/6V・0.05Tの高感度、高出力が得られた。このホール電圧は磁気増幅構造のInSbホール素子の感度に匹敵する。ホール電圧と検出磁界との比例性にも優れ、ホール電圧の温度依存性も極めて少ない。又、InAsDQW構造のホール素子のホール電圧の温度依存性を他のホール素子と比較して図10に示した。

図10から明らかなようにInAsDQW構造のホール素子は、

- 1) 磁界での感度(ホール電圧)がInSbホール素子並に高い。
- 2) 温度依存性は小さい。
- 3) 動作温度範囲が広い。

という特徴を有する。このホール素子は、量産技術の確立など今後の課題もあるが、新たなより広範な将来の非接触、無接点センサのニーズに対応できる次世代磁気センサとして期待できる。

3. 2 InSb薄膜の温度依存性の改善

MBE法は原子を一層ずつ積層することで単結晶の薄膜を成長できる技術である。厚さが薄くても単結晶で電子移動度が大きい薄膜が成長できる。著者らは、MBE法でGaAs単結晶上にInSb薄膜単結晶薄膜を成長し、更に、SiやSnをドープすることで抵抗値や電子移動度の温度依存性を大幅に低減出来ることを示した^{(23) (24) (25)}。更に、現象面からも、理論面からもドープによる温度依存性の低減は理解できることも示した⁽²⁴⁾。

ドーピングで電子移動度は若干低下し、磁気センサ製作の場合感度の低下が予想されるが、他の材料では実現できない $30,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 以上の薄膜が得られる。

図11には、厚さ $1.0\mu\text{m}$ のInSb薄膜の電子移動度の温度依存性のドーピングによる変化を示した。ドーピングにより電子移動度は少し低下するが、電子移動度の温度依存性は大きく変わり、実質的な温度依存性が極めて少なくなっていることが理解できる⁽²⁴⁾。

また、図12には、厚さ $1.0\mu\text{m}$ のInSb薄膜の 50°C と 100°C のシート抵抗値の比を示した。ドーピング濃度の増大に対して1に漸近的に近づき、抵抗の温度依存性がドーピングにより少なくなる様子が理解できる⁽²⁶⁾。

この様な、SiやSnをドーブすることで抵抗値や電子移動度の温度依存性を大幅に低減したInSb薄膜は、電子移動度も大きく、大きなホール効果や磁気抵抗効果を示し、高感度ホール素子や磁気抵抗素子への応用が研究されている^{(26) (27) (28) (29)}。

ドーブしたInSb単結晶薄膜のホール素子は、磁界では高感度を示し、更に、アンドープの場合と違って低温度から高温まで広い範囲にわたって駆動できる特性を有し、従来の技術では難しかったオフセットの温度安定性にも優れている⁽²⁷⁾。図13には、MBE法によりGaAs基板上に成長したSnドーブのInSb単結晶薄膜のホール素子の定電流駆動時のホール電圧の温度依存性を示した。アンドープに比べて温度依存性が大幅に減少

表5 試作した厚さ $1.0\mu\text{m}$ のInSb単結晶薄膜ホール素子の特性⁽²⁷⁾

項目	アンドープ	Snドーブ	条件
ホール電圧 V_H	49mV	39mV	$V_{in}=0.5\text{V}, B=50\text{mT}$
ホール電圧 V_H	59mV	21mV	$I_{in}=5\text{mA}, B=50\text{mT}$
入、出力抵抗値 R_{in}, R_{out}	130 Ω	55 Ω	
オフセット電圧 V_H	$<\pm 0.6\text{V}$	$<\pm 0.3\text{V}$	$V_{in}=0.5\text{V}$
抵抗の温度係数 β_R	1.7%/ $^\circ\text{C}$	0.22%/ $^\circ\text{C}$	
ホール電圧の温度係数 β_I	-1.9%/ $^\circ\text{C}$	-0.33%/ $^\circ\text{C}$	定電流駆動
ホール電圧の温度係数 β_V	-0.19%/ $^\circ\text{C}$	-0.11%/ $^\circ\text{C}$	定電圧駆動

SnドーブのInSb薄膜は電子濃度： $7\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$

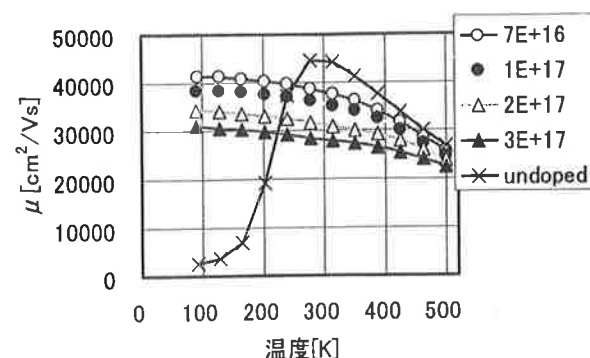


図11 GaAs基板上に成長した、厚さ $1.0\mu\text{m}$ のInSb薄膜の電子移動度の温度依存性と電子濃度

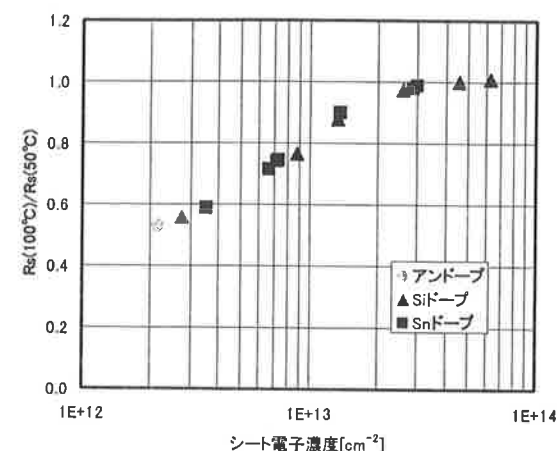


図12 GaAs基板上に成長した、厚さ $1.0\mu\text{m}$ のInSb薄膜の 50°C と 100°C のシート抵抗値の比の電子濃度（ドーピング濃度）依存性

している。また、図14には、入力抵抗値の温度依存性をドーブアンドープで比較して示した。Snドーブにより抵抗の温度変化が極めて少なくなっている。

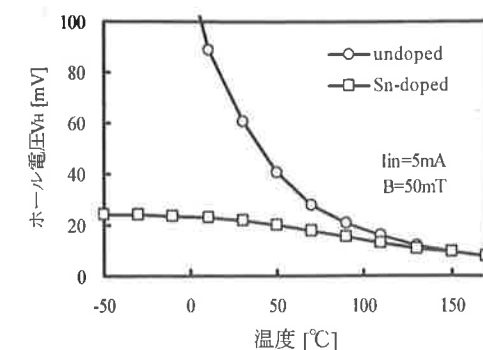


図13 GaAs基板上に成長したInSb単結晶のホール素子の定電流駆動時のホール電圧の温度依存性比較

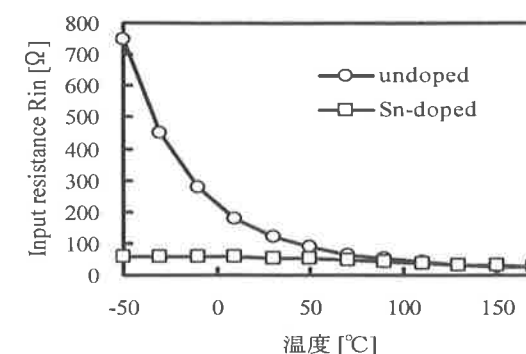


図14 GaAs基板上に成長したInSb単結晶薄膜のホール素子の入力抵抗値の温度依存性比較

詳細な説明は参考文献に委ねるが、SiやSnをドーブしたInSb単結晶薄膜は、大きな磁気抵抗効果を示し、製作された磁気抵抗素子は、ホール素子と同様に、高感度で温度安定性に優れた特性を示す^{(25) ~ (30)}。未だ十分に特性などの理解が進んでいないわけではないが、これまであまり省みられなかった狭バンドギャップのInSb薄膜の温度依存性の低減が可能となった。SiやSnをドーブすることでInSb薄膜の温度依存性は大幅に減小し、InSb薄膜のホール素子や磁気抵抗素子の温度安定性が改善され、素子の駆動出来る温度範囲が広がり、磁気センサとしての信頼性も向上する。また、今までのInSb薄膜では難しく、もしくは、不可能であった自動車用途や、産業機械のセンサなど、新たな応用にもSiやSnをドーブした高感度のInSb薄膜磁気センサは使うことが出来る。

4. ハイブリッドホールICと薄膜磁気センサのインテリジェント化

技術の価値を決める指標の一つは応用の広がりである。非接触センサとして機能する磁気センサが、複雑な回路製作などを必要としないので使えるとしたら応用は更に広がる。磁気センサをより使いやすくする動きがある。磁気センサを少しだけインテリジェント化し、使いやすくする試みにハイブリッドホールICがある。高感度のホール素子を磁気センサ部とし増幅回路と一体化してパッケージした高感度でデジタル出力の磁気センサ、即ち、ハイブリッドホールICである。デジタル出力の磁気センサとしてはSiのモノリシックホールICがある。歪みや応力に敏感で、感度が低いなど使用上の問題が多く、長い間未解決であった。

著者らは、感度の高いInSb薄膜のホール素子をセンサ部に用い、増幅回路にSiの集積回路を用いると高感度のデジタル出力の磁気センサを製作した。動作特性は、増幅回路の設計と、磁気センサ部と増幅回路との組み合わせの選択でまゐる。この素子は、歪みやす応力にも不感で、出力はhigh- (電源電圧) レベルーlow (ゼロ電圧：磁界検出時) レベルの2レベルのTTLコンパチのデジタル信号出力の磁気センサである。高感度で、外部ノイズに強く、安定に動作し、現在、ファンモータ、パワーモータなどの非接触制御センサや非接触スイッチ素子として実用に用いられている^{(31) (32)}。ハイブリッドホールICは、歪みやす応力などの影響も受けにくい特徴から、家電製品などのパワーモータの省エネルギー等の目的でブラシレスモータ化するセンサとして使われている。図15は、市販のダイレクトドライブ方式の洗濯機に使われているハイブリッドホールICを使ったホールモータの例である。インバータ技術と組み合わせて理想的な動力制御を試みている。更に、センサ部にInA

s ホール素子を使うと-40℃の低温度から150℃の広い温度範囲での駆動が可能で、高感度のデジタル磁気センサが実現できる。ハイブリッドホールICは、ホール素子とは違って、基本的にON-OFFの非接触センサであり、出力信号の複雑な回路処理は不要である。今後は、メカトロニクス分野への応用や省電力が要求される家電機器の動力用モータの制御用、あるいは、車載センサへの応用等が期待されている。

ハイブリッドホールIC

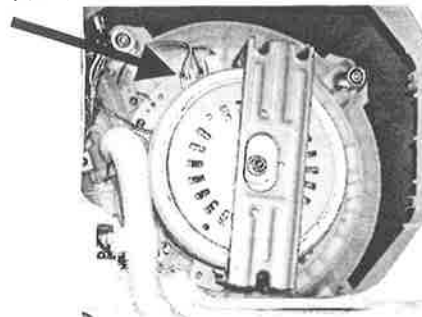


図15 市販の洗濯機に使われるハイブリッドホールICを使ったホールモータ(大きな円形リングは永久磁石回転子)

最後に、運動速度によらない信号の得られるホール素子や磁気抵抗素子等の磁気センサによる非接触センサは、今後の動力制御や位置制御、入力スイッチ等応用範囲は極めて広く、運動と電子回路をつなぐ素子として将来が期待されている。ハイブリッドホールICなども含めた半導体薄膜の磁気センサの効用は動力の小型化やそれに伴う小材料、動力の省エネルギー制御等に始まり数多くある。それらを表6にまとめた。将来の省エネルギーや環境問題を解決する手段として磁気センサが役に立てば幸いである。

表6 化合物半導体薄膜磁気センサの応用分野と期待できる効用

応用分野例	動力の低消費電力化、高精度制御、低ノイズ化等	小型化、省材料	省エネルギー、環境負荷低減	安全、快適、静音
小型モータの磁気センサ	○	○	○	○
パワーモータの磁気センサ	○	○	○	○
非接触電流検出センサ	○		○	○
車載非接触回転検出センサ	○		○	○

5. むすび

本稿は著者の独断で、最近の実用薄膜ホール素子の技術を中心に述べさせていただいた。ホール素子の出現により電子機器の理想的な動力を生む手段としてその発展に重要な責務を負った小型ブラシレスモータは、半導体とともに、21世紀に向けて情報電子産業を支える重要部品である。それを可能とするホール素子も又重要部品である。今や、ホール素子は年間15億個以上生産される化合物半導体磁気センサとして成長し、InSbやInAsのような高い電子移動度を有する化合物半導体薄膜の重要な応用分野となりつつある。高感度ホール素子の開発は、真空蒸着に始まり、MBE法による単結晶InAs薄膜の製作、InAsの深い量子井戸構造の製作、更に、単結晶InSb薄膜の製作や特性改善等が進んでいる。

ホール素子は、非接触の磁気センサとしての特徴を生かし、多方面にわたる応用の拡がり、更には、単純な

アナログ出力のセンサに留まらず、ホール素子とSiのICを組み合わせたハイブリッドホールICの様なデジタル出力の磁気センサ開発など、インテリジェント化は、非接触センサとしてのホール素子の応用を大きく広げる。また、ここではあまり述べられなかったが、InSb単結晶薄膜を利用した磁気抵抗素子もホール素子同様大きな期待が寄せられる磁気センサである。非接触の高性能ポテンシオや自動車などの非接触の回転センサ等重要な応用も見えてきた。化合物半導体薄膜のホール素子や磁気抵抗素子など磁気センサの21世紀に向けた大きな発展が期待される。

参考文献

- (1) E.H.Hall, Am. J. Math. 2, 1879, p.287
- (2) 柴崎一郎、蒸着ホール素子とその特性(半導体の先端技術集成、3章11節)(株)経営システム研究所、(1984)p. 373
- (3) 柴崎一郎、日化協月報、高感度ホール素子とその実用化、Vol.41, No.5(1988),p.12
- (4) 高感度InSbホール素子の開発と量産化、大河内賞受賞業績報告書、昭和62年度 第34回、(1988)p.58
- (5) I.Shibasaki, High sensitive Hall element by vacuum deposition, Technical Digest of the 8th Sensor Symposium.1989 p.211,(IEE Japan)
- (6) 柴崎一郎、薄膜ホール素子の開発とセンサ応用、電気学会論文誌E, Vol.119-E,No.8-9, 1999, p.405
- (7) 酒井善雄、大下正秀、電気学会雑誌、80,p166(1960)
- (8) 片岡照栄、磁電変換素子、日刊工業新聞社、1972
- (9) 高橋清、森泉豊栄、酒井善雄、第26回応用物理学会学術講演会(春期)予稿集、1965,p.18
- (10) 柴崎一郎、榎野隆、田近克彦、InAsホール素子、日本特許、P1598818
- (11) 伊藤隆 市森史明、金山裕一、柴崎一郎、第38回応用物理学関係連合講演会(春期)講演予稿集第1分冊、(1991),p.267
- (12) I.Shibasaki,Y. Kanayama,T. Ito, F.Ichimori, K.Nagase, t.Yoshida, K.Harada, High sensitive thin film InAs Hall elements by MBE, Digest of Technical Papers, Transducers1991 p.1069, IEEE
- (13) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, T. Iwabuchi, A. Ichi, M. Toyama, I. Shibasaki, InAs/AlGaAsSb Qwell Hall Elements Having High Output Voltage and Good Temperature Characteristics, Digest of Technical Papers (Late News),The 7th International Conf. on Sensors and Actuators:Transducers, '93,1993,p.32,(IEE, Tokyo, Japan)
- (14) I. Shibasaki, Mass production of InAs Hall elements by MBE, J. of Crystal Growth, 175/176, 1997, p13-21.
- (15) H.Weiss,磁電変換素子の構造と応用、片岡昭栄訳、コロナ社、1974
- (16) 柴崎一郎、化合物半導体薄膜ホール素子の開発、応用物理 Vol.67, 1998, p289
- (17) Ichiro Shibasaki, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Ito, F. Ichimori, T. Yoshida, and K. Harada, Properties of the Thin Film InAs Hall Elements By MBE, Technical Digest of the 10th Sensor Symposium.1991, p.113,(IEE Japan)
- (18) T. Yamamoto, T. Iwabuchi, T. Itou, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Yoshida, F. Ichimori, Technical digest of the 12th Sensor Symposium,1994,p.221 (IEE Japan)
- (19) 伊藤隆、山本正樹、市森文明、吉田隆、名井一展、柴崎一郎、電気学会、東京支部沼津・山梨支所第3回研究発表会予稿集、1996,p.13(電気学会、東京支部、沼津支所)
- (20) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, A. Ichi, I. Shibasaki, K. Mori, Technical digest of the 12th Sensor Symposium,1994,p.209,(IEE,Tokyo, Japan)
- (21) N.Kuze, K.Nagase, S.Muramatsu, S. Miya, T. Iwabuchi, A. Ichii, I. Shibasaki, J. Crystal Growth, 150, 1

995 p.1357

(2 2) N. Kuze, H. Goto, M. Matsui, I. Shibasaki, and H. Sakaki, J. Cryst. Growth, 175/176, 1997, p.868

(2 3) I. Shibasaki, "Growth of InSb and InAs Thin Films and their Application as Practical Magnetic Sensors", Proceedings of the 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors, IPAP Conference Series, Vol.2, (2001), p.137

(2 4) Atsusi Okamoto, Ichiro Shibasaki, "Transport properties of Sn-doped InSb thin films and application to Hall element", Proceedings of the XIIth International Conference on Molecular Beam Epitaxy, San Francisco, 2002, To be published Journal of Crystal Growth,

(2 5) Atsushi Okamoto, Takasi Yoshida, Shogo Muramatsu, Ichiro Shibasaki, "Magneto-resistance effect in InSb thin film grown using molecular beam epitaxy, Journal of crystal growth", Vol.201/201, 1999, p.765

(2 6) A. Okamoto, A. Ashihara, and I. Shibasaki, "Magneto-resistance effect in Si-doped and Sn doped InSb thin films grown on GaAs substrates", Proceedings of 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Sendai, (1999) P.514

(2 7) Atsusi Okamoto, Arata Ashihara, Takayuki Akaogi and Ichiro Shibasaki, "InSb thin films grown on GaAs substrate and their magneto-resistance effect", Journal of Crystal Growth, Vol.227/228 (2001), p.619

(2 8) I. Shibasaki, A. Okamoto, A. Ashihara and K. Suzuki, "Properties and Applications of InSb Single Crystal Thin Film Hall Elements", Technical Digest of Sensor Symposium, 2001, p.233

(2 9) A. Okamoto, A. Ashihara, K. Nishimura, H. Goto, K. Saotome, and I. Shibasaki, "Properties and Applications of InSb Single Crystal Thin Film Magneto-Resistance Element", Technical Digest of Sensor Symposium, 2001, p.239

(3 0) T. Yoshida, A. Okamoto, S. Muramatsu, N. Kuze, and I. Shibasaki, "Magneto-resistance effect of InAs deep quantum well structures grown on GaAs substrates by molecular beam epitaxy", Proceedings of 9th International conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago (1997) P.417

(3 1) K. Ishibashi, I. Okada and I. Shibasaki, High-Sensitivity Hybrid Hall Effect ICs with Thin Film Hall Elements, Sensors and Materials, Vol.14, No.5 (2002) P.253

(3 2) K. Ishibashi, I. Okada and I. Shibasaki, High Sensitivity Hybrid Hall Effect ICs with Thin Film Hall Elements, Technical Digest of the 18th Sensors Symposium 2001, pp.245

2003年2月21日受理