

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

半導体薄膜ホール素子の現状とその応用分野の展開

Ichiro SHIBASAKI

Corporate Research and Development Administration Asahikasei Corporation

2-1, Samejima, Fuji-city, Shizuoka, 416-8501, Japan

TEL: x81-545-62-3418 FAX: x81-545-62-3419 e-mail: shibasaki.ib@om.asahi-kasei.co.jp

(Received 14, February 2005 Accepted 27, June 2005)

The recent status of research, application, production and the characteristics of InSb and InAs thin film Hall elements are reviewed. Hall elements are now major 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 such as Videotape recorders(VTRs) and personal computers(PCs). InAs thin film and InAs deep quantum well(DQW) Hall elements with high sensitivity and stability over a wide temperature range have been developed by molecular beam epitaxy (MBE). The temperature dependence of InSb single crystal thin films grown on GaAs substrate by MBE were reduced dramatically to very small value by Sn doping as donor impurity. The Hall elements fabricated from the Sn doped InSb single crystal thin films show the very small temperature dependence.

They have potential for the present and future applications as magnetic sensors required by many electronic systems.

Keywords : Magnetic sensor, Hall element, Hall sensor, Magneto-resistance element, Hall motor, Brushless motor, InSb thin film, InSb single crystal thin film, InAs thin film, InAs DQW

I. INTRODUCTION

化合物半導体の薄膜技術をベースに開発されたホール素子は小型で、磁束密度を直接高感度検出できる磁気センサである。ビデオテープレコーダ (Videotape recorder : VTR) やパソコン (Personal computer : PC) に使用される精密制御の小型の直流駆動 (DC 駆動) ブラシレスモータの磁気センサ (磁界の検出素子) として使われている。永久磁石回転子を備え、ホール素子で回転を検出する DC 駆動ブラシレスモータは、ホールモータとも呼ばれ、精密な回転制御が可能で、電磁ノイズが少なく、音も静かで、更に、小型、薄型が可能であり、電子機器に良質の動力を供給する動力源として多く用いられている。特に、VTR のキャプスタンモータやパソコンのフロッピーディスクやコンパクトディスク (CD-ROM) 等の駆動用のスピンドルモータとして多数使われている。現在、ホー

ルモータはモータ産業の新規の一分野を形成しており、数多くの種類が開発され、電子機器の発展を支えている。ホール素子を磁気センサに使う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、LED、LD 等の光デバイス、HEMT 等の超高周波電子デバイスと並び、III-V 族の化合物半導体の応用分野となり、今や電子情報産業を支える電子機器の重要なキーパーツとして位置付けられている。

過去二十年余り、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、現在では 20 億個に迫る勢いである。単品で単機能の磁気センサとしては最も多く生産されていると思われる。中でも薄膜の InSb ホール素子が最も多く生産され約 90 % 程度を占め、次に多いのは GaAs ホール素子で 10 % 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る。この電圧信号はホール電圧またはホール出力電圧（記号： V_H ）と呼ばれ検出磁界の磁束密度に比例する。このため、磁電変換素子とも呼ばれ、磁界の計測や検出、磁界検出機能を利用し各種の非接触センサとして使うことが出来る。

Fig. 1には、ホール効果によるホール素子の原理を示した。 V_{in} はホール素子の駆動電圧、 I_c は駆動電流、 L は、素子形状を矩形とした時のホール素子の入力方向の長さ、 W は素子の幅、 d は半導体の膜厚である。Table 1にはホール素子の定電圧駆動(constant voltage driving)と定電流駆動(constant current driving)に対応したホール電圧 V_H の表現を示した。ホール電圧 V_H は、磁束密度B、更に、定電圧駆動の場合はホール素子を構成する半導体の電子移動度 μ_H 及び駆動電圧に比例し、定電流駆動の場合は駆動電流 I_c （制御電流とも呼ばれる）とホール係数 R_H に比例する^{2~5}。

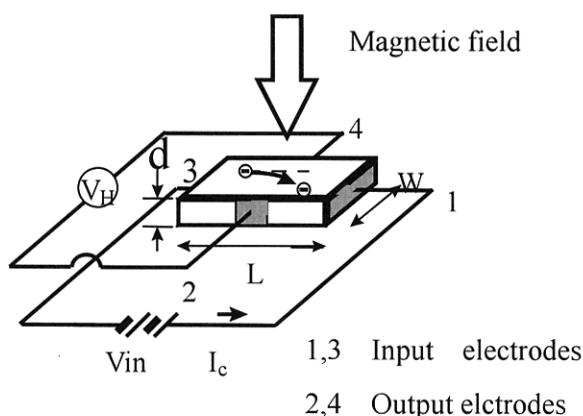


Fig.1. Hall effect and driving principle of Hall element
(d: thickness of the thin film Hall element, L: length of the Hall element, W: width of the Hall element, V_{in} : Input voltage, I_c : control current or driving current, V_H : Hall voltage or Hall output voltage)

Table1. Driving modes of Hall element and Hall voltages

Constant voltage driving	$V_H = \mu_H \cdot W/L \cdot B \cdot V_{in}$
Constant current driving	$V_H = R_H \cdot I_c \cdot B/d$

ホール素子の定電圧駆動では、ホール電圧 V_H は磁気センサ部の半導体の電子移動度と駆動電圧に比例する。この為、磁気センサ部には電子移動度の大きい材料がつかわれる。一方、大きな駆動電圧は消費電力の増加や素子の過電流破壊など問題を生じるが、磁気センサ部を薄膜化することにより、素子の入力抵抗値を大きくし、適切な電圧で駆動できる消費電力の少ない高感度、高出力の実用的なホール素子の製作が可能である。また、定電流駆動では、センサ部の薄膜化で大きなホール電圧が得られる。この薄膜化による大きなメリットのため、ホール素子には、電子移動度が大きいInSb、InAs、GaAs 等の化合物半導体薄膜や薄層が使われる。

ホール素子の歴史は、1879年に E. H. Hall の実験に依って磁界が導体中を流れる電流に力を及ぼす現象が発見された（Hall効果の発見）ことに始まる。¹

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作製した。⁶ 1952年にはInSbの大きな移動度がW. Welkerにより発見された。更に、1958年K. G. Guenterは真空中でInSb薄膜を製作する三温度蒸着法を提案した。⁷ この様に、InSbホール素子の研究の歴史は、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。1960年東京工業大学の酒井、大下は、K. G. Guenter の提案したInSbの三温度蒸着法の研究を行い、製作した薄膜のホール素子応用を指摘している。⁸ また、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を行いその成果を磁電変換素子として著した。⁹ これらの研究は、日本に於ける磁気センサの実用技術開発の基礎となった。

当初のホール素子は、InSbの高純度の単結晶を製作し、研磨等の工程により、薄くした薄片に電極をつけ製作し、素子の入力抵抗値も小さく、定電流駆動で使われ温度依存性も大きかった。このため、ホール素子は高価で量産性に欠け、更に、小型化が難しい等、更に信頼性が低い等の問題があり、磁気センサとして電子機器に使用する電子部品としては難点が多く、応用は磁界計測用途のプローブが中心であった。筆者らは1974～1975年当時、旭化成に於いて、小型、高感度で量産性のあるホール素子の研究を進めていたが、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、従来のイメージを一新した第二世代のホール素子とも言うべき新規の高感度InSb 薄膜ホール素子を開発した。その要旨は、文献2～5に纏められている。この新たな真空蒸着法は、複数の蒸発源から順次InSbを蒸発させ、加熱したマイカ基板上に堆積させることで、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 $1 \mu\text{m}$ で、電子移動度が $20,000 \sim 30,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 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フェラ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、製作プロセスに、当時 IC の技術で採用されていたフォトリソグラフィー技術を応用し、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ェーハ製作プロセスを開発した。^{2~5}

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ヤーし、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として多量に使われ現在に至っている。

高感度 InSb 薄膜ホール素子の応用であるが、開発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に使われ、回転の一様性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イヤーを実現した。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、映像、情報機器等で必須の動力源として優れた性能を実証した。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、磁界の検出、非検出に対応して ON-OFF 的に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 の IC からなるデジタル増幅回路チップを一個のパッケージに納めたデジタル出力の磁気センサが開発され、使われ始めている。^{10~12}

このデバイスは、ハイブリッドホール IC (Hybrid Hall IC) と呼ばれ、磁界の検出-非検出に対応し、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-非検出に対応して 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使用されるホールモータ（パワーホールモータ）の磁気センサに多用されている。Fig. 2 a の写真にはパソコン用の CD-ROM 駆動用ホールモータ、Fig. 2 b 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 30 cm 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、目的に適った回転制御により知的な動力（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。

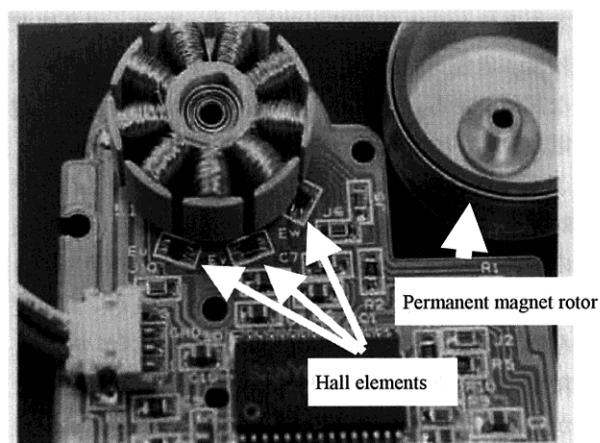


Fig.2a. DC brushless motor for CD-ROM drive (spindle motor) with Hall elements

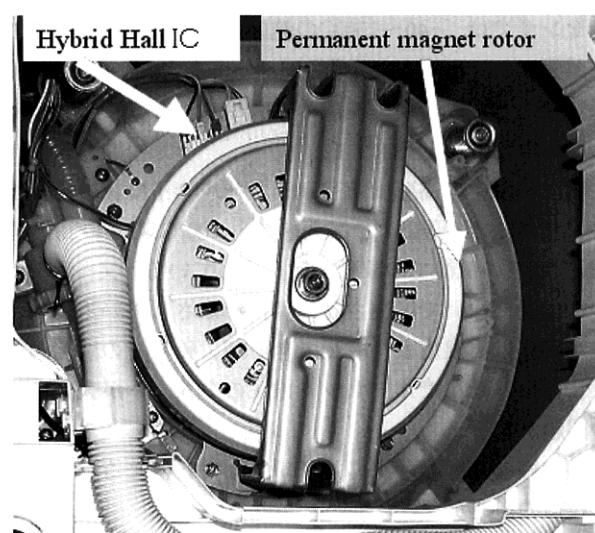


Fig.2b DC brushless motor for home washing machine with hybrid Hall IC as magnetic sensors

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、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、将来のロボット制御技術でも欠かせない非接触センサである。更に、直接磁束密度の検出ができるホール素子を使うと

②DCも含む過渡的な電流の非接触検出が可能である。

将来の環境負荷の低減等の要請から、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、非接触で電流、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°Cの温度範囲であった。高感度InSb薄膜のホール素子は、耐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、制御精度の良い非接触センサとして大量に使われてきた。

しかし、上述の様な新規あるいは将来の応用では、屋外や高温度、低温度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つ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では、-40~150°C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°C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厳しい耐環境性能を要求する。

現在市販中の高感度薄膜InSbホール素子は、素子抵抗の温度依存性が-2%/°Cと大きく、100°C以上の高温や-20°C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ホール素子は高温度まで駆動できるが、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為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。¹³ 温度依存性が少なく、高感度で、駆動できる温度範囲の広いInAs系ホール素子が製作できる。筆者らは、単結晶のInAs薄膜を分子線エピタキシー(Molecular beam epitaxy 略して、MBE)法により大面积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部に使うInAs系ホール素子は、100°Cを超える高温や-20°C以下の低温でも安定動作する。^{14~18} 更に、InAsの深い量子井戸構造(絶縁層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。^{17~20}

一方、InSb薄膜材料技術の進展も在る。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等のドナー不純物をドーピングした。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桁小さく低減出来ることを見出した。^{21~27} SiやSnをドープしたInSb単結晶薄膜は、ドープ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拡がり、磁気センサとしての信頼性、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に用いると、単純な直流駆動で容易に1 μTの超微弱磁界や1 mAの直流電流の非接触検出が初めて可能となった。^{22, 23}

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アス磁界を加えることでホール素子と同様、微弱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、センサ部が薄膜のため量産性にも優れるなどきわめて有望である。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センサや、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。^{20, 23, 25, 28}

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/Vs程度の値を有する。小型で量産が容易な使いやすい高感度InSb薄膜ホール素子開発を狙い、著者らは、専用に開発した量産蒸着装置により、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多結晶薄膜がマイカ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、複数の蒸発源を使うマルチポー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

磁気センサ部に使う高感度InSb薄膜ホール素子を開発した。^{2~5} 開発した素子の製作工程や技術の特徴を以下にまとめた。

1) ホール素子部（磁気センサ部）には、新規な真空蒸着法により、薄いマイカ基板上に、製作した厚さ $0.8\mu\text{m}$ 、電子移動度 $20,000\sim30,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ のInSb薄膜を使う薄膜ホール素子。

2) 高感度化のため磁気センサ部に加わる磁界を3~6倍増幅する為にフェライトでInSb薄膜を上下からサンドイッチした新規な磁気増幅構造のホール素子。

3) 素子製作工程は、真空蒸着、次いで、フェライト基板上に厚さ $0.8\mu\text{m}$ のInSbの薄膜を基板マイカより剥離し接着する工程、InSb薄膜を高精度でエッティングして素子パターンを製作する工程、低温度で三層の素子電極を形成する鍍金工程、フェライトチップをホール素子パターンの中央の磁気センサ部に接着する工程、ウエーハを個別の素子に切断するダイシング工程等を経て高感度ホール素子チップを製作する。次に、当該素子チップをワイヤボンディング、トランスマーキュードにより樹脂パッケージする本素子に特有の工程からなる。

この薄膜InSbホール素子は、電子移動度が大きく、シート抵抗も大きいマイカ上に蒸着したInSb薄膜を感磁部に採用し、且つ、磁気増幅構造を採り入れ、これまでの常識を破る高感度、低消費電力を実現した。更に、定電圧駆動すれば、室温周辺ではホール電圧の温度依存性が従来比一桁小さい。即ち、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ができるInSbホール素子を初めて実現した。

本ホール素子の特徴をまとめると、

- 1) 樹脂パッケージのホール素子で超小型磁気センサ
- 2) 磁気増幅構造採用により、磁界検出感度がInSb薄膜のホール効果のみの場合に比較して3~6倍大きい高感度ホール素子（従来比10から20倍の高感度）
- 3) ホール素子部InSbの薄膜化により入力抵抗が大きく（中心値 350Ω ）高入力抵抗ホール素子
- 4) Table 1 の定電圧駆動が可能で、ホール電圧の室温周辺での温度依存性が従来の定電流駆動と比較し $1/10\sim1/20$ に低減されたホール素子（薄膜化により実現）

Table 2には、高感度InSbホール素子の基本的な特性を示した。^{2~5} このホール素子は、高感度の磁界検出性能、温度依存性が小さい、更に、低消費電力など実用上のメリットが極めて大きく、これらの特性は開発以来このホール素子が大量に使われる要因となった。

Table 2.Typical specification of the high sensitivity InSb thin film Hall elements.

Items	Typical values	
Hall voltage V_H	$122\sim274\text{mV}$	$B=0.05\text{T}, V_{in}=1.0\text{V}$
Offset voltage	$\leq\pm7\text{mV}$	$B=0.0\text{T}, V_{in}=1.0\text{V}$
Input and Output resistance	$240\sim550\Omega$	$25^\circ\text{C}(R.T)$
Temperature coefficient of V_H	$\pm0.1\sim0.2\%/\text{C}$	Around R.T $V_{in}=\text{constant}$
Temperature coefficient of V_H	$-2\%/\text{C}$	Around R.T $I_c=\text{constant}$
Temperature coefficient of $R_{in}(R_{out})$	$-2\%/\text{C}$	Around R.T
Driving temperature	$-20\sim115^\circ\text{C}$	

Fig. 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、更に、Fig. 4には、高感度InSb薄膜ホール素子のチップ写真を示した。

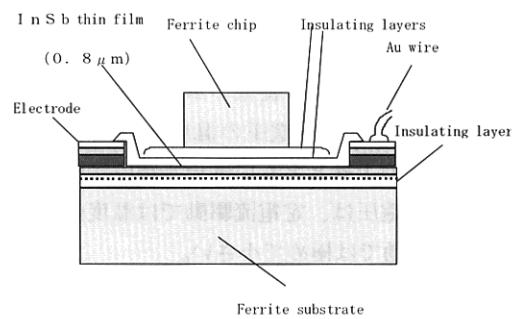


Fig.3. Cross-section of high sensitivity InSb thin film Hall element with ferrite chip and substrate.

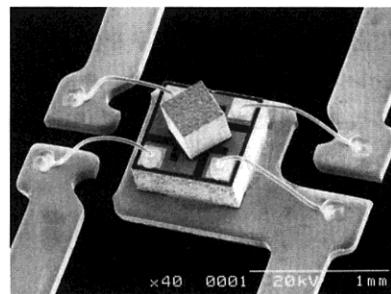


Fig.4. Photographs of the InSb thin film Hall element with ferrite chip and substrate with bonding wires.

Fig. 5 には、磁気増幅構造を有する高感度InSbホール素子に特有の低磁界で急峻な勾配（高感度）を有する磁束密度Bとホール電圧 V_H の関係を示した。

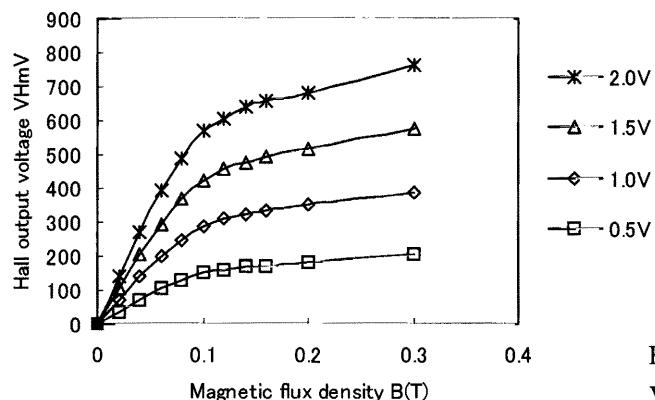


Fig. 5 V_H -B characteristic of InSb thin film Hall element (HW-300A, Asahi-kasei Electronics)

Fig. 6 (a) には、定電圧駆動時のホール電圧の室温周辺での温度依存性を示した。InSb薄膜の電子移動度の温度依存性を反映し室温周辺で温度変化が極めて少ない。また、Fig. 6 (b) には、従来のホール素子駆動法である定電流駆動時のホール電圧の温度依存性を示した。 $-2\%/\text{^\circ C}$ で温度の上昇とともにホール電圧は減少する。この様にホール電圧は、定電流駆動では温度依存性が大きいが定電圧駆動では極めて小さい。

また、Fig. 7 は高感度InSbホール素子の入力抵抗値の温度依存性である。 $-2\%/\text{^\circ C}$ で抵抗値は減少する。室温周辺から外れた100°C以上や-20°C以下で素子を使う場合は大きな駆動電流変化の対策等の必要性を示している。

この高感度薄膜InSbホール素子は、薄膜ゆえに素子抵抗値が室温で 300Ω 以上あり、高感度で磁界検出、低消費電力、室温周辺でのホール電圧の温度依存性が極めて小さい等応用上大きなメリットがある。この為、VTR やパソコン等で必須の永久磁石回転子を使う小型、精密制御のDCブラシレスモータ、即ち、ホールモータの磁気センサとして多数使われた。Fig. 8 には市販の高感度InSbホール素子の写真を示した。Table 3 にはこのホール素子の特徴をまとめた。

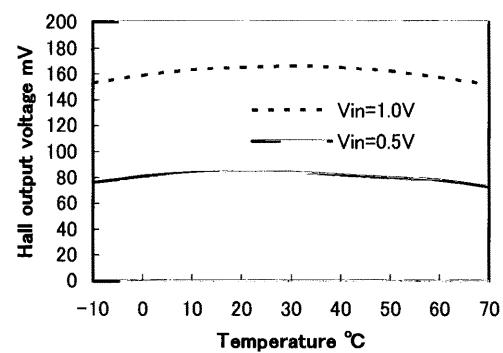


Fig.6(a). Temperature dependence of Hall voltage V_H (V_H -T characteristics: $V_{in}=\text{constant}$)

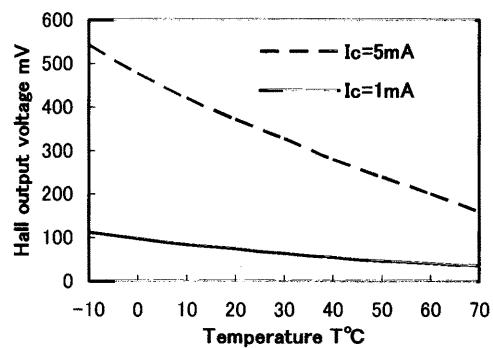


Fig.6(b). Temperature dependence of Hall voltage V_H (V_H -T characteristics: $I_c=\text{constant}$)

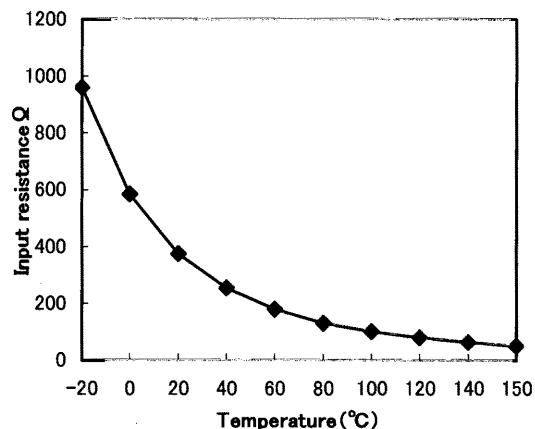


Fig. 7. Typical temperature dependence of input resistance for InSb thin film Hall element

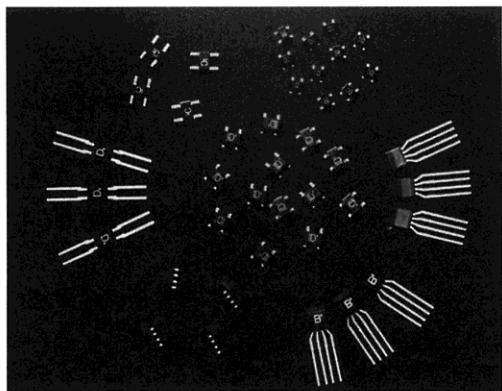


Fig. 8 Commercial high sensitivity InSb thin film Hall elements (Courtesy of Asahi-kasei Electronics, Co. Ltd. Tokyo).

Table 3. Feature of high sensitivity thin film InSb Hall elements

Feature	Application and Merits
High sensitivity	Low magnetic field detection
Constant voltage drive	Small temperature dependency
Low power consumption	Good for battery source drive
Small plastic package	Small size sensors, and high reliability

III. HALL ELEMENTS FABRICATED FROM SINGLE CRYSTAL THIN FILMS GROWN ON GaAs SUBSTRATES BY MBE

先に述べたInSbホール素子は多結晶の真空蒸着膜を磁気センサ部（感磁部）としたホール素子である。磁気增幅構造を取り入れることで高感度磁気センサとして実用化された。ホールモータの磁気センサとして多用され、その他にも応用範囲の広い高感度InSbホール素子であるが将来の応用を考えると改善すべき課題もある。

非接触で物体の位置や速度や加速度等を速度によらず検出できるホール素子は磁気センサとして、小型のDCブラシレスモータ以外にも多くの応用がある。これまで余り使われなかつたが、厳しい環境で動作を要請されるパワーモータの回転制御センサや各種の非接触の位置センサ等はホール素子の重要な応用分野である。更に、非接触で直流、交流、過渡電流等の電流計測が可能である。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に要請される高精度、省エネルギー制御は、今後の大きな拡がりが期待される応用である。更に、非接触で高速から低速まで回転の高精度検出する回転セ

ンサもホール素子を使えば可能である。鉄道や自動車用途もホール素子等の磁気センサの有力応用分野である。

InSbホール素子の最大の課題は0.17eVというInSbの狭いバンドギャップによって決まる素子抵抗の-2%/°C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った。VTRやパソコン等で使かわれるホールモータではこれらの機器が室温周辺での駆動を前提としており大きな問題ではなかった。然るに、低温や100°C以上の高温度でホール素子を使う応用、例えば、自動車用非接触センサ等のように広い温度域や屋外等で使われる場合は問題となる。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非接触センサでは-40~+150°Cの範囲で安定して動作することが期待されており、VTRやパソコン等での温度範囲と比べて実質2倍の約200°Cに拡大する。将来、省電力などの応用が期待されている非接触の電流センサや大型産業機械等への応用も、屋外や工場の高温度環境などの可能性があり、広い温度環境で優れた安定性は必須である。

斯くして、ホール素子の新規の応用の拡大を考えるとホール素子の温度依存性の改善は極めて重要である。

ホール素子の温度依存性の改善には、①バンドギャップの大きい材料を使う、②InSbそのものの温度依存性を変えるという二つの方法がある。

InAsはInSbに比べて電子移動度が小さいが、InSbよりバンドギャップが大きいので抵抗の温度依存性が少なく、また、InAs単結晶薄膜を製作し磁気センサ部を使うことが出来ればホール素子の感度向上が可能であり、温度依存性が少ないホール素子の製作が可能であり、駆動できる温度範囲も広がる等のメリットも出てくる。

MBE法は原子を一層ずつ積層することで単結晶の薄膜や超薄膜、量子井戸等を成長できる技術である。この方法を使うと厚さが薄くても電子移動度が大きいInAs単結晶薄膜が成長できる。更に、特性の優れた単結晶薄膜が大面積で製作できる。また、InAsの結晶成長中にドナー不純物のドーピングを行い所望の温度依存性を有する薄膜を製作することも容易であり、ホール素子製作に好適な高電子移動度のInAsやInSb単結晶薄膜製作法として優れた方法である。^{17~22}

以下、本節では、MBE法で製作した単結晶薄膜のホール素子技術と応用を報告する。

初めにInSbに比べてバンドギャップが少し大きい単結晶InAs薄膜のホール素子応用について述べる。次に、単結晶InSb薄膜とその温度依存性を変え、小さくする試みとホール素子応用について述べる。

III-A InAs single crystal thin film Hall elements

InAsは、InSbに次ぐ高い電子移動度を有し、バンドギャップは0.36eV(300K)でInSbの凡そ2倍である。格子定数は6.06Å、室温でのバルクアンドープの単結晶の電子移動度は、 $33,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ であり、室温周辺ではエネルギーギャップの温度依存性すなわち $d(\Delta E_g)/dT$ が $0.35 \times 10^{-4}\text{eV/K}$ であり小さい。のことから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製作が期待できる材料である。^{14~18}

III-A-a Si dope single crystal thin film Hall elements

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 $0.5\mu\text{m}$ のInAs単結晶薄膜(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)を成長した。このMBE成長の単結晶InAs薄膜はSiやSn等のドナー不純物をドーピングすると、電子濃度の温度係数と電子移動度の温度係数が同時に小さくなる。また、シート抵抗値(抵抗率)の温度依存性も少なくなる。Siを適量ドープしたInAs単結晶薄膜は、アンドープに比較して大きく、室温での電子移動度は $10,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を超える。^{14~18}

実用的なホール素子を製作するには量産規模でのInAs薄膜を製作する必要がある。その為、大面積のInAs薄膜が成長できるMBEシステムを筆者らは開発した。開発したMBE装置は1枚の基板ホルダーに2インチGaAs基板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。この装置により、GaAs基板上に成長した厚さ $0.5\mu\text{m}$ 、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 $10,000 \sim 11,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 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 0.36mm^2 角で設計し、本素子特有のウエーハープロセスにより素子化し、量産ラインでパッケージしInAsホール素子を作成した。

Fig. 9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。

- 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 $100\text{mV}/6\text{V} \cdot 0.05\text{T}$ 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 $-0.18\%/\text{C}$ 、極めて小さい。適当な駆動条件を選ぶことで $-40 \sim 150^\circ\text{C}$ 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は特に重要な特性)

ホール電圧の温度依存性も少なく、低温から高温度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破壊の可能性が極めて少なく信頼性も良い。

このSiドープInAsホール素子は、磁界での感度がInSbホール素子に及ばないが、安定して高精度で直流も含む過渡的な電流を精度良く測定できる。この為、非接触の電流センサに実際に使われている。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有力である^{15~18, 29~31}。

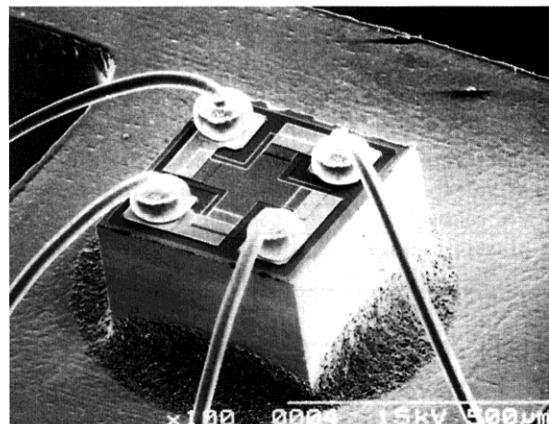


Fig. 9. Photograph of Si dope InAs Hall element chip

Table 4. Typical characteristics of Si-doped InAs Hall elements

Items	Characteristics	Remarks
Hall voltage V_H	100mV	$V_{in}=6\text{V}, B=0.05\text{T}$
Input resistance R_{in}	350Ω	
Output resistance R_{out}	350Ω	
Offset voltage V_u	$\leq \pm 8\text{mV}$	$V_{in}=6\text{V}, B=0.0\text{T}$

III-A-b. InAs deep quantum well (DQW) and application to Hall elements

温度依存性を少なく、且つ、磁界で高感度もしくは大きな出力が得られるInAsホール素子の製作には、高い電子移動度と高い電子濃度、更に、高いシート抵抗値のInAs薄膜が必要である。この要求を満たすにはInAs薄膜を極めて薄くする必要がある。このようなInAs薄膜を製作するためにはInAsと格子定数の一致した(格子整合の良い)絶縁層が有効である。InAsと格子整合する4元系の絶縁

層である $\text{Ga}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 層で InAs の動作層を上下からサンドイッチした構造即ち、InAs を動作層とする深い量子井戸構造 (Deep quantum well:DQW) を GaAs (100) 基板上に MBE 法により製作した。

ホール効果を生ずる InAs 動作層の厚さは 150 Å で、室温の電子移動度は 20,000~32,000 cm²/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。^{17, 18, 32~34} Fig. 10 には、この量子井戸構造の InAs を動作層とした高感度 InAs ホール素子 (InAs DQW ホール素子) の断面構造の例を示した^{17~20}。この InAs DQW ホール素子は、ホール出力電圧が Si ドープ InAs ホール素子の 2.6 倍の 260 mV/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增幅構造の 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。

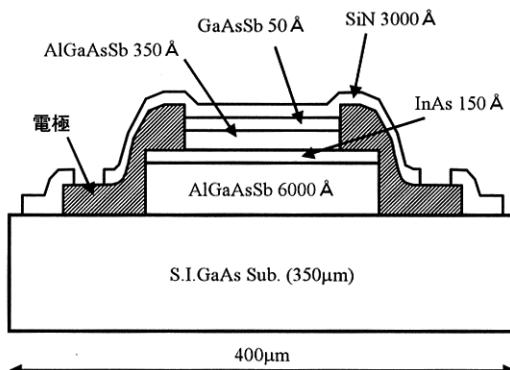


Fig. 10. Cross section of the InAs DQW Hall element.

Fig. 11 には、この InAs DQW のホール素子のホール電圧とその温度依存性を他のホール素子と比較して示した。

Fig. 11 から InAs DQW のホール素子は、

- 1) 磁界での感度 (ホール電圧) が高感度薄膜 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。
 - 4) 高入力抵抗のため素子の消費電力が極めて少ない
- という特徴を有する。このホール素子は、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。^{17, 18, 32~34}

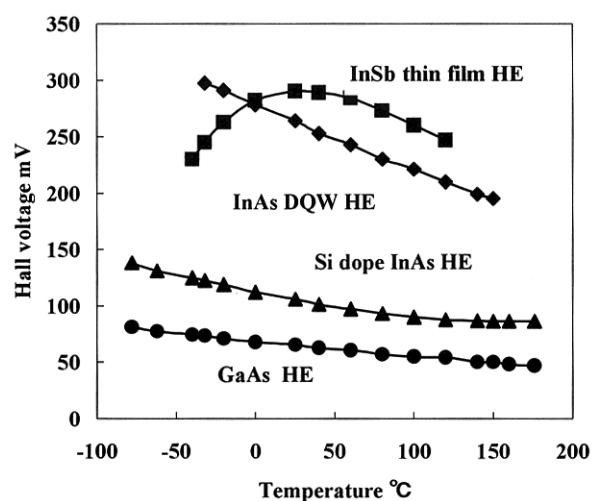


Fig. 11. Temperature dependence of Hall voltages for various kind of Hall elements ($V_{in}=1.0\text{V}$ for InSb and others 6.0V)

この InAs DQW ホール素子は、ルームエヤコンなどに使われる小型の電流検出器の磁気センサや消費電力が少なく高感度が要求される携帯電話で、小型の磁石と 4 個のホール素子を組み合わせ画面の矢印を動かすポインティングデバイスの磁気センサとして実用化されている。³⁵

III-B InSb single crystal thin films with donor impurities and their application to Hall elements

本節では、InSb のホール素子の温度依存性の低減について述べる。著者らは、MBE 法で半絶縁性の GaAs 単結晶上に InSb 薄膜単結晶薄膜を成長する好適な条件を見出すとともに、ドナー不純物として、Si や Sn をドープした InSb 単結晶薄膜の電子移動度や電子濃度等の基本的な電子物性を調べた。Fig. 12 には厚さ $1 \mu\text{m}$ の InSb 薄膜の室温での電子濃度と電子移動度の関係を示した。ドーピングによる不純物散乱の増加で InSb の電子移動度は低下するが、図より、電子濃度が一桁大きくなてもその低下は少なく $30,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える電子移動度が得られている。また Sn は Si に比較して電子移動度の低下が少ないドーパントである。この様に、MBE 法で製作した InSb 単結晶薄膜は大きな電子移動度が得られる材料である。

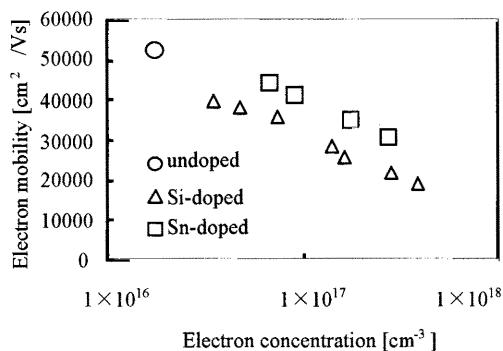


Fig.12 Relation between electron concentration and electron mobility of InSb films with 1.0 μm thickness.

また、結晶成長中にドナー不純物をドープすることにより、InSb薄膜の抵抗（抵抗率）や電子移動度、ホール係数等の温度依存性を大幅に低減出来ることを見出した。^{21~28, 36} このことを明らかにするために、Fig. 13には、アンドープとSiまたはSnをドーピングした厚さ1.0 μm のInSb薄膜の50°Cと100°Cのシート抵抗値の比と電子濃度との関係を示した。SiやSnの濃度でなく電子濃度の増大に対して比は1に漸近的に近づき、抵抗の温度依存性が少なくなることを示している。即ち、同図はInSb薄膜の抵抗値の温度依存性は、Si やSn等、ドナー不純物の種類に依らず、ドーピングで生じた電子濃度のみに依存し、電子濃度の増大とともに減少することを示している。

これまで難しいと思われていたが、この結果は、室温で真性半導体の電気伝導性を示すInSb単結晶薄膜の抵抗値（抵抗率）の温度依存性を変えることは、ドナー不純物のドーピングでほぼ自由に制御できることを示している。

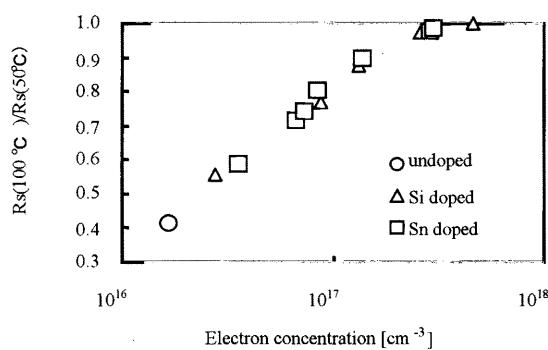


Fig.13 Ratio of sheet resistance R_s at 50°C and 100°C of InSb single crystal thin films of thickness 1.0 μm with various doping densities

また、Fig. 14には、厚さ1.0 μm の、アンドープとSnドープInSb単結晶薄膜の電子移動度の温度依存性と電子濃度の関係を示した。

アンドープのInSb薄膜は室温付近にピークを持つ薄膜に特徴的な温度依存性を示している。Snドーピングにより電子移動度の温度依存性が大きく変わり、室温付近のピークは消失し、スムースな右下がりの温度変化を示し、実質的な温度依存性が極めて少なくなっている。^{26, 27}

また、この図から、InSb単結晶薄膜は、アンドープと比較しドーピングにより電子移動度は、若干低下するが、それでも他の材料では実現できない電子移動度30,000 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 以上の大きな電子移動度を持つことを示している。即ち、SiやSnをドープしたInSb薄膜は、電子移動度が大きく、大きなホール効果を示し、温度依存性の少ない、且つ、高感度のホール素子が製作できる材料である。^{25~27}

この様な、ドーピングによるInSb単結晶薄膜の温度依存性の低減が何故起きるかについてであるが、ヘテロ界面を有するエピタキシャル薄膜に特有の電子輸送が主たる原因であるとして定性的な理解ができる。^{26, 27}

即ち、GaAs基板上に成長したInSb単結晶薄膜はヘテロ界面に近接した部位の電子移動度は小さい。一方、ヘテロ界面から離れた部位は大きい。この様に、GaAs基板上に成長したInSb単結晶薄膜は電子移動度が厚さ方向で変化している2層構成をしていると考えられる。ドープしないInSb単結晶薄膜は室温以上では電流がヘテロ界面から離れた部位を流れる。然るに、低温度では、ヘテロ界面から離れた結晶性の良い部位の電子の伝導帶への励起が減少し、転移や欠陥の多い、従って電子移動度の

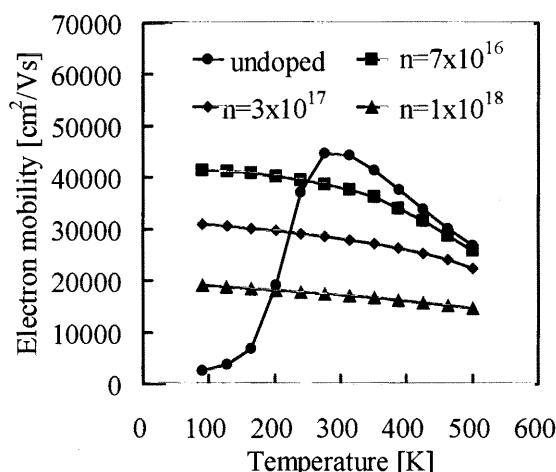


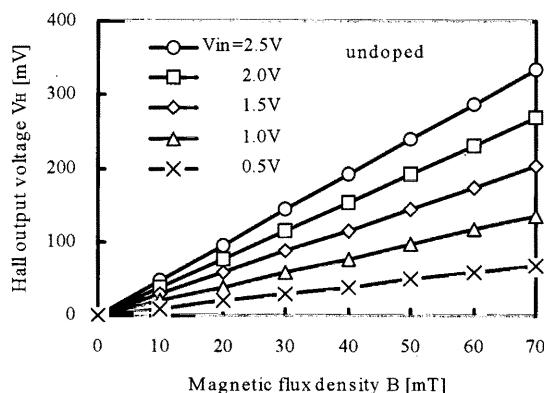
Fig.14. Temperature dependence of the electron mobility for InSb single crystal thin films of thickness 1.0 μm with various doping densities

低いヘテロ界面付近の部位の電子が相対的に多くなり、結果としてヘテロ界面付近を流路として電流が流れる。この結果、室温より温度の高いところでは大きな移動度を示し、低温度では小さい移動度を示す温度依存性となる。不純物をドープすることでヘテロ界面から離れた結晶性の良い部位を電流は常時流れることになり、電流通路の温度による変動はなくなり、格子散乱と不純物散乱に起因する電子移動度の温度依存性のみとなる。

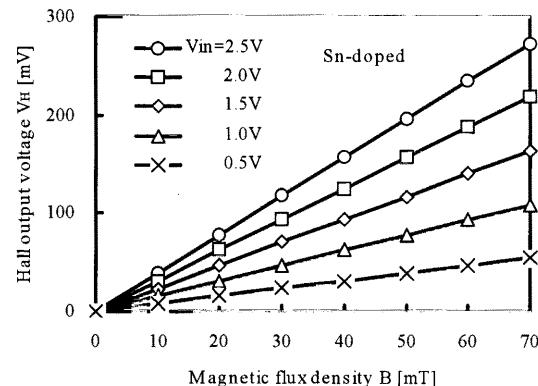
以上述べたように、ドープにより温度依存性が低減したInSb単結晶薄膜は極めて有力な高感度ホール素子材料である。

次に、上述のMBE法で製作したInSb単結晶薄膜を用い、フォトリソグラフィーを応用したホール素子のパターン製作工程や電極形成工程などを経て、InSb単結晶薄膜のホール素子を製作した。製作したInSb単結晶薄膜のホール素子の特性を次に示そう。

実用上よく使われる定電圧駆動の場合の磁界でのホール電圧の様子、即ち、ホール電圧と磁束密度の関係(V_H -B特性)をFig. 15に示す。Fig. 15は厚さ $1.0\mu\text{m}$ のアンドープ単結晶InSb単結晶薄膜のホール素子の場合、Fig. 16はSnをドープした厚さ $1.0\mu\text{m}$ で電子濃度が $7 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ のInSb単結晶薄膜のホール素子の磁界特性である。InSb単結晶薄膜は電子移動度が大きく磁気抵抗効果が大きいので磁界に対するホール電圧の出力特性が磁気抵抗効果により直線からずれる可能性があるがこのずれは極めて小さい。この結果、InSb単結晶薄膜のホール素子はホール電圧との磁界比例性が極めてよい。また、Fig. 16では、Snのドープのため電子移動度が低下するので、磁界での感度は先に述べたようにアンドープに比較して少し低下している。



Figs.15. Hall output voltage of undoped InSb thin film Hall element at magnetic flux densities from 0 to 70mT at room temperature (V_H -B Characteristics at constant voltage drive).



Figs.16. Hall output voltage of Sn doped InSb thin film Hall element at magnetic flux densities from 0 to 70mT at room temperature (V_H -B Characteristics at constant voltage drive).

次に、InSb単結晶薄膜のホール素子の温度特性を示す。Fig. 17は、厚さ $1.0\mu\text{m}$ のSnドープのInSb単結晶薄膜のホール素子の定電圧駆動時のホール電圧の温度依存性がドーピングによる電子濃度変化に対応して変わる様子を示した。アンドープに比べてドーピングにより温度依存性が減少していることが理解される。

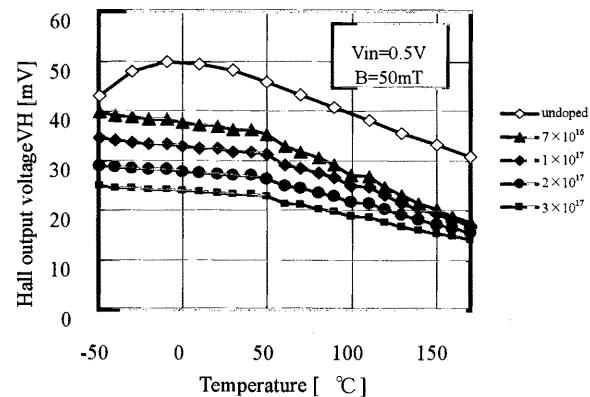


Fig. 17. Comparison of the temperature dependence of the Hall voltage at constant voltage driving of 0.5V for InSb single crystal thin film Hall elements with thickness $1.0\mu\text{m}$ at 50mT.

Fig. 18は、MBE法によりGaAs基板上に成長した厚さ $1.0\mu\text{m}$ のSnドープの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がドーピングによる電子濃度変化に対応して大きく変わるものである。ドーピングによる電子濃度の増大に伴い温度依存性がアンドープに比較して大幅に減少している。

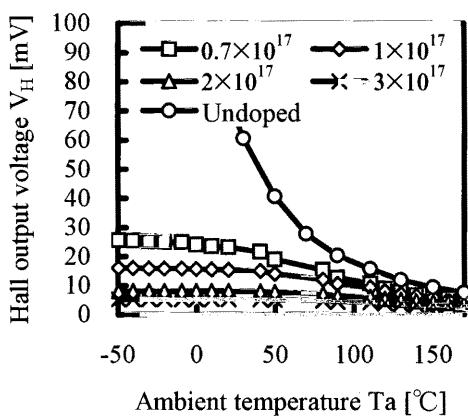


Fig. 18. Comparison of the temperature dependence of the Hall voltage at constant current driving of 5mA for InSb single crystal thin film Hall elements with thickness 1.0 μm at 50mT.

また、Fig. 19には、 -50°C で規格化したホール素子の入力抵抗値の温度依存性を示した。Fig. 13の説明でも述べたように、ドーピングによる電子濃度の増大、即ち、Snドープ量の増大に対応して少なくなる。この様なホール素子の入力抵抗値の温度依存性の低減は実際にホール素子を駆動するときの信頼性を大きく上げる。今まで、InSbホール素子は $-2\%/\text{°C}$ で抵抗値が低下して高温度での駆動を難しくしていたが上述のSnをドープしたInSb単結晶薄膜をセンサ部に使うことでの高温度での使用上の信頼性が大きく上がる。また、 100°C を超える高温度の環境でも使えることを同図は示している。

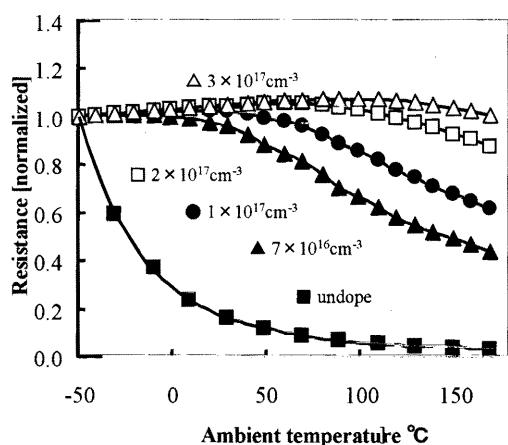


Fig. 19 .Comparison of the temperature dependence of the input resistance for InSb single crystal thin film Hall elements for various electron densities (Normalized at -50°C).

更に、Table 5には、単結晶InSb薄膜によるホール素子の特性を示した。Snドーピングにより素子の室温の入力抵抗値は低下しているが、アンドープと比較して温度係数が大幅に減少している。^{22, 23}

Table 5. Typical characteristics of InSb single crystal thin film Hall elements (Thickness of InSb 1.0 μm , Electron density of Sn dope InSb thin film $7 \times 10^{16}/\text{cm}^3$).^{22, 23, 36}

Items	undope	Sn dope	Remarks
Hall voltage V_H	49mV	39mV	$V_{in}=0.5\text{V}, B=50\text{mT}$
Hall voltage V_H	59mV	21mV	$I_{in}=5\text{mA}, B=50\text{mT}$
Offset voltage	$< \pm 0.6\text{V}$	$< \pm 0.3\text{V}$	$V_{in}=0.5\text{V}, B=0.0\text{T}$
Input and Output resistance	130 Ω	55 Ω	
Temperature coefficient of V_H	$-0.19\%/\text{°C}$	$-0.11\%/\text{°C}$	R.T $V_{in}=\text{constant}$
Temperature coefficient of V_H	$-1.9\%/\text{°C}$	$-0.33\%/\text{°C}$	R.T $I_c=\text{constant}$
Temperature coefficient of $R_{in}(R_{out})$	$-1.7\%/\text{°C}$	$0.22\%/\text{°C}$	R.T

以上述べたように、InSb単結晶薄膜ホール素子の温度依存性は、Snのドーピングにより自由に制御できる。応用にあわせた素子の設計の最適化という課題もあるが、初めて広い温度範囲で駆動できるInSb薄膜ホール素子の製作が可能になった。これらの結果は、InSbという極めて大きな電子移動度を有する材料が、ドナー不純物のドーピングにより、年來の問題点を解決し、温度依存性の少ない新たな薄膜ホール素子の材料として生まれ変わったことを意味している。更に、抵抗値の温度依存性が小さいことから、このホール素子はオフセット電圧の温度ドリフトが極めて少ない特徴がある。この特性は高精度の磁界計測が必要となる各種の新規用途で有用である。

最後に、ドナー不純物をドープしたInSb単結晶薄膜で製作したホール素子の特徴をまとめると、

- ① 高感度で磁界、特に、微弱磁界を検出出来る。
- ② 低温度から高温まで広い範囲で入力抵抗値の変化が少なく、電子回路とのマッチングに優れ、駆動できる温度範囲も広がる。例えば、 $-50\sim 150^\circ\text{C}$ にわたって駆動が可能である。
- ③ 入力抵抗の温度変化が少ないので、従来の技術では小さくすることが難しかったオフセット電圧（不平衡電圧）の温度依存性（温度ドリフト）が極めて小さい。

^{22, 23, 36}

InSb単結晶薄膜ホール素子の応用例として、超微弱磁界の計測特性を調べた例をFig. 20に示す。

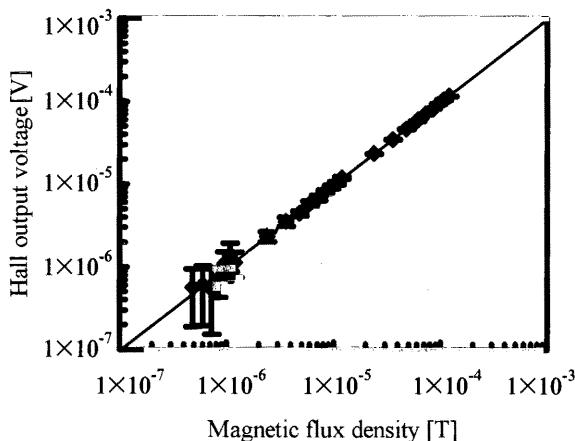


Fig.20. Magnetic field characteristics of the Sn-doped ($n=3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) InSb thin film Hall element at constant voltage drive of $V_{in}=1.0\text{V}$.

このホール素子は、DC駆動で $1\mu\text{T}$ の超微小磁界を精度良く検出できる。Fig.20はSnをドープし、電子濃度が $n=3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 厚さが $1\mu\text{m}$ のInSb単結晶薄膜で製作したホール素子の磁束密度とホール電圧の関係で、超微弱磁界計測の例である。Fig.20より、ホール電圧は地磁気の凡そ $1/30$ の $1\mu\text{T}$ 以上で磁束密度に比例しており、検出できる最小値は $1\mu\text{T}$ であることを示している。当該InSbホール素子が地磁気計測等の微弱磁界の磁気センサとして実用になることを示しているデータでもある。

更に、このSnをドープしたInSb単結晶薄膜ホール素子は、温度依存性が少なく、電流計測に応用すると従来のホール素子では出来なかった $1\mu\text{T}$ に対応する微小電流の検出が可能である。適当な、強磁性材料の磁気コアを使うと、これまで難しかった 1mA レベルのDC電流検出もこのホール素子を使うことで可能となった。^{22, 23}

更に、磁気センサ部が単結晶の薄膜で入力抵抗やホール電圧の温度依存性が少ないInSb単結晶薄膜のホール素子は耐環境性能など実用上強く要請される信頼性も高い。この結果、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をドープした高感度のInSb単結晶薄膜ホール素子は応用が期待できる。

最後に、詳細は参考文献に委ねるが、SiやSnをドープしたInSb単結晶薄膜は、大きな磁気抵抗効果を示す。このSnドープInSb単結晶薄膜を用いて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。^{24~28, 36~39}

IV. CONCLUSION

ホール素子は年間20億個近く生産される化合物半導体の磁気センサとして成長した。また、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である。高感度ホール素子によるホールモータの出現は、動力の質的向上とインテリジェント制御には、将来ともホール素子に代表される磁気センサが必須であることを立証した。高感度薄膜ホール素子は、真空蒸着に始まる化合物半導体の薄膜技術が基礎となって実現した。更に、MBE法による単結晶の大面積薄膜成長技術の開発は高感度で、高い信頼性、且つ、使える温度域の広いInAs単結晶薄膜ホール素子、InAs深い量子井戸構造のホール素子を実現した。更に、単結晶InSb薄膜の製作やドーピングによるInSbの特性改善等が試みられ、これまで不可能と思われた室温で真性半導体の電気伝導性を示すInSb薄膜の温度依存性の低減が可能となり、高感度で温度特性に優れたホール素子や磁気抵抗素子への応用など化合物半導体の薄膜磁気センサの歴史に新たなページを開いた。

ホール素子や磁気抵抗素子は磁束密度を直接検出することで、物体（磁石／磁界）の位置、または、運動と電子回路を非接触でつなぐ素子である。運動速度によらないセンサ信号が得られる非接触センサである。ホールモータは勿論であるが、各種の位置の検出、運動または動力の制御、非接触の入力スイッチ等応用は多方面にわたる。更に、アナログ出力の高感度InSb薄膜ホール素子とSiのICを組み合わせ一パッケージにしたハイブリッドホールICは、最も単純化されたデジタル出力の磁気センサとして実用化され、ホール素子の応用を大きく拡げた。^{11~12} また、不純物をドープしたInSb単結晶薄膜で製作される磁気抵抗素子も、新たな将来の応用の可能性が期待できる。

西暦2000年には日本国内では総発電量の約52%の電力がモータにより消費されており、このモータの消費電力の2%を削減できれば100万kWの発電所が不要になる。ホールモータは永久磁石回転子のため銅損がなく、ブレーキ損の無い負荷に応じた可変速制御が可能な省電力モータである。パワーモータのホールモータ化による省エネルギー技術は21世紀の地球環境の負荷低減に必須のグリーン技術である。^{40, 41}

また、21世紀に花開くと期待されるロボット技術においても非接触で位置や角度、速度などの運動を検出できる磁気センサ技術は重要である。

化合物半導体薄膜技術によるホール素子や磁気抵抗素子など薄膜磁気センサは、エレクトロニクス、IT技術をベースとする人類社会に必須の技術として、21世紀に向けた大きな発展が期待される。

ACKNOWLEDGEMENTS

本稿は、著者らが開発した高感度薄膜ホール素子の技術と現状について述べた。著者とともにホール素子開発に関わり、研究開発で協力をいただいた旭化成の方々に深く感謝します。更に、40年余に涉り著者が御指導をいただき、本稿の執筆を勧めて頂いた、東京工業大学名誉教授、東海大学元教授 河村和孝博士に感謝するとともに貴重な機会を提供頂いた東海大学 Society of Advanced Science (SAS) には深く感謝します。

REFERENCES

- ¹ E.H.Hall, Am. J. Math. 2, 1879, p.287.
- ² I. Shibasaki, Thin film Hall elements by vacuum deposition and their characteristics, Collection of semiconductor frontier technologies. Hanndotai no senntann gijyutsu syuusei Cap.3, § 11) Keiei system kennkyuusyo p . 373(1984) (in Japanese).
- ³ I. Shibasaki , Development of practical high sensitivity thin film Hall elements 、 Monthly report(bulletin) of Nikkakyo (Nikkakyo geppo) Vol.41, No.5(1988),p.12(in Japanese).
- ⁴ I. Shibasaki, High sensitive Hall element by vacuum deposition, Technical Digest of the 8th Sensor Symposium.1989 p.211, IEE Japan (in Japanese).
- ⁵ I. Shibasaki, Practical high sensitivity Hall elements for magnetic sensor by thin film technology, IEEJ, Trans. SM, Vol.119-E, No.8-9, 1999, p.405 (in Japanese).
- ⁶ G.L. Pearson, A magnetic field strength meter employing the Hall effect in Germanium, Review of Scientific Instruments, Vol.19, 1948, p.263.
- ⁷ K. G. Guenter, aufdampfschichten aus haibleitenden III-V Verbindungen, Z. Naturforschung, 1958, 13a, p. 1081.
- ⁸ Y. Sakai, M. Oshita, J. IEEJ、80, (1960) p166 (in Japanese).
- ⁹ S. Kataoka, Magneto-electric transducer, Nikkan kogyo sinnbunn sya、1972 (in Japanese).
- ¹⁰ K. Ishibashi, K. Tachika, S. Tokuo, H. Sugiyama, I. Okada, H. Imai, and I. Shibasaki, High Sensitivity Hybrid Hall Effect ICs , Technical digest of the 1st joint conference of Numazu Yamanashi branches of IEEJ Tokyo, 1995,p.17 (in Japanese).
- ¹¹ 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.
- ¹² 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.
- ¹³ K. Takahashi, T. Moriizumi, Y. sakai, Tech. digest of 26th Spring conference of JSAP, 1965,p.18.
- ¹⁴ I. Shibasaki, T. kajino, K. Tachika, InAs Hall element, Japan Patent, P1598818.
- ¹⁵ T. Ito, F. Ichimori, y. Kanayama, I. Shibasaki, Tech. digest of the 38th Spring conference of JSAP, No.1 book, (1991),p.267 (in Japanese).
- ¹⁶ 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.
- ¹⁷ I. Shibasaki, Mass production of InAs Hall elements by MBE, J. of Crystal Growth, 175/176, 1997, p13-21.
- ¹⁸ I. Shibasaki, Development of compound semiconductor thin film Hall elements, Oyo butsuri, Vol.67, 1998, p289, JSAP, (in Japanese).
- ¹⁹ K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, T. Iwabuchi, A. Ichii, M. Toyama, I. Shibasaki, InAs/AlGaAsSb Quantum well Hall Elements Having High Output Voltage and Good Temperature Characteristics, Digest of Technical Papers(Late News), The 7th International Conference on Sensors and Actuators, Transducers,'93,1993,p.32,(IEE, Tokyo, Japan).
- ²⁰ 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.
- ²¹ A. Okamoto, and I. Shibasaki, Growth of InSb thin films on GaAs substrates, Oyou butsuri,Vol.69, (2000)p.193, JSAP, (in Japanese).
- ²² 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.
- ²³I. Shibasaki, A. Okamoto, M. Takada, H. Goto and R. Uchiyama, Sn-doped InSb thin film Hall elements by MBE and their applications, 3E115.P, Proceedings of 12th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers03, Boston, (2003), p.1626.
- ²⁴Atsushi 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.
- ²⁵Atsushi 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.
- ²⁶Atsushi Okamoto, Ichiro Shibasaki, "Transport properties of Sn-doped InSb thin films and application to Hall element", Proceedings of the X II th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, San Francisco,2002.
- ²⁷A. Okamoto, I. Shibasaki Transport properties of Sn-doped InSb thin films and application to Hall element. Journal of Crystal Growth, Vol. 251, 2003, p. 560.
- ²⁸A. 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.
- ²⁹Ichiro 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).
- ³⁰T. Yamamoto, T. Iwabuchi, T. Itou, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Yoshida , F. Ichimori and I. Shibasaki, Properties of Si-doped InAs thin film Hall elements, Technical digest of the 12th Sensor Symposium,1994,p.221 (IEE Japan).
- ³¹T. Ito, M. Yamamoto, F. Ichimori, T. Yoshida, K. Nai, I. Shibasaki, Characteristics of InAs Hall elements and application to current sensor, Technical digest of 3rd joint conference of Numazu Yamanashi branches IEEJ, Tokyo,1996,p.13(in Japanese).
- ³²K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, A. Ichi, I. Shibasaki, K. Mori, InAs/AlGaAsSb quantum well Hall elements, Technical digest of the 12th Sensor Symposium, IEEJ, Tokyo, Japan,1994, p.209.
- ³³N. Kuze, K. Nagase, S. Muramatsu, S. Miya, T. Iwabuchi, A. Ichii, I. Shibasaki, InAs deep quantum well structures and their application to Hall elements, J. Crystal Growth, 150, 1995 p.1307.
- ³⁴N. Kuze, H. Goto, M. Matsui, I. Shibasaki and H. Sakaki, Molecular beam epitaxial growth of high electron mobility InAs/AlGaAsSb deep quantum well structures, J. Crystal Growth, 175/176, 1997,p.868.
- ³⁵K. Suzuki, K. Kuriyama, T. Takatsuka, Y. Shibata, M. Nakao, and I. Shibasaki, Novel current sensors using InAs quantum well Hall elements, Technical Digest of Sensor Symposium, 2003, p.167.
- ³⁶I. Shibasaki, Properties of InSb thin films grown by molecular beam epitaxy and their application to magnetic sensors, IEEJ Trans. SM.Vol.123-E , (2003) p.69 (in Japanese)
- ³⁷T. 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.
- ³⁸A. 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.
- ³⁹K. Nishimura, H. Goto, H. Geka, A. Okamoto, I. Shibasaki, Proceedings of the 20th Sensors Symposium 2003,pp.161, Properties and Applications of Sn doped InSb Single crystal Thin Film Magneto-resistance Elements, Proceedings of the 20th Sensor Symposium, 2003, p.161.
- ⁴⁰T. Higaki, Symposium text book of motor technology, 1997 , (Nihon noritsu kyoukai) (in Japanese).
- ⁴¹T. Kudo and M. Misonoh, Editors, Green Material Technology, Kohdan sya scientific, p119 ,2002 (in Japanese).

柴崎一郎（しばさき いちろう）

1942 年生まれ、

1966 年東京理科大学理学部物理卒業、

1971 年 3 月東京教育大学大学院理学研究科物理学専攻

博士課修了（理学博士）、

1971 年 4 月東京教育大学理学部物理学教室教務補佐（副手）勤務を経て、

1974 年旭化成工業（株）入社、InSb ホール素子開発を担当。技術研究所室長、旭化成電子（株）開発部次長、旭化成工業研究開発本部長付チーフリサーチフェローを経て

2003 年より旭化成グループフェロー、

2004 年 10 月より研究開発本部 柴崎研究室長（現職）。

2003 年より東京工業大学大学院生命理工学研究科 特任教授（兼務）、

1999 年より、大阪商工会議所（旧大阪工業会）産業科学研究協会評議員、

受賞関係

開発した〔高感度 InSb ホール素子開発と量産化〕で 1988 年度大河内記念生産賞受賞（社名表彰）、1996 年、科学技術功労者表彰に於いて、〔高感度薄膜ホール素子技術の開発〕により科学技術庁長官賞を受賞、

1992 年及び 1999 年に発明協会より発明奨励賞（関東地方）受賞、

2003 年春 〔高感度薄膜ホール素子の開発〕により紫綬褒章受章、

所属学会

物理学会、応用物理学会、電気学会、応用磁気学会、IEEE、次世代センサ協議会各会員、

趣味

漆塗りと木工