

InSb 単結晶薄膜の物性と磁気センサ応用

正 員 柴 崎 一 郎

電 気 学 会 論 文 誌 E
(センサ・マイクロマシン準部門誌)

平 成 15 年 3 月 号 抜 刷

IEEJ Trans. SM, Vol. 123, No. 3, 2003

InSb 単結晶薄膜の物性と磁気センサ応用

正 員 柴崎 一郎*

Properties of InSb Thin Films Grown by Molecular Beam Epitaxy and Their Applications to Magnetic Field Sensors

Ichiro Shibasaki*, Member

Recent developments in InSb thin film magnetic sensor technology were reviewed. Tin (Sn) doped InSb thin films grown on GaAs substrates by molecular beam epitaxy, showed high electron mobility and sheet resistance with very small temperature dependence. High sensitivity Hall elements and magnetoresistance elements were fabricated using Sn doped InSb thin films and their electrical and magnetic properties were investigated. The potential use of magnetic sensors for non-contact detection of linear motion, rotation and future energy saving in electric power systems was discussed.

キーワード：化合物半導体薄膜磁気センサ、InSb 単結晶薄膜、Sn ドープ InSb 単結晶薄膜、InSb 単結晶薄膜ホール素子、InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子、非接触回転検出

Keywords: Thin film magnetic sensor, InSb thin film, InSb single crystal thin film, Sn doped InSb single crystal thin film, InSb thin film Hall element, InSb thin film magnetoresistance element, non-contact rotation detection

1. 序 論

化合物半導体は Si では実現できないデバイスが実現できる特徴があり重要である。特に、発光素子、超高周波トランジスタ、磁気センサなどが実用化され使われている代表例である。ところで、現在、最も多く使われている動力源はモータである。狭バンドギャップの半導体である InSb や InAs 等の薄膜のホール効果を利用した磁気センサであるホール素子は、VTR やパソコン等の電子機器に良質の動力を供給する DC ブラシレスモータ、別名ホールモータの磁気センサとして多量に使われている⁽¹⁾。

ホール素子は、磁界を利用し非接触で直接位置や回転の検出が出来るセンサである。直流駆動のブラシレスモータの磁気センサとして、高精度の回転制御や電磁ノイズ、擦過音などの音ノイズの少ない小型、超小型のブラシレスモータであるホールモータの開発を実現した。ホールモータは、モータ技術に電子制御、インテリジェント化等、動力の質的向上を実現する革新的な進歩をもたらし、オーディオ、VTR、パソコン等に代表される、映像、情報、その他の電子機器の高性能化、小型化達成等で重要な役割を担って来た。特に、ホールモータの様な小型で良質の動力は現在の

IT 技術では必須である。この為、薄膜 InSb ホール素子に代表される磁気センサは、いまや、狭バンドギャップⅢ－Ⅴ族化合物半導体の有力な応用分野となり、最近の電子産業を支える重要なセンサとして、年間 20 億個に迫る量が世界で使われている。

図 1 に化合物半導体の薄膜を利用した磁気センサであるホール素子の最近の市場の推移を示した。過去、20 年間にホール素子は凡そ 100 倍の生産量の伸びを示している。特に、InSb の薄膜ホール素子はホール素子全生産量の 90%以上を占めていると推定される。

ホール素子は非接触で直接運動する物体の位置や速度を検出でき、この機能を利用して直接動力を制御できる素子である。ホール素子を使う DC ブラシレスモータは、これま

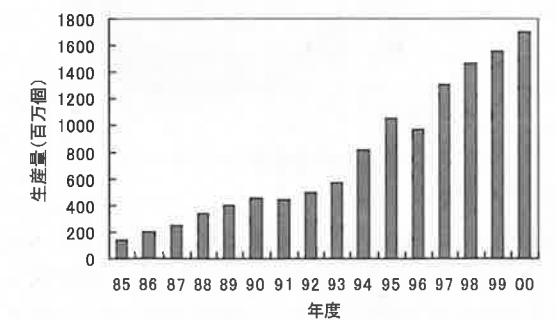


図 1 化合物半導体ホール素子の生産量の推移 (世界)
Fig. 1. Worldwide production of thin film Hall sensors (million/year).

* 旭化成株式会社 研究開発本部 本部長付 チーフリサーチフェロー
〒416-8501 静岡県富士市鯨島 2-1
Chief research fellow, Corporate research and development administration, Asahikasei Corp.
2-1, Samejima, Fuji-city, Shizuoka, 416-8501

で、小型、超小型動力源として、電子機器の小型化、超小型化、高性能化の目的で主として使われた。ところで、ホール素子による動力の小型化は、電子機器の機能面での性能アップや小型化ばかりがその成果ではない。このようなホール素子の効用を簡単に整理してみる。第一は、動力の小型化による電子機器に使われる材料を少なくできる省材料効果である。省材料効果の試算例を述べると、最近の VTR やパソコンの生産台数は凡そ、VTR が 0.7 億台、パソコンが 1.1 億台で合計が 1.8 億台である。これら VTR、パソコンに使われる動力がホール素子により小型化され、1 台当たり 1 g の減量を実現すれば、年間 180 トンの省材料に相当する。10 g の減量ならば年間 1800 トンの省材料になる。電子機器に使われる材料の生産に関わるエネルギー削減による CO₂ 排出の削減につながる。即ち、環境負荷低減効果も大きい⁽²⁾。

第二は、パワーモータのホールモータ化による省エネルギー効果である。ホール素子など磁気センサによる非接触の動力の制御技術の進展が、環境負荷低減につながり、更に、最近では省エネルギーにもつながっている。国内の総発電量の 50%強をモータが消費し、モータの消費電力の 1% 削減は 50 万 kW の発電所を不要とするという試算がある⁽³⁾。この為、パワーモータのホールモータ化は大きな省エネルギーが期待できるホール素子の応用分野であり、将来は火力発電所からの CO₂ 削減や原子力発電所からの放射性廃棄物などの削減が期待されている。既に、家電製品等に使われるパワーモータのホールモータ化も始まっている。図 2 は市販の家庭用洗濯機のホールモータの写真(大きなリングは永久磁石回転子)である。InSb 薄膜ホール素子を用いたハイブリッドホール IC を永久磁石回転子の回転検出に使っている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

もうひとつのホール素子の重要な応用は、非接触電流検出である。ホール素子による非接触電流検出器即ち、電流

センサがある。このホール素子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省エネルギー制御技術は、磁気のイズが大きく磁気センサによる直接回転検出が難しい超大型のモータにも適用できる技術である。

更に、ホール素子や磁気抵抗素子など、薄膜の磁気センサの応用は、電動機による動力制御に限らない。磁気を利用した非接触による運動物体の位置検出への応用で、電動機以外の動力による回転検出はその代表である。薄膜のホール素子や、磁気抵抗素子を使った磁気エンコーダによる回転の高精度検出や、自動車のエンジン回転の検出等である。この様に、高感度のホール素子や磁気抵抗素子などの磁気センサ技術は、省エネルギーや排ガスの削減、さらには安全走行などが課題である自動車の制御用センサ、電気自動車化、動力に関わる電力の削減等で大きな期待が寄せられる技術である。ホール素子や磁気抵抗素子などの薄膜磁気センサの新たな応用分野である。省材料、省エネルギー等、環境負荷低減につながるこれらの新規応用は、新しい環境技術であり、環境にやさしいグリーンテクノロジーである。それに使われるホール素子等の磁気センサはグリーンセンサである。いま磁気センサが期待される所以でもある⁽²⁾。

表 1 には、磁気センサの応用と期待できる効果を簡単にまとめた。

既に、本誌において、著者は、InSb や InAs などの薄膜ホール素子の技術について報告している⁽¹⁾。本解説では、磁気センサに使われる InSb 薄膜技術の最近の状況と課題、及び、当該薄膜技術によるホール素子、磁気抵抗素子の技術、応用など最近の状況について報告する。

InSb は最大の電子移動度を有する化合物半導体であり、その薄膜は、ホール素子や磁気抵抗素子の最も重要な材料である。然るに、InSb は狭バンドギャップのために抵抗率の温度依存性やホール電圧の温度依存性が大きく、低温や 100℃を超える高温でホール素子を磁気センサとして使う

表 1 磁気センサの応用分野と期待できる効用

Table 1. Applications of magnetic sensors and corresponding merits.

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	○		○	○

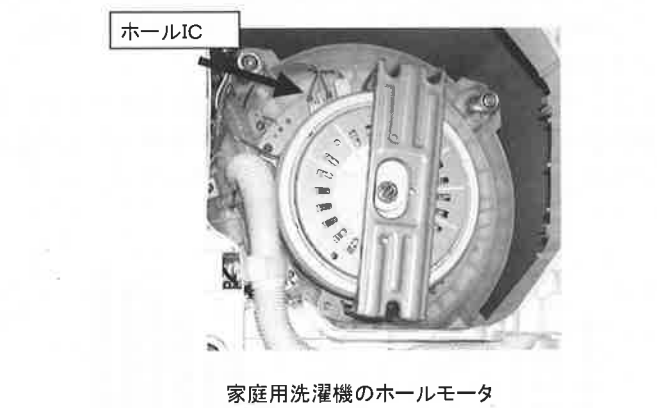


図 2 市販の家庭用電気洗濯機のホールモータの写真(大きなリングは永久磁石回転子、矢印は InSb 薄膜ホール素子を磁気センサに使ったハイブリッドホール IC)⁽⁴⁾

Fig. 2. Hall motor in a commercial home washing machine (Arrow shows hybrid hall ICs with InSb thin film hall sensors).

場合、使いにくいとの歴史的な課題があった。この報告では、少し観点を变えて、InSb 単結晶薄膜の高い電子移動度に着目し、その薄膜技術と、これまで難しいと思われていた InSb 薄膜の抵抗やホール係数の温度依存性を低減する試み、さらには、これらの結果を応用したホール素子や磁気抵抗素子の製作などセンサ応用に注目しの最近の進展や応用、特に、InSb 薄膜への n 型不純物ドーピングやその効果、磁気センサー応用についてのべる。

2. InSb 真空蒸着薄膜の特性と応用上の課題

InSb 薄膜は比較的容易に真空蒸着で製作できる。しかし、その物性的性質はこれまであまり理解が進んでいない面もある。単結晶薄膜についても同様である。

電子移動度の大きいバルク単結晶の InSb ホール素子は定電流駆動すると -2.0%/℃ のホール電圧の大きな温度依存性があることが知られていた^{(6)~(8)}。これは InSb のホール係数の大きな温度依存性に起因する。一方、InSb 真空蒸着薄膜は単結晶に比べて電子移動度は低いがホール素子に应用するとシート抵抗の大きい薄膜を感磁部に使えるので、ホール素子の入力抵抗値が大きくなり定電圧駆動が出来る。このときホール電圧の温度依存性を決めるのは電子移動度である。この結果、InSb 薄膜のホール素子は室温周辺でホール電圧の温度依存性が従来の定電流駆動に比べて一桁小さくなる^{(1)(8)~(11)}。このような温度依存性を少なくできることや低消費電力で駆動出来るなどは薄膜ホール素子の大きなメリットである。この結果、パソコンや VTR など室温周辺で使用される電子機器に InSb 薄膜ホール素子を使うホールモータが多用されるきっかけとなった。

InSb の薄膜化により定電圧駆動が可能となり、ホール電圧の温度依存性は改善されたが、InSb 薄膜の抵抗値の温度依存性は改善されていない。InSb 薄膜のホール素子の素子抵抗値の温度依存性は依然として大きく、温度係数は室温付近で、凡そ -2%/℃ である。この為 InSb ホール素子の実用的な使用温度範囲は室温周辺に限られ、-20℃ 以下の低温や 100℃ を超える高温など、厳しい環境化でのホール素子使用が厳しく制限されるという問題は残った。InSb 薄膜の単結晶の量産と抵抗の温度依存性の低減は InSb を磁気センサとして使う上で最後に残った歴史的課題である。特に、温度依存性は狭バンドギャップに帰因し、その改善は長い間積極的には取り上げられなかった。最近、このような InSb 薄膜の物性的性質に帰因する特性を変えようとの試みと、更に、もう一つの年来の課題であり、実用化技術で必須の InSb 単結晶薄膜の量産と利用についての試みがある⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

真空蒸着法に代わる InSb 単結晶薄膜成長技術として分子線エピタキシー法(以下 MBE 法と呼ぶ)が検討されている。MBE 法は著者の経験に依れば最も簡単に大面積で単結晶を製作できる技術である。更に、薄膜成長中のドーピングも容易な技術である^{(11)~(13)}。InSb 薄膜の温度依存性を変える技術のポイントは単純である。著者らは、GaAs 基板上に成長した InAs 単結晶薄膜の温度依存性を変える試みとして、ドーピ

ング技術を取り上げた^{(12)(14)~(17)}。同じコンセプトがバンドギャップがより小さい InSb にも適用可能である⁽¹³⁾。ホール素子に使われている InSb 真空蒸着膜のホール係数とシート抵抗値は -1.9%/℃ の温度依存性を室温付近で示している⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹³⁾。この温度依存性を一桁少なくしようとするのが InSb 薄膜の温度依存性の低減の試みである。

もし抵抗値の温度依存性を一桁低減できれば、電子移動度が最も大きく、温度依存性が少ない材料が磁気センサとして使えることとなる。更に、MBE 法で薄膜の単結晶を大面積で自由に製作できれば新たな量産性のある高感度磁気センサが誕生し、前述の応用に供せることとなる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。いずれにせよホール素子や磁気抵抗素子などの温度依存性は材料の薄膜の物理的性質に深く関わるので温度依存性の低減技術については材料の物性的な議論が必要である。

3. InSb 薄膜ホール素子のホール電圧と抵抗値の温度依存性

本節では、室温周辺での電子移動度やホール係数の温度依存性について室温周辺で成立すると思われる簡単な議論を行い、InSb の温度依存性低減について説明する。ホール素子のホール電圧 V_H は、検出磁界の磁束密度に比例し、制御電流 I の定電流駆動では、薄膜の厚さにも逆比例し、下記の式で表される

$$V_H = R_H \cdot IB/d \quad \text{.....(1)}$$

ここでは R_H はホール係数で、電子のみが伝導に関与する単純なモデルでは $R_H = 1/en(e$: 電子電荷、 n : 電子濃度) である。 d は薄膜の厚さであり、 B は印加される磁界の磁束密度である。

入力電圧 V_m の定電圧駆動では、ホール電圧 V_H は電子移動度に比例し、下記の式で表される。

$$V_H = \mu_H \cdot w/l \cdot B \cdot V_m \quad \text{.....(2)}$$

ここで w はホール素子の感磁部を形成する薄膜の幅で、 l は長さである。 μ_H は電子移動度である。

ホール素子の抵抗値(ホール素子の感磁部を幅 w 、長さ l と仮定したときの薄膜の抵抗値)は、抵抗率を ρ とすると

$$R_m = \rho \cdot l/wd \quad \text{.....(3)}$$

とよく知られた式で書ける。室温周辺での温度依存性を表現する式を求めるために、

(1)式及び(2)、(3)式の両辺をそれぞれ温度で微分し、若干の整理し、温度依存性を表す温度係数を求める。

定電流駆動のホール電圧 V_H の温度係数は、

$$1/V_H \cdot dV_H/dT = -1/n \cdot dn/dT \quad \text{.....(4)}$$

となり、電子濃度の温度係数と同じとなる。更に、定電圧駆動では

$$1/V_H \cdot dV_H/dT = 1/\mu_H \cdot d\mu_H/dT \quad \text{.....(5)}$$

と書け、電子移動度の温度依存性と同じになる。一方、素子抵抗値の温度依存性は、

$$1/R_m \cdot dR/dT = 1/\rho \cdot d\rho/dT \quad \text{.....(6)}$$

の関係、及び、 $\rho^{-1} = en\mu_H$ の関係から、

$$1/R_m \cdot dR/dT = -1/n \cdot dn/dT - 1/\mu_H \cdot d\mu_H/dT \quad \text{.....(7)}$$

と表わせる。

これらの式から、定電流駆動時のホール電圧の温度依存性を少なくしようとするなら、(4)式の右辺 $-1/n \cdot dn/dT$ を小さくすればよい。 dn/dT はバンドギャップで決まる電子の励起率であり、人為的に変えることは難しいが、室温周辺での変化はあまり大きくないと考えられる。したがって、InSb にドナー不純物をドーピングし電子濃度 n を大きくすると(4)式の右辺が小さくなり、定電流駆動のホール電圧の温度依存性は小さく出来る。一方、(5)式からわかるように定電圧駆動では、ドーピングで温度依存性を小さくすることは難しい⁽¹³⁾。

次に、素子抵抗値の温度依存性の低減であるが(7)式から明らかなように、第一項の伝導電子の温度励起により伝導帯の電子が増加することで生じる温度変化はドーピングで小さくすることが可能である。しかし、(7)式の第二項は難しい。しかるに、幸いなことに、電子移動度の温度依存性は室温周辺ではホール係数の一桁少ない値である。(7)式の右辺は、不純物のドーピングで第一項が小さくなれば一桁小さくできる。このように、簡単な計算から n 型の不純物ドーピングによりホール電圧や抵抗値の温度依存性を減少できる可能性が解る。次節では、InSb の単結晶薄膜の製作と本節の理論に基づく n 型不純物のドーピングの技術を述べる。

4. 単結晶 InSb 薄膜の製作と Si, Sn のドーピング

〈4・1〉 GaAs(001)基板上への InSb 薄膜の単結晶成長技術とドーピング

磁気センサの製作では、電子移動度の大きい薄膜を製作することが必要である。出来れば、電子移動度が $30,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上の InSb 単結晶薄膜を、生産性よく製作できることが好ましい。更に、前節の理論から、InSb の大きな問題とされていた温度依存性を低減する為、ドナー不純物の InSb へのドーピングも必要である。このようなことが容易に出来る結晶成長法として分子線エビタキシー法(MBE 法)を使うことが出来る。GaAs と InSb の間にはおよそ 14%の格子のミスフィットがあるが、単結晶の GaAs 基板上には InSb 単結晶薄膜が容易にエビタキシャル成長できる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。得られる薄膜の電子移動度も大きく、磁気センサ材料としても好適である。また、この方法では、結晶成長中にドナー不純物である Si や Sn を容易にドーピングできる。ところで、不純物をドーピングすると InSb 薄膜の電子移動度は低下するが、僅少である。以下、InSb 単結晶薄膜の GaAs(001)基板上への結晶成長の結果について簡単に触れる⁽¹³⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

GaAs 基板上に MBE 法でエビタキシャル成長し製作した InSb 単結晶薄膜はドーピングしないものが電子移動度は最大である。一方、ドナー不純物のドーピングで電子移動度は若干下がる。しかし、Si や Sn をドーピングしても磁気センサ材料として好適な電子移動度が $30,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上の薄膜が得られる。Se, Te, S 等 VI 族元素もドナー不純物としては候補であるが、

蒸気圧が大きく、蒸気圧制御が難しい。この為、ここでは固体ソースから蒸発させてドーピングできる Si, Sn を不純物として選んだ。Si に比べて Sn はドーピングしやすく同じ電子濃度ならば電子移動度も高い。更に、結晶成長時の制御も容易である。

MBE 法で製作した厚さ $1.0\mu\text{m}$ の InSb の薄膜の電子移動度と電子濃度の関係を図 3 に示した。

Si に比べて、Sn ドープ膜の電子移動度が大きい。この原因ははっきりしない。結晶成長時の Si の蒸発源温度が $1,100^\circ\text{C}$ を超えておりその輻射の影響の可能性もあると考えられる。更に、Sn は Si に比べて 400°C 低い温度で蒸発させる事が出来、同じ濃度のドーピングが可能で、結晶成長時の制御性にも優れる。基板への輻射の影響も少ないと思われる⁽¹³⁾。

図 4 には、InSb 薄膜の電子移動度の膜厚及び電子濃度依

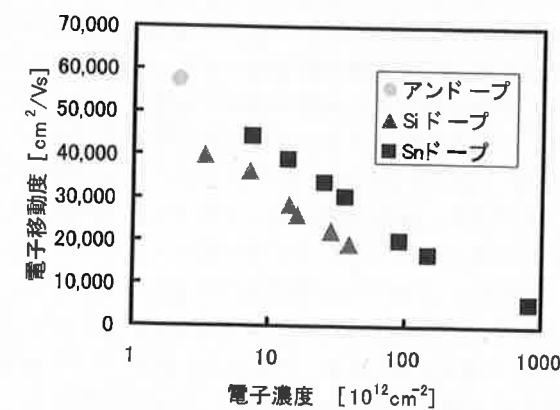


図 3 GaAs(001)基板上に成長した厚さ $1.0\mu\text{m}$ の InSb の薄膜の電子移動度と電子濃度の関係

Fig. 3. Relation between electron mobility and electron concentration of InSb thin films with $1.0\mu\text{m}$ thickness grown on GaAs(001) substrates.

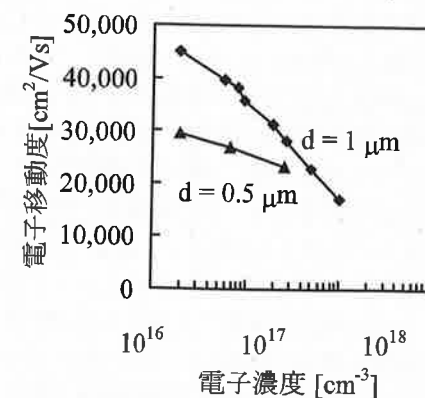


図 4 GaAs 基板上に成長した InSb 薄膜の電子移動度の膜厚及び電子濃度依存性

Fig. 4. The relation between electron mobility and electron concentration at room temperature for InSb thin films with thickness of 0.5 and $1.0\mu\text{m}$ grown on GaAs(001) substrates.

存性を示した。このように、MBE 法で製作した InSb 薄膜には電子移動度の膜厚依存性がある⁽²⁰⁾。

まとめると、比較的操作用も容易で、危険なガスなども使わずに、MBE 法によれば GaAs 基板上に比較的ホール素子や磁気抵抗素子を製作するのに好適な電子移動度が $30,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上の InSb 単結晶薄膜が容易に製作でき、磁気センサ応用に供することが出来る。

〈4・2〉 InSb 薄膜への n 型不純物のドーピング効果⁽²⁰⁾

InSb 薄膜へのドーピング効果であるが、その効果が直接現れる電子濃度 n の温度依存性を図 5 に示した。ドーピングで温度変化が少なくなっていることが明瞭に読み取れる。

次に、図 6 に GaAs 基板上に成長した厚さ $1.0\mu\text{m}$ の InSb 薄膜の種々のドーピング濃度に対応した電子移動度の温度依存性を示した。アンドープの InSb 薄膜とドーピングした膜では低温で大きな違いがある。

アンドープの InSb 単結晶薄膜の電子移動度は、室温付近にピークを持ち低温では大きく低下している。一方、Sn をドーピングした InSb 薄膜の電子移動度は温度の低下に従っ

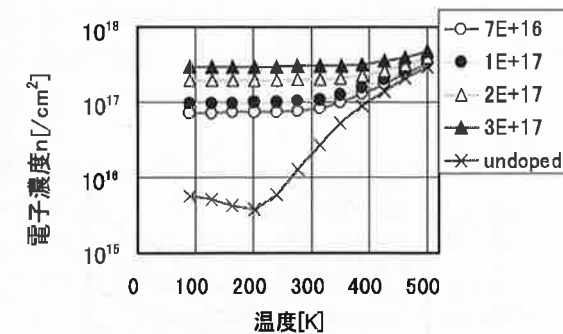


図 5 GaAs 基板上に成長した Sn をドーピングした厚さ $1.0\mu\text{m}$ の InSb 薄膜の電子濃度 n の温度依存性

Fig. 5. Temperature dependence of the electron concentration of $1.0\mu\text{m}$ Sn doped InSb thin films grown on GaAs(001) substrates.

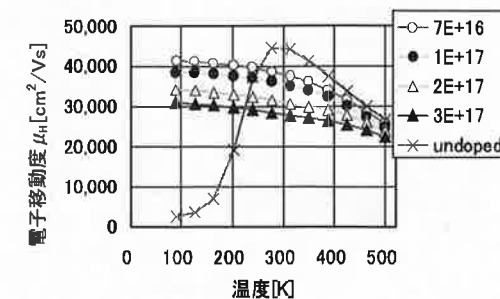


図 6 GaAs 基板上に成長した厚さ $1.0\mu\text{m}$ の Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜の電子移動度の温度依存性

Fig. 6. Temperature dependence of the electron mobility of the Sn doped InSb thin films with thickness of $1.0\mu\text{m}$ grown on GaAs(001) substrates.

て単調に増大している。その温度による変化は明らかにアンドープの薄膜より少ない。ドーピングすることで InSb 薄膜ではいずれもアンドープに比べて温度依存性が小さくなっている。即ち、電子移動度もドーピングで温度依存性が大幅に低減している。特に室温以下の低温で著しい。これは前節の理論では予測してないことである。詳しい議論は省略するが、この現象は薄膜の厚さ方向の電子移動度の大きな変化、即ち、GaAs と InSb の境界面に近い部位の電子移動度が低く、離れるに従って電子移動度が大きくなる薄膜の内部構造に起因する現象として説明できる⁽²⁰⁾。

不純物のドーピングにより、電子濃度の温度依存性が小さくでき、更に、上述の図 6 に示したように、電子移動度の温度依存性も少なくなる。前節の(7)式に従えば、InSb の薄膜の抵抗の温度依存性は不純物ドーピングで小さく出来る。図 7 には、厚さ $1.0\mu\text{m}$ の InSb 薄膜の抵抗率の温度変化と電

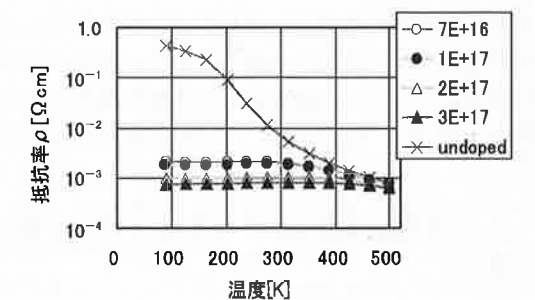


図 7 GaAs 基板上に成長した厚さ $1.0\mu\text{m}$ の Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜の抵抗率 ρ の温度変化と電子濃度の関係

Fig. 7. Temperature dependence of the resistivity ρ of the Sn doped InSb thin films with thickness of $1.0\mu\text{m}$ grown on GaAs(001) substrates.

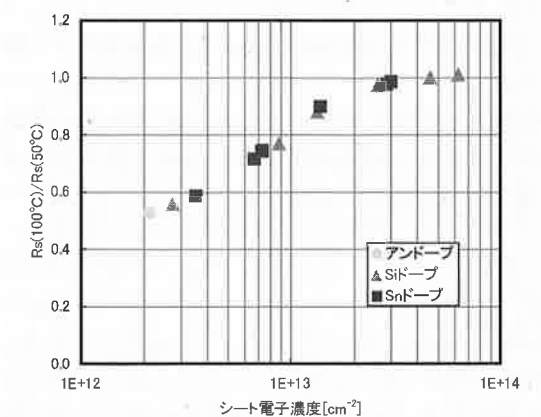


図 8 n 型不純物をドーピングした InSb 単結晶薄膜のシート抵抗値 R_s の 50°C と 100°C の比 (シート抵抗値の温度依存性の低減は電子濃度のみで決まることを示している)

Fig. 8. Sheet resistance ratio $R_s(100^\circ\text{C})/R_s(50^\circ\text{C})$ of the Sn and Si doped InSb thin films with various electron concentrations with thickness of $1.0\mu\text{m}$.

子濃度の関係を示した。前節の理論に従い電子濃度の増大とともに抵抗率の温度依存性、即ち、InSb 単結晶薄膜の抵抗の温度依存性が低減していることが理解される。

ところで上述の現象はSnをドーブしたInSb薄膜についての現象である。3節の理論では、温度依存性の低減は電子濃度のみで決り、ドーパントの種類によらない。図8は、SiとSnをドーブしたInSb薄膜の50℃と100℃のシート抵抗値の比と電子濃度の関係を示した。電子濃度の増加に従いこの比が1に近くなることを示している。即ち、電子濃度や薄膜の抵抗値の温度依存性の減少は、前節の理論に従い、SiやSnなど不純物の種類によらず、電子濃度のみで決まる。

このように、SnやSiのドーブにより、InSb単結晶薄膜の抵抗値や電子濃度、従ってホール係数、さらには電子移動度までも温度依存性が減少する。図7や図8に示した抵抗値の温度依存性の減少は、InSb薄膜のホール素子や磁気抵抗素子等の磁気センサを製作する上で大きなメリットである。今までInSbホール素子は温度依存性が大きく、-20℃以下の低温や100℃を超える高温でのホール素子の駆動は難しかったがドーピング技術はこの課題を解決し、将来の磁気センサ特性の飛躍的向上と応用範囲の拡大を約束する。

5. InSb 単結晶薄膜のホール効果とホール素子応用⁽²¹⁾

前節で述べたように、ドナー不純物のドーピングにより、InSb薄膜の温度依存性は低減できる。ここでは、ホール素子に応用した場合に得られる特性について紹介する。表2には試作したInSb単結晶薄膜ホール素子の特性の例を示した。

抵抗値の温度係数と定電流駆動のホール電圧の温度係数はドーピングで一桁小さくなっている。更に、図9には定電圧駆動時の(a)アンドープ、(b)Snドーブのホール電圧と磁

表2 試作した厚さ1.0μmのInSb単結晶薄膜ホール素子の特性

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

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

界の磁束密度との関係を示した。

ドーピングにより磁束密度に対するホール電圧の直線性は変化がなく、ホール電圧は極めて良い磁束密度との直線関係を示している。

また、図10にはGaAs基板上に成長した厚さ1.0μmのInSb薄膜で製作したホール素子の(a)定電流駆動、(b)定電圧駆動のホール電圧の温度依存性を示した。Snドーピングによる電子濃度の増大によって定電流駆動では温度依存性が低減している様子が明らかである。

また、図11にはGaAs基板上に成長した厚さ1.0μmのInSb薄膜で製作したホール素子の入力抵抗値の温度依存性を示した。

Snドーピングにより大幅に温度依存性が少なくなっていることがわかる。また、この結果より、ドーピングすることでアンドープでは難しかった広い温度範囲、例えば-40～150℃の温度範囲での駆動も出来ることが明らかになった。

更に、Snドーピングによる実用上重要な効果は、オフセット電圧(ゼロ磁界時の出力端子電圧で不平衡電圧とも呼ばれる)の温度変化も極めて少なくなることである⁽²¹⁾。特に、定電圧駆動時のオフセット電圧の温度依存性が極めて少ないことがドーピングしたホール素子の特徴である。このように、オフセット電圧の温度依存性が極めて少ないこ

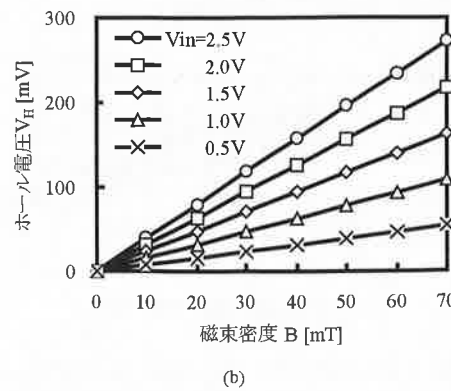
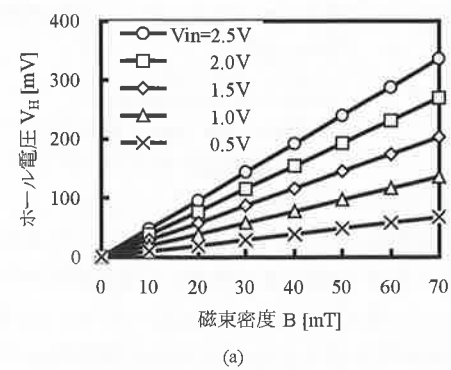


図9 定電圧駆動時の(a)アンドープ、(b)Snドーブのホール電圧と磁界の磁束密度との関係

Fig. 9. V_H -B relations of the Hall elements made from (a) undoped and (b) Sn doped InSb thin films with thickness of 1.0 μm grown on GaAs(001) substrates.

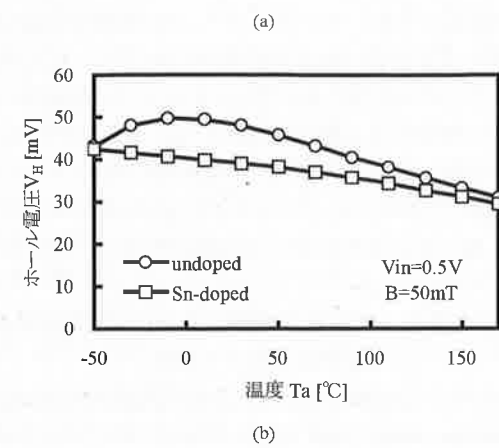
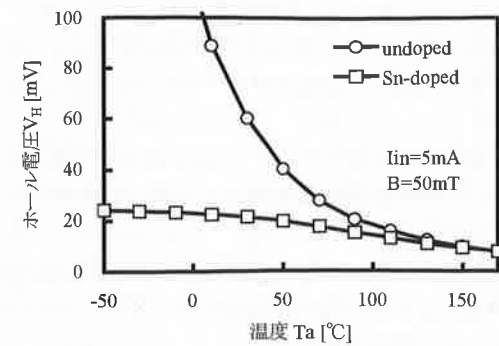


図10 GaAs基板上に成長した厚さ1.0μmのInSb単結晶薄膜で製作したホール素子の(a)定電流駆動、(b)定電圧駆動のホール電圧の温度依存性 (定電流駆動ではSnドーピングによる電子濃度の増大に対して温度依存性が低減している)

Fig. 10. Temperature dependence of the Hall voltage of the Hall elements made from the undoped and Sn doped InSb thin films with thickness of 1.0 μm grown on GaAs(001) substrates, (a) constant current driving and (b) constant voltage driving.

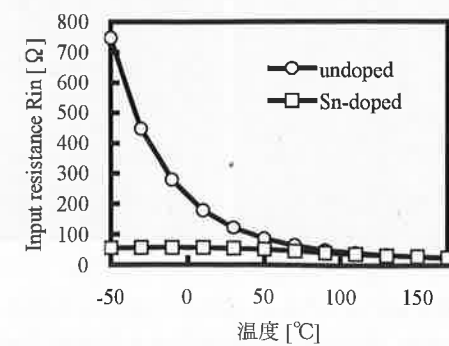


図11 GaAs基板上に成長した厚さ1.0μmのInSb単結晶薄膜で製作したホール素子の入力抵抗値の温度依存性
Fig. 11. Temperature dependence of the input resistance of the Hall elements made from the InSb thin films with thickness of 1.0 μm grown on GaAs(001) substrates.

とは非接触の電流検出などの用途では極めて重要なことである⁽²¹⁾。

このように単純にドナー不純物のドーピングでこれまで難しいと思われたInSb単結晶薄膜ホール素子の温度依存性が低減できる。しかしながら、ドーピングにより薄膜のシート抵抗値が小さくなるので用途によっては問題がある。しかし、膜厚を薄くすることでシート抵抗値の低下をある程度押さえることが可能である。更に、MBE法によれば、従来の真空蒸着に比べて、製作できるInSb薄膜は単結晶の薄膜であり、薄くても大きな電子移動度が得られる。この結果、高感度、高信頼性のホール素子を実現した。この素子は、従来の用途はもちろん、電流検出、回転検出、地磁気などの検出等、多くの期待される用途がある。

6. InSb 薄膜の磁気抵抗効果と磁気抵抗素子応用

電子移動度が大きく、更に温度依存性が少ないInSb単結晶薄膜は、磁気抵抗効果も大きく磁気抵抗素子材料としても有用である。この磁気抵抗効果を利用する素子が磁気抵抗素子(MR)である。磁気抵抗効果は、ホール効果と同様に半導体に流れる電流に垂直に磁界を加えると半導体の電気抵抗が増加する現象である。磁気抵抗効果は一般に、半導体から作られた素子の抵抗値が増加する効果と素子を構成する半導体の抵抗率が増加する磁気抵抗率効果がある。工学的に重要なのは前者で、ホール効果と同じく非接触センサなどの応用がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。抵抗や抵抗率の変化は半導体の電子移動度 μ_H と磁束密度 B との積 $\mu_H \cdot B$ の関数であり、磁界が小さい場合は、半導体の電子移動度と磁束密度の積の自乗、即ち、 $(\mu_H \cdot B)^2$ に比例する。ところが、磁気抵抗効果による抵抗変化は磁界が大きいくところでは $\mu_H B$ に比例して増加する⁽⁶⁾。

ところで、2端子素子の磁気抵抗素子では素子の電極間の距離を L 、素子の幅を W とすると L/W が小さくなるにつれて磁気抵抗効果による抵抗変化が大きくなる現象がある。これは形状磁気抵抗効果と呼ばれ、磁界のローレンツ力により電流を運ぶ電子が半導体内を斜め走行し、結果として電子の走行距離が長くなり抵抗の増加を生じる効果である⁽⁶⁾⁽²¹⁾⁽²³⁾。この形状磁気抵抗効果は、工学的応用上重要な現象である。一方、形状に依らない磁気抵抗率効果があり、形状磁気抵抗効果に比較してその値は小さい。実際の素子では両者の寄与は磁気抵抗効果として区別しない。実用的な磁気抵抗素子では大きな形状効果を得る目的で、 L/W を小さく製作する都合上から、図12に示すように感磁部である半導体の薄膜表面に簾状の多数のショートバー電極を形成した構造で製作する⁽¹³⁾。

ところで、磁気抵抗素子の材料であるが、上述の、磁気抵抗素子の磁界特性から、電子移動度 μ_H が大きい材料が適しており、特に、抵抗変化が電子移動度の2乗に比例する事から、ホール素子応用に比べて更に大きな電子移動度材料が必要とされ、長い間バルクのアンドープInSb単結晶が好まれて磁気抵抗素子材料として用いられて来た。然るに、

大量生産がしにくいことや均一の素子特性が得にくい、小型、又は微細素子が高精度で製作しにくいなどの問題があった。また、ホール素子の場合と同様、InSb は抵抗値の温度依存性が凡そ $-2\%/^{\circ}\text{C}$ と大きく、実用上使いにくく、改善が求められていた。この為、フォトリソグラフィを応用して微細加工できる高電子移動度の薄膜の磁気抵抗素子材料が求められていた。薄膜が好ましい理由は、①素子抵抗値が大きく出来る、即ち、応用上、磁気センサとして出力電圧が大きく取れる、②素子化の為の微細な加工が容易に出来ることである。この為、最近、微細加工できる高電子移動度の材料として GaAs 基板上の InSb 薄膜、更には、抵抗の温度依存性を低減した Sn や Si ドープの InSb 薄膜の磁気抵抗素子への応用、及び、磁気抵抗素子の各種新規応用技術の研究が進んでいる^{(13)(22)~(26)}。

図 13 に GaAs 基板上に MBE 法で成長した厚さ $1\mu\text{m}$ のアンドープ及び電子濃度 $7\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ の Sn 及び Si をドープした InSb 薄膜の磁気抵抗効果の例を示した。図 13 で R_0 は磁

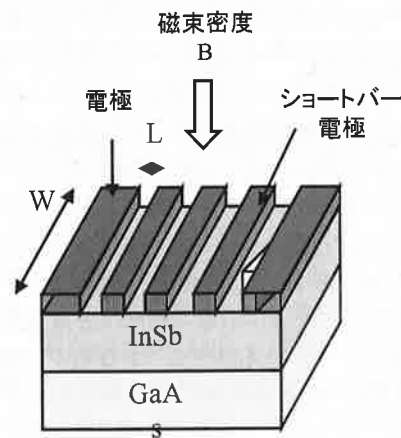


図 12 磁気抵抗素子の構造 (半導体の薄膜表面に簾状の多数のショートバー電極を形成した構造)

Fig. 12. Illustration of the magnetoresistance element with short bar electrodes.

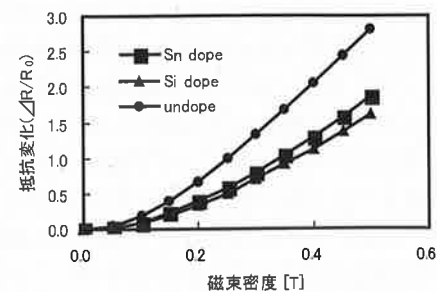


図 13 GaAs 基板上に MBE 法で製作した InSb 薄膜の磁気抵抗効果 ($L/W=0.24$)

Fig. 13. Magnetoresistance effects of InSb thin films with thickness of $1.0\mu\text{m}$ grown on GaAs(001) substrates ($L/W=0.24$).

界が無い時の磁気抵抗素子の抵抗値で ΔR は磁界を印加した時の抵抗の変化高、 B は印加磁界の磁束密度である。

図 13 からわかるように抵抗変化率 $\Delta R/R_0$ は $(\mu_H \cdot B)^2$ に比例している。更に大きな磁界では、抵抗変化は $\mu_H \cdot B$ に比例する。

表 3 には、2 端子素子として、GaAs 基板上に製作した厚さ $1.0\mu\text{m}$ の InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子の特性例を示した⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。

また、図 14 は、試作した InSb 磁気抵抗素子の写真である。(a)は、基板上に製作された磁気抵抗素子チップで、(b)はパッケージされた製品である。

電子移動度の大きいアンドープの InSb 薄膜を使用した磁気抵抗素子は室温での磁気抵抗効果が大きく、抵抗変化も大きい。これに対して、Si、や Sn をドープした場合は、不純物散乱の増大により電子移動度が低下し磁界での抵抗変化は若干小さくなる。然るに、たとえば、Sn をドープした InSb の磁気抵抗素子は、アンドープのものより室温での磁界感度は若干低下するが応用上問題となるほどではない。

表 3 GaAs 基板上に成長した厚さ $1\mu\text{m}$ の InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子の特性

Table 3. Characteristics of InSb magnetoresistance elements made from single crystal thin film with thickness of $1.0\mu\text{m}$ grown on GaAs(001) substrates.

	アンドープ	Sn ドープ
抵抗変化高 $\Delta R(0.3\text{T})/R(0\text{T})$	1.33	0.79
素子抵抗 $R(\Omega)$	860	340
抵抗の温度係数 β_R ($\%/^{\circ}\text{C}$)	-1.7	-0.24

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

0.74mm

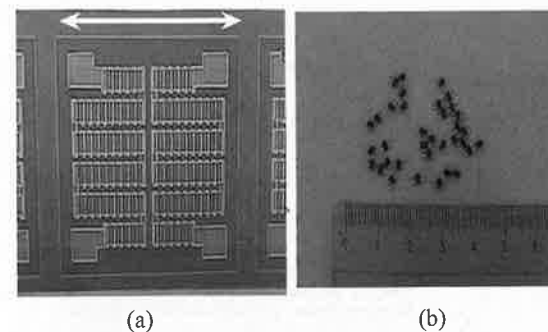


図 14 MBE 法により GaAs 基板上に成長した厚さ $1\mu\text{m}$ の Sn ドープ InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子の写真、(a)は、基板上に製作された磁気抵抗素子チップ、(b)はパッケージされた製品

Fig. 14. Photographs of the magnetoresistance elements, (a) the magnetoresistance element chip and (b) the magnetoresistance elements with package.

Sn をドープした場合は、感磁部を構成する InSb 薄膜の温度依存性は小さく、磁界を加えない時の磁気抵抗素子の素子抵抗値の温度変化がアンドープの場合より一桁少なくなり、更に、温度によるオフセットの安定性などですぐれる。また、広い温度範囲で安定して使えることや、温度補正が容易等、使いやすくなり、実用上のメリットが大きい^{(25)~(27)}。

更に、磁気抵抗素子は、低磁界では磁界の検出感度はホール素子などに比較して劣る。然るに、高磁界では磁束密度の変化に対して抵抗変化が大きいので、バイアス磁界を磁気抵抗素子に加え、動作磁束密度を大きくすると小さな磁界変化に対しても大きな抵抗変化が得られ、高感度で磁界変化を検出できる。高磁界での感度はホール素子に匹敵する。このため、磁気抵抗素子を使うときは、バイアス磁界を永久磁石などで加えて使用する場合が多い。更に、バイアス磁界を加えて、磁束密度変化と抵抗変化が比例関係になる動作点で磁気抵抗素子を使うことも出来る。磁気抵抗素子は、磁気を抵抗変化で検出する為、広い範囲の磁気信号を拾う事が出来る。

InSb の薄膜化と温度依存性の改善は、長い間 InSb 磁気抵抗素子の実用上の大きな課題であった。この課題は、筆者等によれば、前節で述べたホール素子の場合と同様、MBE 法による InSb の薄膜化とドーピングという手段により解決した。即ち、 n 型の不純物である Si や Sn などを結晶成長中に InSb 薄膜にドーピングし、電子移動度をあまり低下させないで、従って、感度低下も僅少で、温度依存性が一桁小さい InSb 薄膜磁気抵抗素子が実現した。この新たな薄膜の磁気抵抗素子は、室温を中心に広い温度範囲で安定した駆動が可能で、将来の各種の応用の可能性が期待されている⁽²⁷⁾。

最後に、上述の磁気抵抗素子の応用について触れる。従来からの、最も代表的な磁気抵抗素子の応用は、磁気を利用し非接触で電気信号を発生する非接触のポテンシオである。角度検出や、位置検出、各種の位置制御が非接触で可能である。非接触で回転を制御することが必要な工作機械などの機器に使われる非接触磁気エンコーダのセンサとしても有用である。

更に、磁気抵抗素子は電力を使うモータの回転検出はもちろん、電動機に限らず他の動力による回転の検出も可能である。しかも、磁束を直接検出するので、超低速から(原理的には静止から)、超高速まで回転速度によらない検出信号が得られる。これは、磁気抵抗素子の最も得意とするところである。このような、磁気抵抗素子の特性から、自動車エンジンや関係する回転の検出にも使われ始めた。従来のコイルと鉄の歯車を利用した回転検出では、検出原理が電磁誘導を利用する為、検出信号が速度に大きく依存し、低速では信号が得られない。一方、磁気抵抗素子を使う回転検出ではゼロ速まで安定した信号が得られる。この機能を利用し、最近、米国では MOCVD により製作したアンドープの InSb 薄膜の磁気抵抗素子を用いて車載用の回転検出センサを製作し、実用化している例がある⁽²²⁾。従来のコイル式回転速度検出器に比較してより低速まで検出でき、走

行時の安全性が向上するので、将来の普及が期待されている。

図 15 には、回転軸に取り付けた鉄の歯車の歯に依る磁束の変化を 3 端子の差動型の磁気抵抗素子で検出し回転速度を検出する原理を示した。図 15 に示すように、永久磁石を使ってバイアス磁界を加える事でホール素子に比較して高感度で回転の検出が可能である。

図 16 は、図 15 で示した磁気抵抗素子の回転検出センサで得られる信号と、従来のコイル式のセンサから得られる信号(出力電圧)を比較したものである。磁気抵抗素子を使った場合は信号出力が回転速度に依らず低速まで安定して検出できる。一方、コイルでは低速で信号が減衰している⁽²⁷⁾。

この様に磁気抵抗素子による回転検出では、磁束密度を直接検出できるので、静止状態(ゼロ速度)から高速回転まで速度に依らない検出信号が得られる。特に、Sn や Si をドープした InSb 薄膜の磁気抵抗素子は温度依存性が少なく、広い温度範囲で安定した動作が出来るので、安全性を重視する自動車などの回転検出応用等が期待されている。また、ホール素子とは違った応用が出来る非接触センサとして角度位置、回転速度、回転の角速度やリニア位置検出等に応

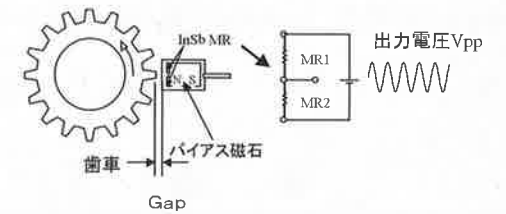


図 15 磁気抵抗素子(MR)により鉄の歯車の歯を検出することで回転を検出する原理:差動型 MR(MR1,MR2)はバイアス磁石により動作点を高磁界に設定

Fig. 15. The principle of the rotating gear tooth detection by thin film magnetoresistance element.

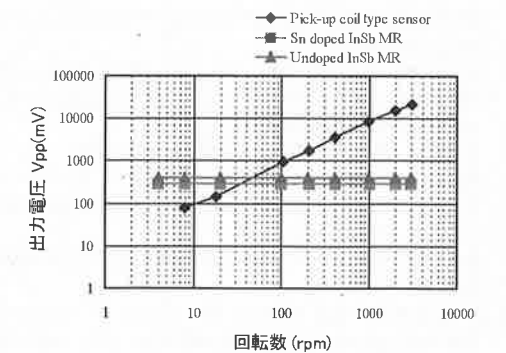


図 16 磁気抵抗素子とコイルによる回転検出時の出力電圧の回転数依存性の比較(磁気抵抗素子を使うと検出信号が速度に依らない)

Fig. 16. Rotational velocity dependence of the output signals from the magnetoresistance elements and pick up coil detecting the rotating gear.

用が可能である。更に、磁気抵抗素子は、上述の応用分野とはまったく別の超微弱磁界変化の検出も可能である。印刷された磁気インクパターン検出等の用途もある。この様に新に開発された薄膜の高感度で温度依存性の少ない磁気抵抗素子は、今後の応用の広がりが期待される。

7. まとめ

Ⅲ－Ⅴ 族化合物半導体のうちで狭バンドギャップの InSb 薄膜はホール素子や磁気抵抗素子等の磁気センサ材料として好適である。薄膜のホール素子が実用化され、小型で質の良い動力として電子機器に使われている。新たな薄膜の磁気センサ材料として InSb 単結晶薄膜の可能性をまとめた。薄膜材料技術の進歩により、MBE 法等単結晶薄膜の成長技術が生まれ、自由に高電子移動度で且つ温度依存性の少ない InSb 単結晶薄膜が製作され、従来出来なかった高感度のホール素子や磁気抵抗素子等新規の磁気センサが開発された。これらの、ホール素子や磁気抵抗素子など新しい薄膜磁気センサは、環境負荷低減なども視野に入れて、動力の非接触制御をスタートに、いまや電子、電気、機械工業、交通システムなど産業を支える重要なセンサとして期待されている。InSb 薄膜の材料技術には、未だ未解決の課題も残されているが、21 世紀の人類に対する大きな寄与を期待したい。

(平成 15 年 1 月 16 日受付)

文 献

(1) I. Shibusaki : “Practical High Sensitivity Hall Elements for Magnetic Sensor by thin Film Technology”, *T. IEE Japan*, Vol.119-E, No.8/9, pp.405-410 (1999-9) (in Japanese)
柴崎一郎:「薄膜ホール素子の開発とセンサ応用」, 電学論 E, 119, 8/9, p.405 (1999-8/9)

(2) 工藤徹一・御園生誠編: グリーンマテリアルテクノロジー, 講談社サイエンティフィク, p.110 (2002)

(3) 桧垣俊郎:「モータの高効率化とリサイクル化への取り組み」, 1997 年モーター技術シンポジウム, 日本能率協会

(4) K. Ishibashi, I. Okada, and I. Shibusaki : “High-sensitivity Hybrid Hall Effect ICs with Thin Film Hall Elements”, *Sensors and Materials*, Vol.14, No.5, p.253 (2002-5)

(5) K. Ishibashi, I. Okada, and I. Shibusaki : “High sensitivity Hybrid Hall Effect ICs with Thin Film Hall Elements”, Technical Digest of the 18th Sensoes Symposium, p.245 (2001)

(6) 片岡照栄: 磁電変換素子, 日刊工業新聞社 (1970)

(7) Weiss: 磁電変換素子の構造と応用(片岡照栄 訳), コロナ社 (1974)

(8) 蒸着ホール素子とその特性(半導体の先端技術集成), ㈱経営システム研究所, p.373 (1984)

(9) 柴崎一郎:「高感度ホール素子とその実用化」, 日化協月報, 41, 5, p.12 (1988)

(10) I. Shibusaki : “High Sensitive Hall element by vacuum deposition”, Technical Digest of the 8th Sensor Symposium, p.211 (1989) (IEE Japan)

(11) P.Ripka, Editor : “Magnetic Sensors and Magnetometers 5.2 High Electron Mobility Thin-Film Hall Elements”, Artech House, p.184 (2001)

(12) I. Shibusaki : “Mass production of InAs Hall elements by MBE”, *J. of Crystal Growth*, 175/176, p.13-21 (1997)

(13) 岡本 敦・柴崎一郎:「GaAs 基板上への InSb 薄膜の成長」, 応用物理, 67, p.193 (2000)

(14) 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, p.267 (1991)

(15) I. Shibusaki, 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, p.113 (1991) (IEE Japan)

(16) I. Shibusaki, Y. Kanayama, T. Ito, F. Ichimori, K. Nagase, T. Yoshida, and K. Harada : “High Sensitive thin film InAs Hall elements by MBE”, Digest of Technical Papers, Transducers, IEEE, p.1069 (1991)

(17) 柴崎一郎・楳野 隆・田近克彦: InAs ホール素子, 日本特許: P1598818

(18) 赤荻隆之・芦原 新・岡本 敦・柴崎一郎: 「GaAs 基板上に成長した InSb 及び InAs の界面構造の TEM 観察」, 第 9 回電気学会東京支部沼津・山梨支所研究発表会, p.20 (2002)

(19) I. Shibusaki : “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, p.137

(20) A. Okamoto and I. Shibusaki : “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) p.219, To be published Journal of Crystal Growth.

(21) I. Shibusaki, A. Okamoto, A. Ashihara, and K. Suzuki : “Properties and Applications of InSb Single Crystal Thin Film Hall Elements”, Technical Digest of Sensor Symposium, p.233 (2001)

(22) J.Hermans, D.L.Partin, C.M.Thrush, and L.Green : “Narrow-gap semiconductor magnetic field sensors and applications”, Semiconductor Science Technology 8, S424-430 (1993)

(23) T. Yoshida, A. Okamoto, S. Muramatsu, N. Kuze, and I. Shibusaki : “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, P.417 (1997)

(24) A. Okamoto, T. Yoshida, S. Muramatsu, and I. Shibusaki : “Magneto-resistance effect in InSb thin film grown using molecular beam epitaxy”, Journal of crystal growth, Vol.201, p.765 (1999)

(25) A. Okamoto, A. Ashihara, and I. Shibusaki : “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, p.514 (1999)

(26) A. Okamoto, A. Ashihara, T. Akaogi, and I. Shibusaki : “InSb thin films grown on GaAs substrate and their magneto-resistance effect”, Journal of Crystal Growth, Vol.227/228, p.619 (2001)

(27) A. Okamoto, A. Ashihara K. Nishimura, H. Goto, K. Saotome, and I. Shibusaki : “Properties and Applications of InSb Single Crystal Thin Film Magneto-Resistance Element”, Technical Digest of Sensor Symposium, p.239 (2001)

柴 崎 一 郎 (正員) 1942 年 11 月 17 日生。1966 年東京理科大学理学部物理学科卒業。1971 年東京教育大学大学院博士課程物理学専攻修了 (理学博士)。物理教室勤務を経て 1974 年旭化成工業㈱入社、ホール素子の開発を担当。技術研究所室長、旭化成電子㈱開発部次長を経て 2001 年より研究開発本部本部長付チーフリサーチフェロー (現職)。昭和 62 年度大河内記念生産賞, 1996 年度科学技術庁長官賞, 平成 4 年度関東地方発明奨励賞, 平成 11 年度関東地方発明奨励賞, 各受賞。物理学会, 応用物理学会, 応用磁気学会, IEEE, 次世代センサ協議会各会員。

