

解説

特集：狭ギャップ半導体およびシリコンスピントロニクス of 最近の話題

狭ギャップ半導体の物性と磁気センサ応用

Transport Properties of Narrow Gap Semiconductor Thin Films and Magnetic Sensor Application

柴崎一郎 豊橋技術科学大学／公益財団法人 野口研究所

I. Shibasaki, Toyohashi University of Technology/The Noguchi Institute
Tel: +81-532-81-5116, Fax: +81-532-44-1562/Tel: +81-3-3961-3255, E-mail: shibasaki@nogi.jp

Transport properties and doping effects of polycrystal and single crystal thin films and quantum wells of narrow gap III-V compound semiconductors such as InSb and InAs were measured and reviewed. The transport properties unique to the thin films and quantum wells were explained as a large lattice mismatch effect with the substrates. n-Type doping reduced the temperature dependence of properties such as resistivity, mobility, and carrier density. Application of InSb thin films to Hall elements with high sensitivity to magnetic sensors is extensive. In fact, over the past 15 years, more than 1 billion or more Hall elements have been used every year in Hall motors to drive every kind of electronic and information systems, for example, VCRs, PCs, mobile phones and home use electrical systems. Additionally, a very large magneto-resistance effect observed in Sn-doped InSb single crystal thin films was measured and applied to highly reliable and fine rotation sensors.

Key words: narrow gap material, InSb thin film, InAs thin film, quantum well, magnetic sensor, Hall effect

1. 序 論

1980年代の初頭以来、急速に普及が始まったVTRやパソコンなどの映像、電子、情報機器が必要とした超小型の動力は、高性能DCブラシレスモータ（ホール素子を回転検出に使うのでホールモータとも呼ばれる）である。コイルに変わり永久磁石を回転子に使い、接点スイッチのブラシがないため、①超小型で製作できる、②電磁ノイズの発生が全くなく、さらに、③角速度を精密に制御できるという3点セットを有する。InSbの薄膜のホール効果を利用した、超小型で高感度の磁気センサである高感度InSb薄膜ホール素子が、1980年代の初頭に開発、量産され、初めてホールモータという極小動力、マイクロモータの量産・利用が可能となった^{1)~3)}。この動力の小型化、マイクロ化のインパクトは絶大であり、映像、電気・電子、情報システムの超小型化、パーソナル化、携帯化などのキー技術であった。こうして、高感度InSb薄膜ホール素子を使った超小型ホールモータは、VTRのシリンダモータやキャプスタンモータ、さらにパソコンのメモリ駆動（フロッ

ピーディスク駆動、CD-ROM駆動、ハードディスク駆動）モータやCPUの精密冷却用FANモータなどに多数使われ、家庭用VTRやパソコンの普及、小型化、軽量化、携帯化に貢献し、過去30年余にわたり、電子情報機器を通じて電子、情報産業を動力面から支えてきた。さらに、近年は、こうしたマイクロモータ分野にとどまらず、省電力化や高性能化の進展で家電製品の駆動用のパワーモータのホールモータ化も進む。

一方、電力分野に目を向ければ、高感度InSb薄膜ホール素子を磁気センサに使う非接触の電流検出器（電流センサ）は、計測すべき電流通路に設置されるシャント抵抗型の電流計測器で生じるジュール発熱がないため高電流計測に適しており、電力網や工場機器の大電流計測や制御にも使われてきた。また、エアコンや白物家電など、最近の各種の電気機器の駆動のパワーモータのインバータ駆動で使われる非接触の電流検出センサの磁気センサとしても、高感度薄膜ホール素子は欠かせない。このほかにも、非接触スイッチ、非接触センサを作るための磁気センサとしても広く使われる。更に、自動車などの車載センサ向けの用途も広がっている。このように、InSbやInAsなどの薄膜の磁気センサは、われわれの社会の各方面で使われている。こうした状況を鑑みると、InSbやInAsなどのIII-V族の化合物半導体薄膜の電子産業応用での重要性が理解されよう。

ところで、過去15年にわたって、高感度InSb薄膜ホール素子は、直接目に触れることは少ないが、毎年10億個以上が使われてきており、化合物半導体の重要な応用の一つとなっている。筆者らが開発した高感度InSb薄膜ホール素子は、開発以来30年間の累積生産量は230億個を超えており、ホール素子市場のおよそ70%を占めてきた。Fig. 1には、そうした高感度InSb薄膜の電子産業への応用の状況を年次推移の形で示した^{4)~6)}。

狭ギャップIII-V族材料のInSbやInAsなどの薄膜、量子井戸などは、現在の電子情報産業の基礎を支えるホール素子などの磁気センサ材料として、今や極めて重要である。しかし、その物性的側面は必ずしも周知された状況で

はない。本解説の主題は、こうした電子・情報産業を支える重要な材料であり、これからも重要な磁気センサ材料であるInSbやInAsの多結晶薄膜、単結晶薄膜、量子井戸に焦点を当て、その電子輸送などについて、筆者らが得た実験結果に基づき現象論的な現状を述べる。さらに、ホール素子など磁気センサ応用の紹介と電子産業へのインパクトも述べたい。

2. 磁気センサと狭ギャップ半導体材料とその代表特性

1970年代までの、初期のホール素子技術やInSbやInAsのバルク材料の特性などは、片岡照栄氏の著書「磁電変換素子」やH. H. Wiederの著書「Structure and Application of Galvanomagnetic Devices」に詳しく述べられている^{7),8)}。ここでは薄膜が主流となった現状の半導体

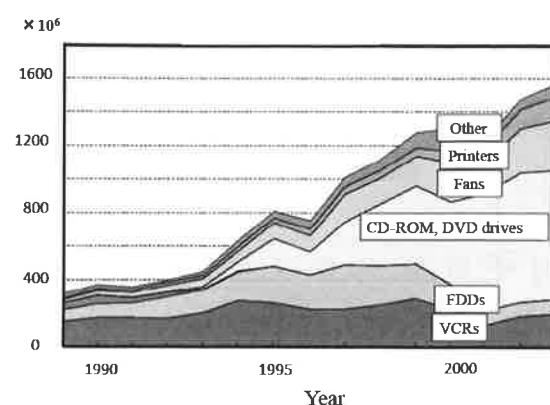


Fig. 1 Growth in applications of high sensitivity InSb thin film Hall elements.



Fig. 2 Family of the semiconductor magnetic sensors.

Table 1 Family of practical/commercial Hall elements and their typical characteristics

ホール素子と材料	ホール電圧 V_H	駆動電圧	特徴	主な応用
InSb ホール素子	200~300 mV/0.05 T	1 V	超高感度、高出力、低消費電力	ホールモータ、非接触電流センサ、非接触スイッチ、非接触センサ、HIC磁気センサ
GaAs ホール素子	80 mV/0.05 T	6 V	温度依存性小	ホールモータ、非接触電流センサ、非接触センサ
InAs ホール素子	100 mV/0.05 T	6 V	温度依存性小	電流センサ、HICの磁気センサ
InAsDQW ホール素子 (量子井戸InAsホール素子)	250 mV/0.05 T	6 V	温度依存性小、高感度	電流検出、携帯電話用各種デバイス、LHHIC磁気センサ

薄膜磁気センサの簡単な系譜、分類をFig. 2に示した。

半導体薄膜センサはホール効果と磁気抵抗効果を利用する二つの系列がある。材料は、一般的には電子移動度の高い、したがってホール効果や磁気抵抗効果が大きいIII-V族の化合物半導体で、狭ギャップのInSbやInAsの薄膜、または薄層が使われる。そのほかに、プロセスの容易さや、温度依存性が極めて少なく、駆動できる温度範囲が広いメリットをもつGaAsのイオン注入・アニールにより製作したn型の薄い動作層のホール効果を使うGaAsホール素子も使われる。またSiは、集積回路技術を利用し、ホール電圧を増幅する回路と組み合わせたデジタル出力のモノリシックホールIC製作のために使われている。

現在、実用化されているホール素子は、InSb薄膜ホール素子、GaAsホール素子、InAsホール素子、InAs量子井戸ホール素子である。磁界による抵抗値変化を利用する磁気抵抗素子は、電子移動度が大きいことが必須のため、バルク単結晶のInSbおよびInSb単結晶薄膜が主に使われている。Siホール素子は、集積回路技術で製作するモノリシックホールICの磁気センサとしてのみ使われる。ホールICには、現在はバイポーラプロセスによるものとCMOSプロセスによるものと2種ある。さらに、化合物半導体のホール素子とSiの集積回路による増幅器が、一緒にパッケージに収められたハイブリッド構造のホールICも実用化されている⁹⁾。Table 1に実用化されている主なホール素子とその代表特性と主な応用をリストアップした¹⁰⁾。

Table 2には、現在、実用的なホール素子に使われる狭ギャップの薄膜、薄層材料の電子移動度とバルク値の比較を示した⁹⁾。薄膜や量子井戸のような超薄層は、シート抵抗値が大きく、ホール素子応用では、電力消費が少なく、センサ信号の温度依存性が少ない定電圧駆動ができるなどの特性上のメリットとともに、フォトリソグラフィー応用の高精度加工が容易にできる製造プロセス上の大きな利点がある。

3. 狭ギャップ化合物半導体InSb薄膜の製作とその特性

現在まで最も多く使われてきた、高感度InSbホール素

Table 2 Electron mobility of InSb and InAs bulk, thin films and quantum wells

材料	電子移動度 (cm ² /Vs)	備考
1 InSb	70,000	バルク単結晶
2 InSb 薄膜	20,000~30,000	厚さ 800 nm 多結晶薄膜 (蒸着)
3 InSb/GaAs	40,000	厚さ 1,000 nm Sn ドープ (MBE)
4 InAs	32,000	バルク単結晶
5 InAs/GaAs	10,000	厚さ 500 nm 薄膜 (MBE)
6 Al _{0.65} Ga _{0.35} As _{0.02} Sb _{0.98} /InAs/ Al _{0.65} Ga _{0.35} As _{0.02} Sb _{0.98} /GaAs	20,000	厚さ 50 nm, AlGaAsSb 絶縁層による量子井戸構造 (MBE)
7 Al _{0.1} In _{0.9} Sb/InSb/Al _{0.1} In _{0.9} Sb/GaAs	40,000	厚さ 300 nm, AlInSb 絶縁層によるサンドイッチ構造 (MBE) ^(*)
8 Al _{0.1} In _{0.9} Sb/InAs _{0.1} Sb _{0.9} /Al _{0.1} In _{0.9} Sb/GaAs	35,000	厚さ 100 nm, AlInSb 絶縁層によるサンドイッチ構造 / 量子井戸 (MBE) ^(*)

子に使われている InSb 多結晶の蒸着薄膜の製法、特性について概要を述べる。製法について言及するのは、In と Sb の蒸気圧が 5 桁ほど違うので、慎重に製作した薄膜でないと、組成比や、膜厚方向の組成比分布などストイキオメトリックな問題から、特性の普遍性について問題が出るからである。

3.1 InSb 多結晶薄膜の真空蒸着による製作

真空蒸着で製作する InSb の薄膜は、通常は多結晶薄膜である。In と Sb の組成比を 1:1 で製作しようとする、結晶成長の適温が融点の値より少し低温の 400°C 付近であり、この温度に蒸着基板を保持する必要がある。しかし、この温度では In と Sb の蒸気圧が 5 桁ほど違っている。単純な蒸着では、ストイキオメトリックな InSb 薄膜を得るのは極めて難しく、蒸着操作や方法により、組成や特性が面内はもちろん、厚さ方向でも大きく変動し、高い電子移動度の薄膜を再現性良く製作することはたいへん難しい。真空蒸着により In:Sb の 1:1 組成の薄膜を得る方法として、古くは、ドイツの Gunter の提案した 3 温度蒸着法がある^{11), 12)}。この方法は In と Sb を 2 個の蒸発源に入れて、蒸気圧を加熱制御し、あらかじめ加温した基板上に InSb 薄膜を得る方法であり、2 個の蒸発源温度と基板温度の三つの温度を独立制御する方法である。基板面積が極めて小さい実験用としては可能な方法であるが、大面積で安定して InSb 薄膜を低コストで量産するには全く向かない方法である。日本では、東京工業大学の酒井善雄、大下正秀の InSb 薄膜の蒸着によるホール素子の先駆的な基礎研究がある¹³⁾。

現在市販されている著者らが開発したホール素子に使われる InSb 薄膜の量産製法は、「2 温度マルチポート蒸着法」と呼ばれ、大面積で安定して InSb 薄膜を低コストで量産できる方法である。さらに、組成の再現性や特性の再現性も極めて優れる InSb の多結晶の薄膜製法である。複数の蒸発源に高純度の InSb を小分けして入れ、基板加熱の温度に連動して順次蒸発させる。Sb の蒸気圧が大き

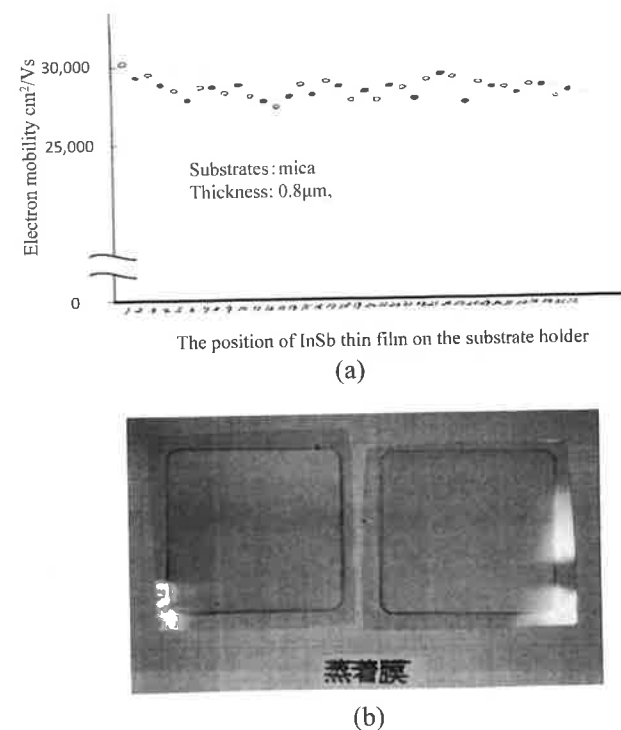


Fig. 3 (a) The electron mobility of the 36 InSb thin films fabricated by mass production type vacuum deposition system and (b) InSb thin films on mica substrates fabricated by mass production type vacuum deposition system.

く、In の蒸気圧が小さいことから、蒸発源からの蒸気は、加熱の前半は Sb リッチで、後半は In リッチである。順次蒸発源を加熱することで厚さ方向の In と Sb は、基板加熱下で均一になり、1:1 の組成の InSb 薄膜が製作できる。In と Sb の蒸気の角度分布が同一のため、面方向での組成差もない。もちろん、装置の最適設計と蒸着時の基板や蒸発源の加熱パターンなどの最適化が必要であるが、高い電子移動度の InSb 蒸着膜を多数の基板上に一度の蒸着で量産製作できる。Fig. 3(a) は 2 温度マルチポート蒸着法で一度に 36 枚のマイカ基板上に蒸着製作した InSb 薄膜の電子

移動度である。20,000~30,000 cm²/Vs の電子移動度が得られ、特性ばらつきも少ない。製作された InSb 薄膜の厚さは、0.8 μm である。極めて薄く、シート抵抗値も 100 Ω/□ 以上である (120~160 Ω/□ 程度である)。Fig. 3(b) には、マイカ基板上に蒸着した InSb 薄膜の写真を示した。

3.2 InSb 蒸着膜の基本特性

Fig. 4 には、マイカ基板上に InSb 蒸着膜の (a) 電子移動度、(b) ホール係数、(c) シート抵抗値の温度依存性を示した。Fig. 4(a) は電子移動度の温度依存性である。本来ならば低温で格子散乱の減少により、大きくなるはずであるが、低温で減少する。この現象は、長い間理由がはっきり

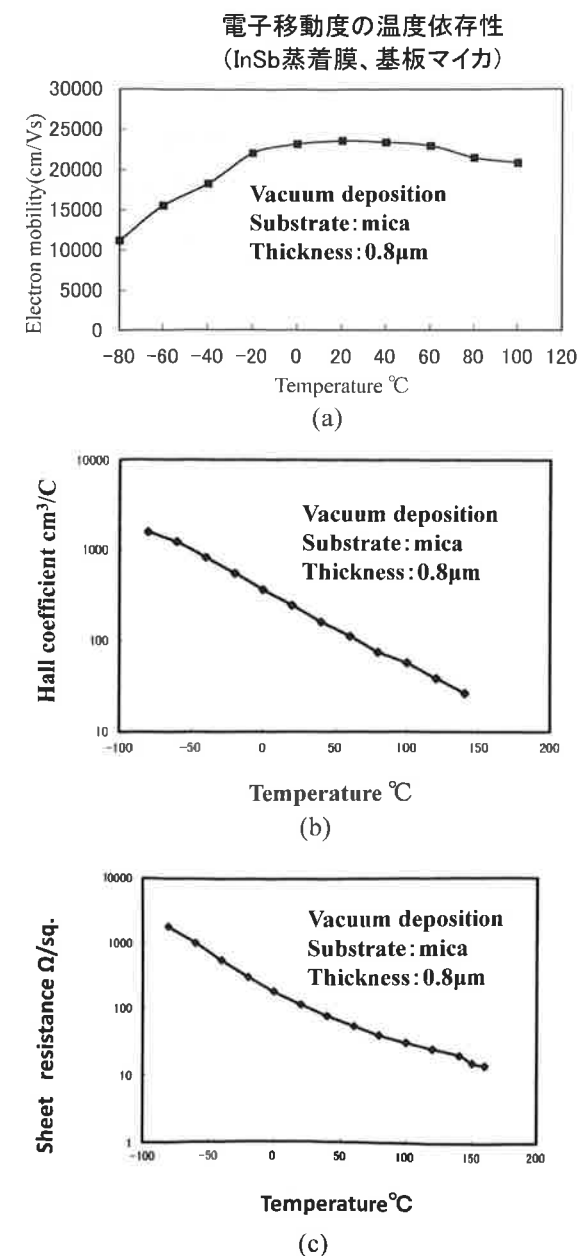


Fig. 4 (a) Temperature dependence of electron mobility, (b) Temperature dependence of Hall coefficient and (c) Temperature dependence of sheet resistance of InSb thin film.

しなかったが、最近の研究で、InSb とマイカ基板との格子ミスマッチや薄膜ゆえの特異な電子輸送に起因する現象であり、InSb 薄膜の厚さ方向の電子移動度の変化を考えると理解できることがわかった。この電子移動度の低温での低下により、室温周辺の温度で電子移動度があまり変化しない。ホール素子のホール電圧の温度依存性は、定電圧駆動では電子移動度と同じである。ホール素子の入力 (駆動電極間) 抵抗が大きい InSb 薄膜ホール素子では、定電圧駆動が可能で、ホール電圧の温度依存性が著しく小さく (1 桁低下) なるという実用上の大きなメリットが生まれた。Fig. 4(b) にはホール係数の温度依存性を示した。バルクの InSb と同じ温度依存性を示す。また、Fig. 4(c) はシート抵抗値の温度依存性である。室温付近のシート抵抗値は 100 Ω/□ 以上あり、温度係数は室温周辺でおよそ 1.9%/°C である^{1)~3), 10)}。

3.3 高感度 InSb 薄膜ホール素子への応用

大きな電子移動度と高いシート抵抗値を有する InSb 蒸着膜は、高感度で温度依存性の少ない実用的な高感度磁気センサである InSb 薄膜ホール素子製作に使われる。Fig.

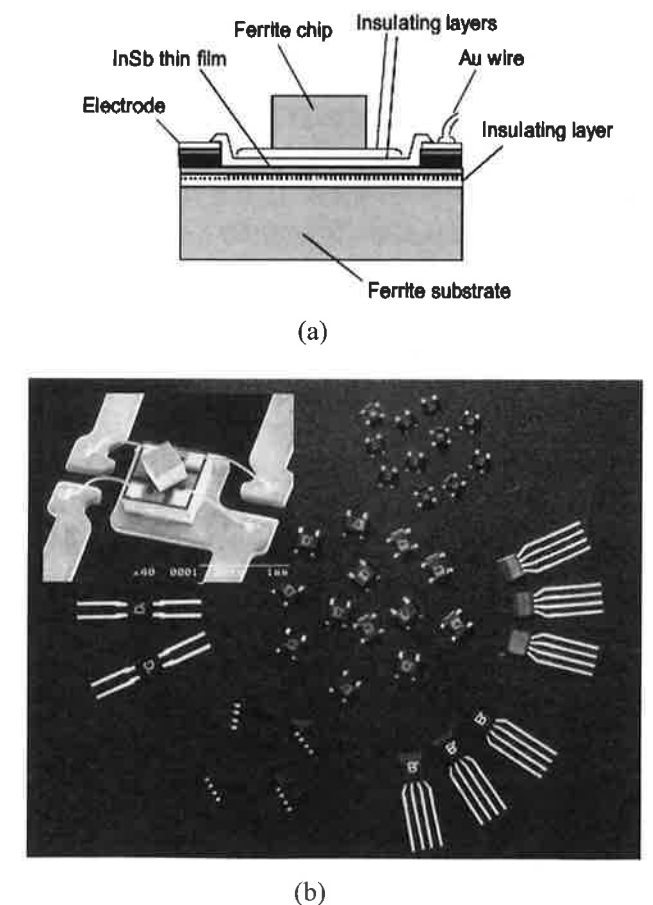


Fig. 5 (a) Cross section of high sensitivity InSb thin film Hall element and (b) Photograph of wired Hall element sandwiched with ferrite substrate and ferrite chip bonded to center of Hall element pattern, and commercial products.

5は、筆者らが開発し製作した高感度InSb薄膜ホール素子の断面構造と写真である。

Fig. 5(a)には、基板の軟磁性フェライトと同じく微小な 0.3 mm^3 角の軟磁性フェライト片によりホール素子部のInSb薄膜がサンドイッチされた断面構造を示した。Fig. 5(b)には、パッケージ前のチップ写真とパッケージされた市販のホール素子を示した。このフェライトサンドイッチ構造により、フェライトの磁化を利用して、InSb薄膜により得られるホール電圧が3~6倍程度増幅されて超高感度化される。この素子は、従来のInSbホール素子に比較して20~30倍高感度である。さらに1Vの定電圧駆動すれば、ホール電圧の温度依存性が従来比1桁低減する。開発当時のホール電圧は、1V駆動、0.05 mTの磁束密度で200~300 mVであり、従来の常識を破る高感度、高出力であった。また、ホール電圧の温度係数は、定電圧駆動により極めて小さく、室温周辺で $\pm 0.1\sim 0.2\%/^{\circ}\text{C}$ という、画期的なInSb薄膜ホール素子が世界で初めて実現した。この結果、周囲の温度変化があっても、安定して磁界を高感度検出でき、さらに、超小型、低消費電力、面実装パッケージなどが応用上歓迎され、開発以来、累積生産量は230億個を超えて量産され、応用されている。現在も、毎年10億個以上使われており、新しい電子制御モータ時代を実現するなど、世界で最も多く使われたホール素子となっている^{3), 5)}。

4. 単結晶InAs薄膜の製作と電子輸送特性

InAsは室温でエネルギーギャップが0.36 eVで、InSbの0.17 eVより大きく、 100°C を超えた温度で駆動できるホール素子が製作できる優れた性質を示す材料である。GaAs単結晶基板上に成長した厚さ $1.0\text{ }\mu\text{m}$ の単結晶のInAs薄膜は、室温での電子移動度は $10,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度が見込まれ、ヘテロエピタキシー特有の基板との格子ミスマッチによると思われるバルクとは異なる特異な電子輸送特性を示す。

4.1 MBE法によるInAs単結晶薄膜の製作

MBE (Molecular beam epitaxy)法は、超高真空中(残留ガス原子が基板面に入射する確率が、薄膜を作るための原子が基板面に入射する確率に比較して1%以下)の状態、製作しようとする薄膜を構成する原子または分子は、加熱された蒸発源からあらかじめ制御された蒸気密度で、所定の温度に加熱された単結晶基板の表面に飛来し、希望する物質の単結晶を1原子層ずつ積層することにより薄膜を製作する方法である¹⁴⁾。

当初、MBE法は、研究用の薄膜単結晶や超格子の製作などに使われ、大面積の単結晶を量産製作することは困難とされていた。現在では、大型装置も開発されており、単結晶薄膜や量子井戸、超格子などの製作に使われる。Fig. 6は、筆者らが初めて開発した2インチ基板12枚に一

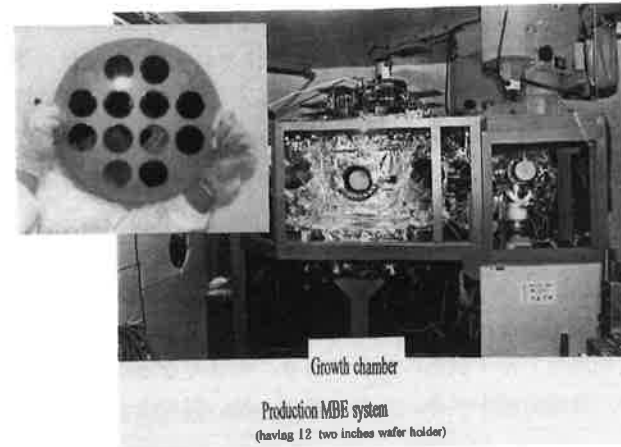


Fig. 6 Mass production type MBE system and a substrate holder with 12 InAs single crystal thin films grown on 2 inch GaAs substrates.

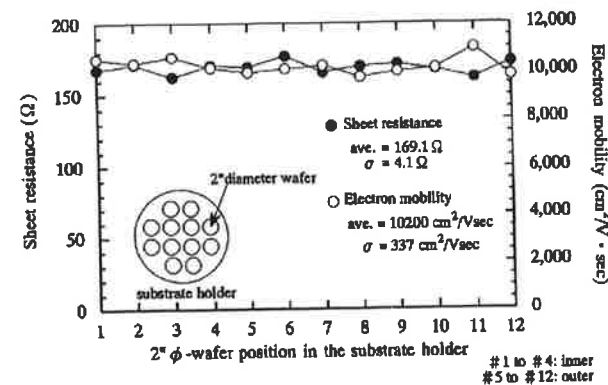


Fig. 7 Uniformity data of electron mobility and sheet resistance of InAs single crystal thin films grown on GaAs(100) surface by mass production type MBE system.

度に単結晶薄膜を成長できる縦型の製造用MBE装置と基板ホルダー上にセットされたGaAs基板に成長した12枚のInAs単結晶薄膜の写真である¹⁵⁾。MBE装置の仕様は、成長室と成長室にゲートバルブを通して連結された予備加熱室、ロードロック室を備えた3室構成の縦型MBE装置である。成長室の径は、1100 mm、100~300 ccのPBNるつぼの蒸発源を備えており、12枚の半絶縁性GaAs基板をセットした基板ホルダーを 800°C 以上の温度で均一に加熱できる基板加熱ヒータと基板ホルダーの回転機構を備える。さらに、稼働時(結晶成長時)の到達真空度は $1\times 10^{-10}\text{ Torr}$ である。MBE装置の量産装置としての性能を示すために、Fig. 7には、この装置で製作したInAs単結晶薄膜のシート抵抗値と電子移動度を示した¹²⁾。膜厚分布は $0.516\pm 0.011\text{ }\mu\text{m}$ (25枚のデータ)であり、特性のばらつきも少なく、膜厚の均一性も良い。

4.2 InAs単結晶薄膜のエピタキシャル成長の観察

狭ギャップ化合物半導体のInAsは、結晶成長の基板に使うGaAsとの格子定数が大きく違う。格子定数の違い、すなわち、格子ミスマッチの影響が薄膜の物性にも現れ

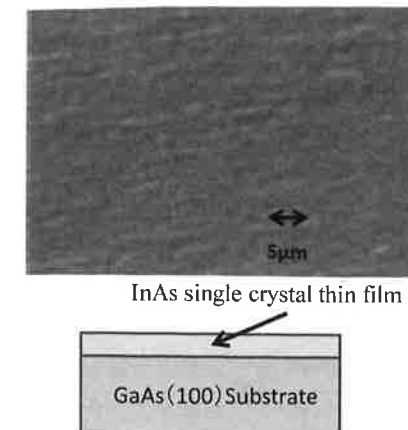


Fig. 8 Surface photograph of InAs single crystal thin film grown on GaAs substrate.

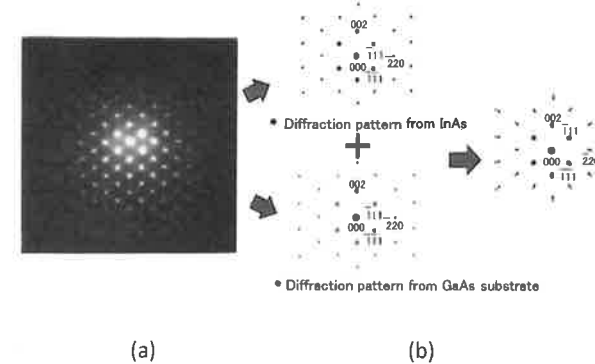


Fig. 9 (a) Superposed electron diffraction pattern from boundary between InAs and GaAs, and (b) dissociation of the diffraction pattern to InAs and GaAs.

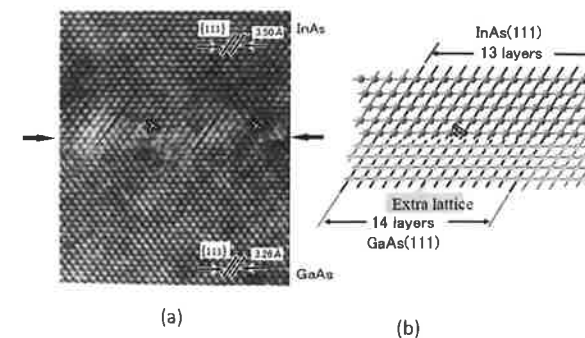


Fig. 10 (a) TEM photograph of large lattice mismatch boundary between InAs and GaAs, and (b) lattice matching model of TEM where the 14 GaAs lattice lines correspond to 13 InAs lattice layers.

る。さらに、基板との大きな格子ミスマッチ下で、界面の格子の接合がどのようなになっているかも興味深い。GaAs単結晶基板上にMBE法で成長したInAs単結晶薄膜がどのようなものかについて、観察した結果を示す。Fig. 8は、GaAs(100)基板上に成長した厚さ $1.0\text{ }\mu\text{m}$ のInAsの単結晶の表面モロロジーである。平坦性もよく、Inの析出も見られない。また、表面の様子は、InAsへの不純物ドーピングではほとんど変わらない。

Table 3 Characteristics of InAs single crystal thin Film grown on GaAs(100) substrates by MBE

不純物ドーピング	厚さ(μm)	電子移動度(cm^2/Vs)	シート抵抗($\Omega\cdot\text{sq.}$)	電子密度(個/ cm^3)
なし	1.2	9,000	200	2.9×10^{16}
Siドーピング	0.5	12,000	130	8.0×10^{16}

次に、GaAsとInAsの境界面がどのようなになっているかを観察した。Fig. 9(a)には、GaAs基板と成長したInAs薄膜部の電子線回折像を示した。GaAsの回折パターンとInAsの回折パターンが共に得られており、格子定数の違いによりGaAsとInAsの回折像の点のごくわずかなずれが観察される。しかし、回折像は全く同じである。これは成長したInAsの結晶構造が全く基板と同じ結晶構造であることを意味し、エピタキシャル成長の証である。Fig. 9(b)にはこの様子をモデル的に説明したものである。Fig. 10(a)は、高電圧の透過電子顕微鏡による基板のGaAsとInAs単結晶薄膜の境界面の格子像である¹⁶⁾。この写真で、6.8%の格子定数のずれによりFig. 10(b)に示すように、GaAsの格子面14層に対してInAsの格子面13層が対応していることがわかる。これらは、GaAs基板上にInAsの単結晶が規則正しく成長したことを示すものである。

4.3 InAs薄膜の電子輸送特性と不純物のドーピングによる特性の制御

単結晶InAsの薄膜は、超高真空中で結晶成長させる分子線エピタキシー(MBE)法で、GaAs単結晶基板上に製作できる。Table 3には、MBE法でGaAs(100)基板上に成長した単結晶InAs薄膜の室温での代表的な特性を示した。Table 3からもわかるように、室温での電子移動度は、ドーピングにより向上する^{17), 18)}。

Fig. 11は、MBE法でGaAs(100)基板上に成長したInAs単結晶薄膜の特性である。Fig. 11(a)は各種ドーピングレベルに対応した電子密度の膜厚依存性であり、Fig. 11(b)は、電子移動度の膜厚依存性である。いずれも大きな膜厚依存性がある。Fig. 11(a)で膜厚が薄くなると電子密度が大きくなることは、ヘテロ界面付近の電子密度が高いことを示しており、これはInAsとGaAs基板との大きな格子の不整合の影響である。

Fig. 12には、MBE法で製作した各種膜厚のInAs単結晶薄膜の電子移動度の温度依存性を示した。Fig. 12で、点線はアンドープInAs単結晶薄膜、実線はドナー不純物SiドーピングのInAs単結晶薄膜の電子移動度の温度依存性で、ドーピングによる変化をいくつかの厚さに対応して示した。このFig. 12に示したように、InAs単結晶薄膜は、ドーピングして不純物散乱が増大するにもかかわらず電子移動度が大きくなるという特異な現象を示す。さらに、アンドープのInAs単結晶薄膜は、温度の上昇とともに電子

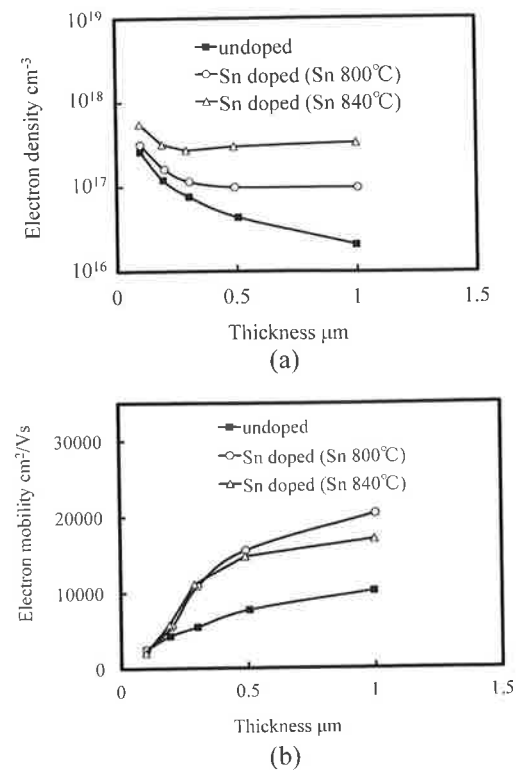


Fig. 11 (a) Thickness dependence of electron density and (b) Thickness dependence of electron mobility of InAs single crystal thin films grown on GaAs substrates by MBE.

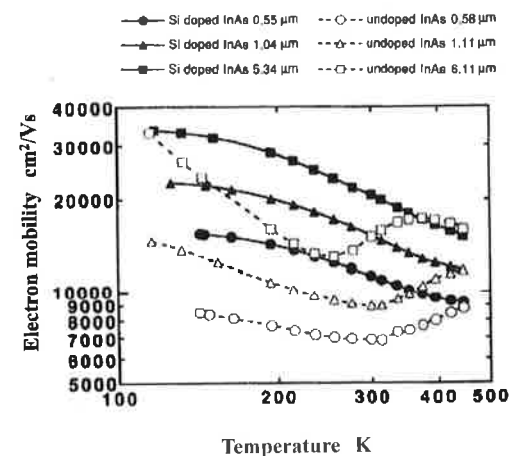


Fig. 12 Temperature dependence of electron mobility for various thickness of InAs single crystal thin films grown on GaAs substrates.

移動度が大きくなる現象（異常温度依存性）を示し、さらに高温になると温度とともに低下する。しかるに、ドーピングすることにより電子移動度の異常な温度依存性がなくなり、温度とともに低下する通常の半導体に特有の温度依存性を示す。Fig. 13(a)は、GaAs基板上に直接成長した厚さ1.0 μmのInAs単結晶薄膜の電子密度の温度依存性で、ドーパントのSnの蒸発源の温度（温度が高いほどドーパ量が多くなる）を変えてプロットしたものである。また、Fig. 13(b)はシート抵抗値の温度依存性である。アンドー

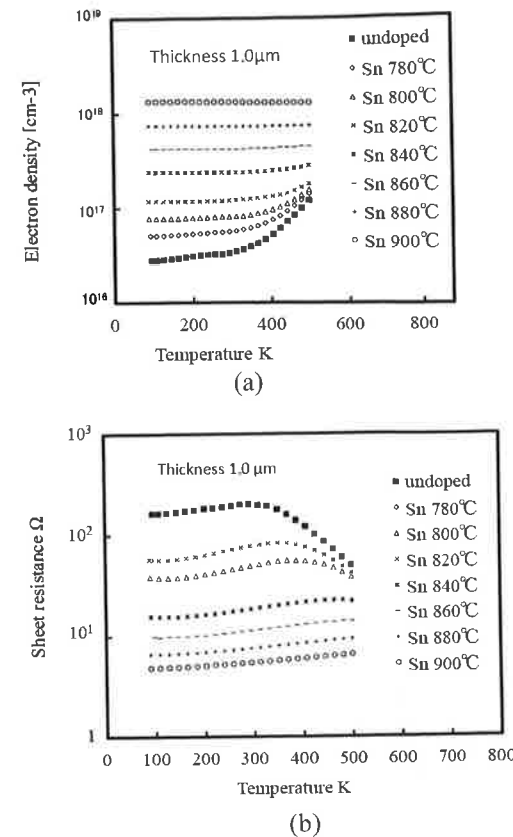


Fig. 13 (a) Temperature dependence of electron density and (b) Temperature dependence of sheet resistance of InAs single crystal thin films grown on GaAs substrates by MBE.

Table 4 Electron mobility of InAs single crystal thin films doped in different positions grown on GaAs by MBE

	厚さ (μm)	ドーピング位置 (μm)	シート抵抗 (Ω・sq.)	電子移動度 (cm²/Vs)
1	0.58	ドーピングなし	265	7,800
2	0.55	0~0.15	203	7,400
3	0.40	0.30~0.40	100	13,000
4	0.40	一様ドーピング	70	14,000

ブに比較して、Snドーピングにより室温周辺で温度依存性が減少している。

アンドープのInAs単結晶の電子移動度の異常な温度依存性とヘテロ界面付近の格子ミスマッチの影響を調べるために、InAs単結晶薄膜の膜厚方向の一部にSiをドーピングして電子移動度を測定した。Table 4はその結果である¹⁸⁾。

電子移動度は、ドーピングした位置により大きく変わることが明らかである。また、このTable 4から、GaAsとのヘテロ界面から150 nmの厚さの部分にドーピングしても電子移動度は大きくならない。しかし、ヘテロ界面から300 nm以上離れた部分に厚さ100 nmドーピングすると電子移動度は大きく向上する。さらに、全体に様にドーピングすると、やはり電子移動度が大きく向上した。結晶成長の点から考え

ると、InAsはGaAsと6.8%の格子ミスマッチがある。この格子ミスマッチによりヘテロ界面付近（Table 4の2）ではInAs電子移動度は小さく、ヘテロ界面から300 nm以上離れた部分（Table 4の3）は、格子ミスマッチの影響もなくなり、電子移動度が大きいと予想される。このことは、InAs単結晶薄膜の厚さ方向で、電子移動度の分布があることを意味する。ミスマッチの影響が大きいヘテロ界面付近へドーピングしても電子移動度はあまり変化がない。電子移動度の大きいヘテロ界面から離れたところにドーピングして、その部分に電子を注入し電子が走れば大きな電子移動度が測定されることを意味している。しかも、電子移動度の温度変化は、温度上昇とともに減少する極めてノーマルな特性であり、その変化も極めて小さい。

狭ギャップ化合物半導体のInAs単結晶薄膜は、SiやGaAsと異なり、室温で導体である。しかも、Fig. 12にも示したように、その電子輸送現象はドナー不純物のドーピングによって大きく変わる。また、ドーピング場所によっても大きく変わる。こうしたInAs薄膜物性のドーピングによる制御は、実際のデバイスを製作するうえで大きなメリットであり、また、デバイス設計時の指針にもなる。

4.4 薄膜の電気抵抗とドーピングの関係

抵抗率 ρ 、電子密度を n 、電子移動度を μ_H 、温度を T とし、電気伝導を担うのは電子のみのごく単純なモデルを考えると、 $\rho^{-1} = e \cdot n \cdot \mu_H$ より（ここで e は電子電荷）、抵抗率の温度係数 $1/\rho \cdot d\rho/dT$ は、

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = -\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} - \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$$

である⁹⁾。この式で第2項の dn/dT は1°C当たりの電子の励起数で、バンドギャップの大きさで決まる量であり、室温周辺では温度によってあまり変わらない。第1項はドーピングで変化しないが、上式の第2項はドーピングにより電子密度 n を増やせば小さくできる。これが、ドーピングによって抵抗値の温度依存性が低減できる一つの理由である。ドーピングで抵抗値の温度依存性が小さくなるのは、上記の理由だけではなく、表面やヘテロ界面にかかわる薄膜独特の厚さ方向の特性分布とそれに伴う電子輸送現象がかかわる。

4.5 SiをドーピングしたInAs単結晶薄膜ホール素子

Siをドーピングした電子密度が $6.0 \sim 8.0 \times 10^{16}$ 個/cm³のInAs単結晶薄膜は、100°Cを超えても抵抗値の低下はほとんど見られず、室温レベルの抵抗値がキープされる特徴がある。磁気センサを製作した場合は、これは実用上の大きなメリットとなる。MBE法により結晶成長中にSiをドーピングしたInAs単結晶薄膜は大きなホール効果を示し、高感度なInAs単結晶薄膜ホール素子が開発されている^{17), 18)}。このホール素子は、入力抵抗値の温度依存性が小さいことに起因して、使用できる温度範囲が広く、高い実用信頼性もある。さらに、検出磁界との比例性にも優れ

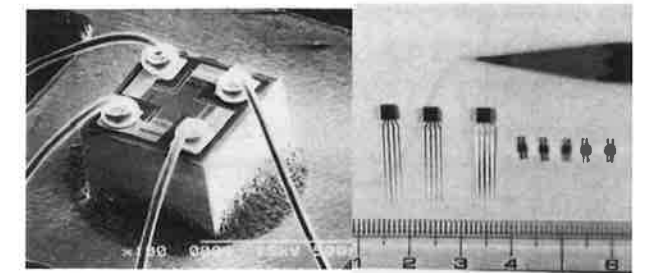


Fig. 14 InAs Hall element chip and commercial products.

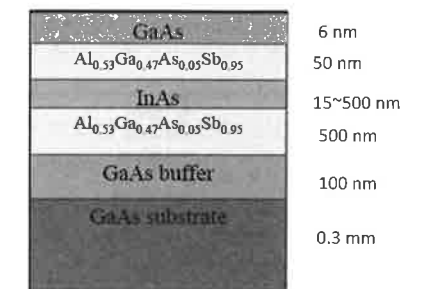


Fig. 15 Cross section of InAs DQW sandwiched by AlGaAsSb insulating layers.

ており、100°C以上の高温でも安心して駆動できる高い信頼性のあるホール素子として、開発以来、非接触電流検出器の磁気センサに使われている。Fig. 14には、SiドーピングInAs単結晶薄膜のパッケージ前のホール素子チップ写真と、市販のInAsホール素子を示した。

4.6 InAs量子井戸の製作と電子輸送特性

MBE法により、GaAs基板上に成長した $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ （以下AlGaAsSbと略記する）は、絶縁性で、InAsとの格子ミスマッチが0.5%程度である。このため、この層をGaAs基板上に成長し、その上にInAs層を成長し、更にキャップ層としてAlGaAsSb層を成長させると、中間のInAs層と上下のヘテロ界面での格子ミスマッチは0.5%程度まで少なくできる。厚さ15 nmの場合、電子密度 5×10^{17} 個/cm³、電子移動度は20,000 cm²/Vsを超える。これは、格子ミスマッチが減少したからである。さらに、この中間のInAs層は上下のAlGaAsSb絶縁層との間で伝導体のポテンシャル差が1.0 eV以上あり、深いポテンシャルの井戸を形成する^{19)~22)}。この量子井戸は、深い量子井戸(InAs Deep quantum well or InAs DQW)と呼ばれ、量子ホール効果も観察されている。Fig. 15には、電子輸送特性を調べるために膜厚を変え、MBE法で製作したInAs量子井戸構造の断面を示した（ここでは、InAs層が厚くなると量子井戸でなくなる可能性が高いがそれも含めて、便宜的にこの構造をInAs DQWと呼ぶ²³⁾。Fig. 16は、電子移動度の膜厚依存性である。15 nmから膜厚とともに電子移動度は増大するが、ピークの50 nmを超えると電子移動度が減少し、その後一定となる²³⁾。

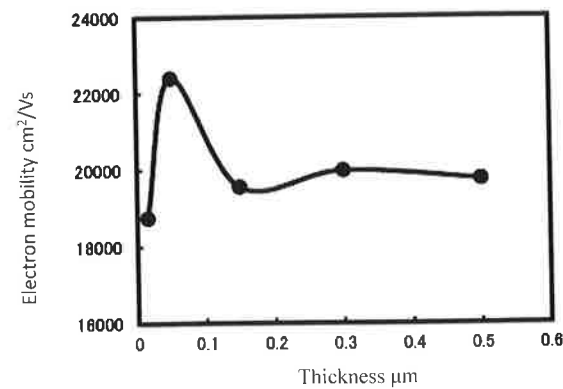


Fig. 16 Thickness dependence of InAs DQW.

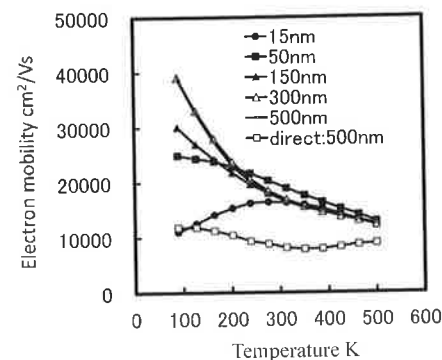


Fig. 17 Temperature dependence of InAs DQW grown on GaAs substrates by MBE.

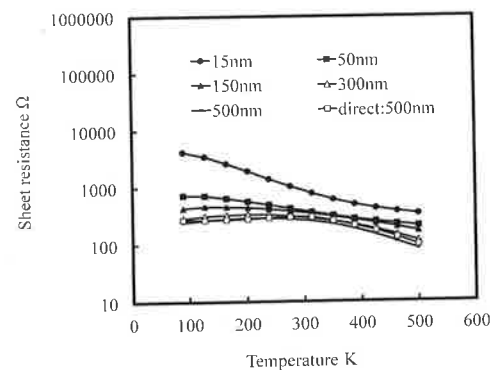


Fig. 18 Temperature dependence of sheet resistance of InAs DQW.

次に、膜厚を変えて製作したInAs DQWの電子移動度の温度依存性をFig. 17に示した。低温での温度依存性は量子井戸層の厚さによって大きく変わり、境界と思われる50 nm付近以上では、スムーズな右下がりの温度依存性を示す。これは、厚みの増大に従ってバルクと同じ温度依存性に移行することを示しており、上下のAlGaAsSbとのヘテロ界面の影響が相対的に少なくなることを意味している。Fig. 18は、シート抵抗値の温度依存性である。広範囲にわたって温度依存性は小さい。

以下、InAs DQWの磁気センサ応用に関してコメントする。InAsの量子井戸構造は、50 nm以下では、電子移

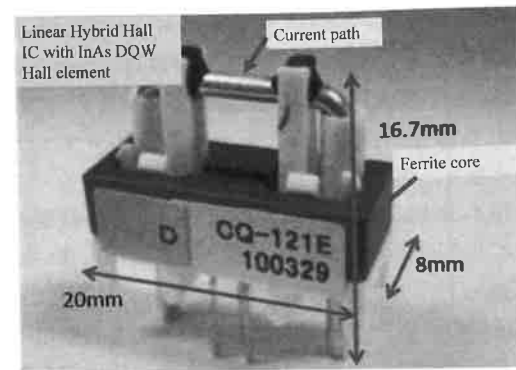


Fig. 19 Current sensor with InAs DQW Hall element (Asahikasei Eelectronics).

動度が大きく、その温度依存性も小さい。またシート抵抗も大きく、さらに温度依存性も小さい。このことは、実用的なホール素子の製作にとって大きなメリットであり、厚さ50 nmのInAs DQWのホール効果を利用したホール素子が実用化されている^{15), 19), 20), 24)}。このInAs DQWホール素子は、磁界検出感度も高く、さらに、温度依存性も少ないため、非接触の電流センサの磁気センサとして使われている。ホール素子の主な用途は、シリコンの増幅回路と組み合わせたりニアホールICである²⁵⁾。このInAs DQWリニアホールICは、家電製品やエアコン、冷凍機のモータなどに使われるパワーモータの駆動用のインバータに必要な超小型の電流センサに使われており、今や省電力のキーデバイスとして欠かせない非接触センサである。Fig. 19は、InAs DQWホール素子を磁気センサに使うリニアハイブリッドホールICを磁気センサとして使った電流センサの写真である。実際に、インバータに積載され使われている。

5. InSb単結晶薄膜の製作と電子輸送

3節では、真空蒸着によるInSbの多結晶薄膜の製作について述べたが、単結晶薄膜はMBE法によって容易に作ることができる。半絶縁性のGaAs(100)基板上にMBE法で成長したInSb単結晶薄膜は、厚さが1.0 μmでも、電子移動度が40,000 cm²/Vs以上ある²⁶⁾。これまで、単結晶のInSbホール素子の応用上の課題は、抵抗の温度依存性が室温周辺で-2%/°Cあり、定電圧駆動において、温度による抵抗の低下で過電流破壊の可能性があったことであった。このため、自動車センサなどで必要とされる100°Cを超えた温度での駆動は難しく、その解決が望まれていた。Fig. 20(a)はMBE法で製作された厚さ1.0 μmのアンダードープおよび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である。アンダードープのInSb単結晶薄膜の電子移動度は、室温付近にピークがあり、低温で減少する特徴的な温度依存性を示す。一方、SnをドーピングしたInSb単結晶薄膜は、低温では電子移動度が減少しない。さらに、

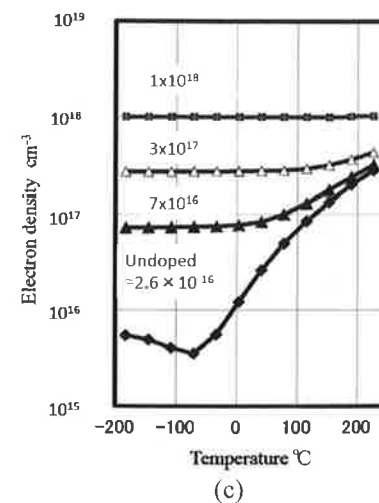
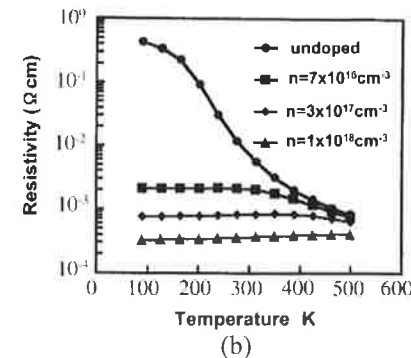
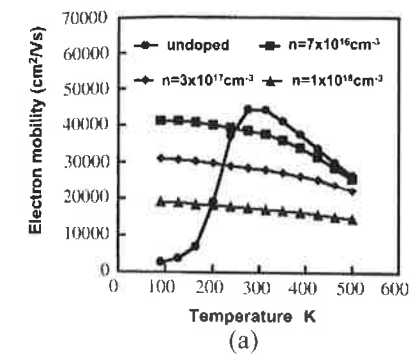


Fig. 20 (a) Temperature dependence of electron mobility, (b) Temperature dependence of resistivity and (c) Temperature dependence of electron density of undoped and Sn doped InSb single crystal thin films grown on GaAs substrates.

Fig. 20(b)には抵抗率の温度依存性を示した。Fig. 20(c)は、電子密度の温度依存性である。Snをドーピングした場合は、低温での電子密度の減少はわずかである。一方、アンダードープのInSb単結晶薄膜は、低温では、室温時と比較して電子密度が減少し、極小温度付近では1桁以上減少している。このような電子密度の減少は、バンド間遷移で励起していた真性電子の低温での減少と考えられる。低温で残る伝導電子は、主にヘテロ界面の大きな格子ミスマッチ(14%)由来の電子と考えられ、この電子が低温では主に電流輸送に与る。アンダードープInSb単結晶薄膜の電子移動度の特異な温度依存性の定性的な説明であるが、室温での

電流輸送は、多数の真性電子電流が電子移動度の大きな部位を流れる。一方、低温では、ヘテロ界面由来の電子電流が支配的になり、しかも、電流がヘテロ界面付近の電子移動度が小さい部分を流れ、結果として低温で低い電子移動度が観測される。Snをドーピングした場合は、InSb単結晶薄膜では、ドーピングによる不純物由来の多数の電子が温度によらず存在し電子移動度の大きな部位を移動し電流輸送を支配するため、低温での電子移動度低下は生じない。アンダードープInSb単結晶薄膜の電子移動度の特異な温度依存性は、ヘテロ界面付近とそこから離れた部位とで大きな電子移動度の差、すなわち特性分布の存在を示唆する。しかも、電流は電気伝導度の最大の部位を流れる原則から、薄膜内で、温度変化に伴って電流通路が電気伝導度の大きい、厚さ方向のヘテロ界面から離れた部位への移動を示唆している^{27)~30)}。このような薄膜内の厚さ方向の特性分布は、4節の4.4項でも述べたが、InAs単結晶薄膜でも観測されている^{17), 18)}。

ところで、Fig. 20(b)からわかるように、InSb単結晶薄膜ではドナー原子のSnをドーピングすることで、室温周辺における抵抗率の温度依存性がおよそ1桁低減する。この結果を利用すると、InSbで100°Cを超えても十分安心して駆動できるホール素子や磁気抵抗素子などを製作可能である。こうして、単結晶のInSb薄膜の製作やSnなどのドーピングが容易にできるようになり、上述の温度上昇によるInSb固有の抵抗値の低下という問題はほぼ解決された。

Fig. 20(a)におけるアンダードープInSb単結晶薄膜の大きな温度依存性は、基板のGaAsとInSbのヘテロ界面での14%という格子不整合も大きな要因である。格子不整合を取り除くことで、InSb単結晶薄膜の電子移動度は、サブミクロンの膜厚であっても大きな値が得られる。そのような状況を作りだすには、筆者らの研究によれば、GaAs基板との間に、InSbとの格子ミスマッチを低減するバッファ層として高抵抗のAlInSb層(格子不整合0.5%)の挿入が有効である。詳細はここでは述べないので、参考文献を参照されたい^{31), 32)}。

MBE法で製作されたInSb単結晶の薄膜は、高感度ホール素子に应用されている^{25), 26)}。従来のフェライトサンドイッチ構造のホール素子では、フェライトの残留磁束密度の問題やオフセット電圧の安定性の問題などから、地磁気検出センサ用としては利用が難しかったが、InSb単結晶薄膜のホール素子で地磁気の検出が可能なホール素子が開発された。シート抵抗値や感度などの最適化から0.7 μmのアンダードープのInSb単結晶薄膜が使われる。SnをドーピングしたInSb単結晶薄膜のホール素子は、さらに優れた磁界検出機能を有する。このホール素子は、高感度で温度依存性も少なく、極めて低ノイズであり、1 μTレベルの分解能が期待でき、10 μT程度の磁束密度まで検出可能である。

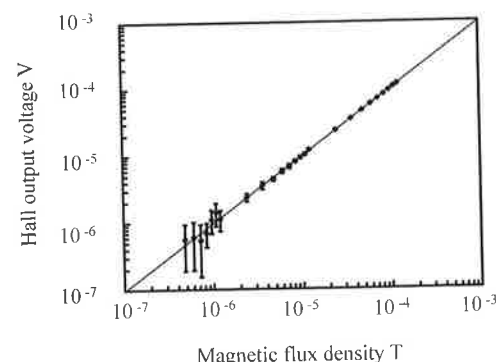


Fig. 21 Hall output voltage and magnetic flux density of Sn-doped InSb single crystal Hall element with thickness of 1.0 μm .

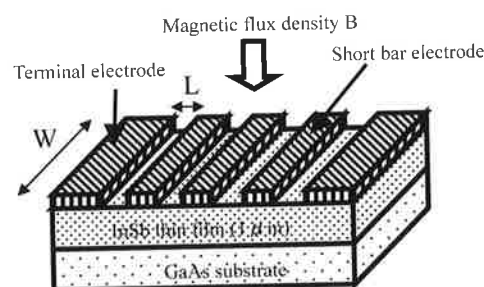


Fig. 22 Structure of magneto-resistance element.

Fig. 21には、SnをドーピングしたInSb単結晶ホール素子の微弱磁界検出の可能性を示す磁束密度とホール電圧の関係を示した。

単結晶InSbの応用はホール素子のみではない。MBE法で製作されたInSb単結晶薄膜の特徴は、電子移動度が大きく、磁気抵抗(MR)効果が大きいことである^{26), 33), 34)}。Fig. 22は磁気抵抗効果素子の概略図であり、Fig. 23(a)は、Snをドーピングした厚さ1.0 μm のInSb単結晶薄膜の磁気抵抗効果である。半導体の薄膜の磁気抵抗効果は、電子移動度と磁束密度の積の2乗に比例する。さらに、抵抗素子として電流が流れる方向の長さ L と直角の方向の幅 W の比により抵抗値の変化量は大きく変わり、幾何学的な形状による形状磁気抵抗効果と呼ばれる。Fig. 23(b)はInSb単結晶薄膜の幾何学的磁気抵抗効果である。磁界によって抵抗率のみが変化する磁気抵抗率効果に比較して、抵抗値の変化が大きいのが特徴である。

この形状効果を最大限利用し、MBE法で製作したInSb単結晶薄膜の磁気抵抗素子が実用化されている。小型の永久磁石により0.2~0.3 Tの磁束密度を磁気抵抗素子の背後から加えたバイアス磁界付きの磁気抵抗素子は、高感度で磁界の磁束密度変化を検出できる。鉄の歯車を回転軸に設置して、バイアス磁界付きの磁気抵抗素子ブリッジにより磁界変化を検出し、回転の検出をする超高精度の回転センサ応用が実用化されている^{34), 35)}。Fig. 24の写真は、SnドーピングのInSb単結晶薄膜の磁気抵抗効果を利用した、回

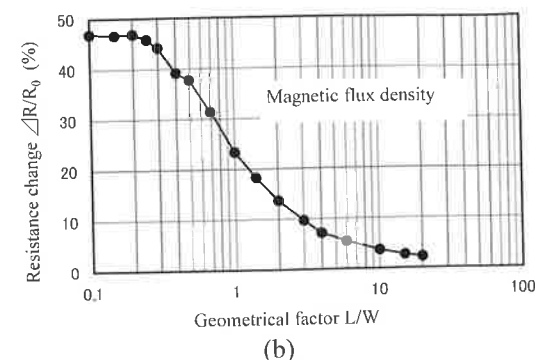
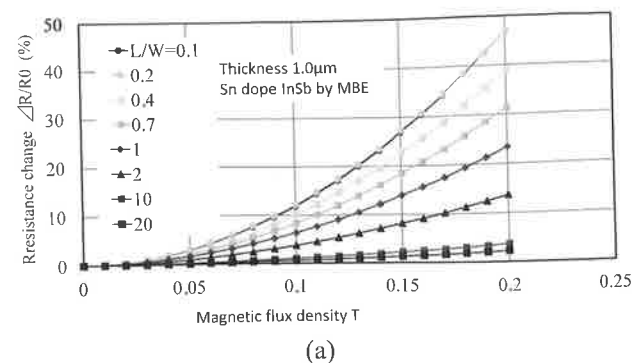


Fig. 23 (a) Magneto-resistance effect of InSb single crystal thin films and (b) Geometrical magneto-resistance of Sn-doped InSb single crystal thin film.

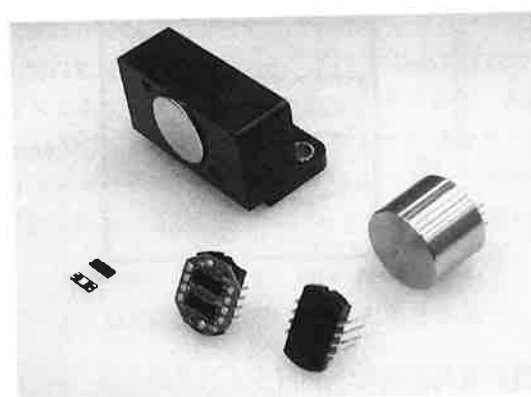


Fig. 24 Rotation sensors by InSb single crystal thin film MR.

転センサである。鉄のギアを用いて、スピンドルモータなどの回転制御をする超高精度回転検出センサとして使われている。さらに、鉄道の速度センサ用の回転センサとしても将来が期待できる。

6. ま と め

InSbやInAsなどの狭ギャップIII-V族化合物半導体の多結晶薄膜や単結晶薄膜、量子井戸などがホール素子や磁気抵抗素子として近年使われているが、これら薄膜材料の物性的側面がすべて明らかになっているわけではない。今や動力制御に必須の磁気センサとして応用するにあたり、基本的に必要と思われる薄膜の電子輸送特性についてまとめた。特に、MBE法で単結晶薄膜や量子井戸などが容易

に作れるようになったことで、信頼できるデータが得られた。室温で導体であるこれらの材料は、ドナー不純物のドーピングにより温度依存性などの低減等の制御が可能なることも明らかになった。

InSb蒸着薄膜は、その製法によって、化学量論的な組成も含めて、特性も大きく変わる。ここでは、マイカ基板上に真空蒸着で製作した多結晶のInSb薄膜の例についてのみ述べた。蒸着薄膜独特の電子移動度の温度依存性や高いシート抵抗値などが、実用的なホール素子への応用で、今や極めて重要となっている。

InAsについては、MBE法による単結晶薄膜の量産技術や量子井戸が実用的なホール素子に用いられており、単体として、あるいは、Siの集積回路の増幅器と一緒にパッケージされたハイブリッド構造のリニアホールICが電流センサに使われるなど、省電力動力技術への応用が進む。

単結晶InSb薄膜は、極めて大きい電子移動度が生かされ、ホール素子として地磁気などの極めて微弱な磁束検出への応用、また、Snドーピングの技術により、InSb単結晶薄膜の電子移動度や抵抗値の温度依存性が低減され、磁気抵抗素子に用いられている。駆動できる範囲が大きく拡がり、工作機械などで必須の超高精度の回転検出、制御用のセンサなどに使われる。

超小型DCブラシレスモータは、ホールモータとも言われるように、ホール素子があって初めて回転の精密な角速度の制御ができる電子制御モータである。30年にわたって、VTRやパソコンなどに必須な超小型動力を提供した。近年は、パワーモータのインバータ駆動でも位置検出や電流センサとして使われ、応用が拡大している。狭ギャップ化合物半導体の薄膜の磁気センサ応用は、電子・情報機器はもちろん、われわれの身の回りにも大きなインパクトを与えた技術となった。

しかし、狭ギャップのIII-V族化合物半導体の薄膜は、磁気センサ応用の重要性にもかかわらず、薄膜や量子井戸などの磁界下の電子輸送現象の解明など、十分進んでいるとは言えない。これからの研究課題である。最後に、筆者の力量不足から、多くの重要な事柄に触れることができなかったことを述べておく。特に、こうした磁気センサの重要な応用や貢献については、詳しくは述べられないので、参考文献を挙げさせていただいた^{4)~6), 24)}。

世界に冠たる成果を出した日本のフェライトや磁石など磁性材料とは異なるが、狭ギャップのIII-V族化合物半導体の薄膜や量子井戸の研究は、磁気センサとしてホール素子や磁気抵抗素子などが多数使われるに及んで重要性はますます大きくなっている。特に、ホールモータや電流検出応用はますます重要性が増している。最近多数使われ、さらに応用が広がっている非接触センサも同様である。ところで、ホール素子などの磁気センサは、必ず永久磁石とペアで使われる場合がほとんどである。磁気センサは、常に

フェライトや希土類永久磁石と協働する。磁界がとりもつ不思議な縁である。

謝 辞 本件解説をまとめるに当たり、福岡大学の眞砂卓史准教授にはたいへんお世話になった。心より御礼を申し上げる。また、ここに述べたホール素子などに使う狭ギャップのInSbやInAs薄膜の研究は、筆者が在籍した旭化成株式会社で実施されたものである。多くの関係者の参加、協力で研究や実用化が進んだ。関係各位には心より謝意を表したい。

References

- 1) I. Shibusaki: Properties of Hall elements by vacuum deposition, the correction of advanced technology of semiconductor devices [Chapter 3], Sec. 11, p. 373 (Keiei System Kenkyusyo, Tokyo, 1984). (in Japanese)
- 2) I. Shibusaki: High sensitivity InSb Hall elements and their development for practical use. *The Monthly Report of Japan Society of Chemical Industries*, 41(5), 12 (1988). (in Japanese)
- 3) I. Shibusaki: High sensitive Hall element by vacuum deposition, IEEJ Japan, Technical Digest on 8th Sensors Symposium, p. 211, 1989. (in Japanese)
- 4) I. Shibusaki: Expanding applications of thin-film Hall sensors (身の回りで活躍するホール素子). *Oyo Butsuri*, 80, 36 (2011). (in Japanese)
- 5) I. Shibusaki: The high sensitivity InSb thin film hall elements and magnetic materials which open an age of Hall motors (非接触センサによる電子制御モータ時代を拓いた高感度InSb薄膜ホール素子と磁性材料). *Ceramics Japan*, 48, 354 (2013). (in Japanese)
- 6) I. Shibusaki: Thin film Hall sensors, Hall ICs, and their applications (薄膜ホール素子, ホールICとその応用). *Magnetics Japan*, 2, 172 (2007). (in Japanese)
- 7) S. Kataoka: Magneto-electric transducers. (Nikkan Kogyo Shimbun Press, 1965). (in Japanese)
- 8) H. Weiss: Structure and application of galvanomagnetic devices, translated by H. H. Wieder and W.F. Striedieck (Pergamon Press, 1969).
- 9) K. Ishibashi, I. Okada, and I. Shibusaki: High sensitivity hybrid hall effect ICs with thin film hall elements, *Sensors and Materials*, 14, 253 (2002).
- 10) I. Shibusaki: Handbook of next generation sensors (次世代センサハンドブック), Part I, Chapter 5, Magnetic Sensors, §2 Hall elements (Baifukann, 2008), p. 205 (in Japanese)
- 11) K. G. Guenther: Aufdampfschichten aus halbleitenden III-V Verbindungen. *Z. Naturforschung*, 13a, 1081 (1958).
- 12) K. G. Guenther: Aufdampfschichten aus halbleitenden III-V Verbindungen. *Naturwissenschaften*, 45, 415 (1958).
- 13) Y. Sakai and M. Ohshita: Preparation of indium antimonide films and measurement of Hall characteristics. *Journal of the IEEE Japan*, 80, 166 (1960). (in Japanese)
- 14) A. Y. Cho and J. R. Arthur: Molecular beam epitaxy. *Progress of Solid State Chemistry*, 10, 157 (1972).
- 15) I. Shibusaki: Mass production of InAs Hall elements by MBE. *J. Cryst. Growth*, 175/176, 13 (1997).
- 16) I. Shibusaki: Growth of InSb and InAs Thin Films and their Application as Practical Magnetic Sensors, Proceed-

ings of the 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors. IPAP Conference Series, Vol. 2, p. 137, 2001.

- 17) I. Shibusaki, Y. Kanayama, T. Ito, F. Ichimori, T. Yoshida, K. Nagase, and K. Harada: High sensitive thin film InAs Hall element by MBE, IEEE In: Digest Tech. Papers on Transducers, p. 1069, 1991.
- 18) T. Iwabuchi, T. Ito, M. Yamamoto, K. Sako, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Yoshida, F. Ichimori, and I. Shibusaki: High sensitivity Hall elements made from Si doped InAs on GaAs substrates by molecular beam epitaxy. *J. Cryst. Growth*, **150**, 1307 (1995).
- 19) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, A. Ichii, I. Shibusaki, and K. Mori: InAs/AlGaAsSb quantum well Hall elements having high output voltage and good temperature characteristics. Digest of Technical Papers; Abstract of Late News Papers, The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, p. 34, 1993.
- 20) N. Kuze, K. Nagase, S. Muramatsu, S. Miya, T. Iwabuchi, A. Ichii, and I. Shibusaki: InAs deep quantum well structures and their application to Hall elements. *J. Cryst. Growth*, **150**, 1307 (1995).
- 21) N. Kuze, H. Goto, S. Miya, S. Muramatsu, M. Matsui, and I. Shibusaki: Molecular beam epitaxial growth of InAs/AlGaAsSb deep quantum wells on GaAs substrates. *Material Research Society Symposium Proceeding*, **399**, 168 (1996).
- 22) N. Kuze, H. Goto, M. Matsui, I. Shibusaki, and H. Sakaki: Molecular beam epitaxial growth of high electron mobility InAs/AlGaAsSb deep quantum well structure. *J. Cryst. Growth*, **175/176**, 868 (1997).
- 23) I. Shibusaki, H. Geka, A. Okamoto and Y. Shibata: The thickness dependence of InAs sandwiched by AlGaAsSb layers grown by MBE. *J. Cryst. Growth*, **278**, 162 (2005).
- 24) I. Shibusaki: Practical high sensitivity Hall elements for magnetic sensor by thin film technology (薄膜ホール素子の開発とセンサ応用). *Trans. IEEJ*, **119-E** (No. 8/9), 405 (1999).
- 25) I. Shibusaki, K. Kuriyama, T. Makino, N. Fukasawa, and K. Suzuki: High sensitivity InAs DQW linear hybrid Hall ICs with InAs deep quantum well Hall elements. *IEEEJ Trans. E*, 2013, to be published (in Japanese)
- 26) A. Okamoto and I. Shibusaki: Growth of InSb thin films on GaAs substrate. *Ouyou Butsuri*, **69**, 193 (2000). (in Japanese)
- 27) A. Okamoto and I. Shibusaki: Transport properties of Sn doped InSb thin films and application to Hall elements. *J. Cryst. Growth*, **251**, 560 (2003).
- 28) I. Shibusaki, 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, Transducers 03, Boston, p. 1626, 2003.
- 29) I. Shibusaki: Properties of InSb thin films grown by molecular beam epitaxy and their applications to magnetic field sensors (InSb単結晶薄膜の物性と磁気センサ応用). *IEEEJ Trans. E*, **123**, (3), 69 (2003). (in Japanese)
- 30) I. Shibusaki: Reduction of temperature dependence of InSb thin films and application to magnetic sensors. The papers of technical meeting on physical sensor, IEEEJ Japan, PHS-07-32, p. 17, 2007.
- 31) H. Geka, A. Okamoto, S. Yamada, H. Goto, K. Yoshida, and I. Shibusaki: Properties of InSb single crystal thin films sandwiched by Al_{0.1}In_{0.9}Sb layers with 0.5% lattice mismatch grown on GaAs. *J. Cryst. Growth*, **301/302**, 152 (2007).
- 32) I. Shibusaki, H. Geka, and A. Okamoto: Transport properties of InSb and InAs_{0.1}Sb_{0.9} thin films between Al_{0.1}In_{0.9}Sb layers grown by molecular beam epitaxy. *J. Cryst. Growth*, **311**, 1696 (2009).
- 33) A. Okamoto, A. Ashihara, T. Akaogi, and I. Shibusaki: InSb thin films grown on GaAs substrate and their magneto-resistance effect. *J. Cryst. Growth*, **227/228**, 619 (2001).
- 34) K. Nishimura, H. Goto, H. Geka, A. Okamoto, and I. Shibusaki: Properties and application of Sn-doped InSb single crystal thin film magneto-resistance elements. In: Proceedings of the 20th Sensor Symposium, IEEEJ Japan, p. 161, 2003.
- 35) I. Shibusaki, K. Nishimura, H. Goto, and A. Okamoto: Magneto-resistance effect of Sn-doped InSb single crystal thin film and application to rotation detection. *IEEEJ Trans. SM*, **126**(8), 445 (2006).

(2013年7月22日受理)

柴崎一郎 しばさき いちろう

昭46 東京教育大学大学院物理学専攻博士課程修了(理学博士), 物理教室の教務補佐員, 昭49 旭化成工業(現旭化成)入社, 平15 旭化成フェロー, 平16 旭化成 柴崎研究室長, 平18 旭化成フェロー, 新事業本部顧問, 平20~24 東京工業大学生命理工学研究科バイオフロンティアセンター特任教授, 平20 公益財団法人 野口研究所学術顧問, 平21 豊橋技術科学大学大学院特命教授, 現在に至る.
専門 薄膜磁気電子工学で化合物半導体の薄膜技術と磁気センサ応用
平15 高感度InSbホール素子の開発で紫綬褒章受章.
趣味 漆塗り

(理博)