

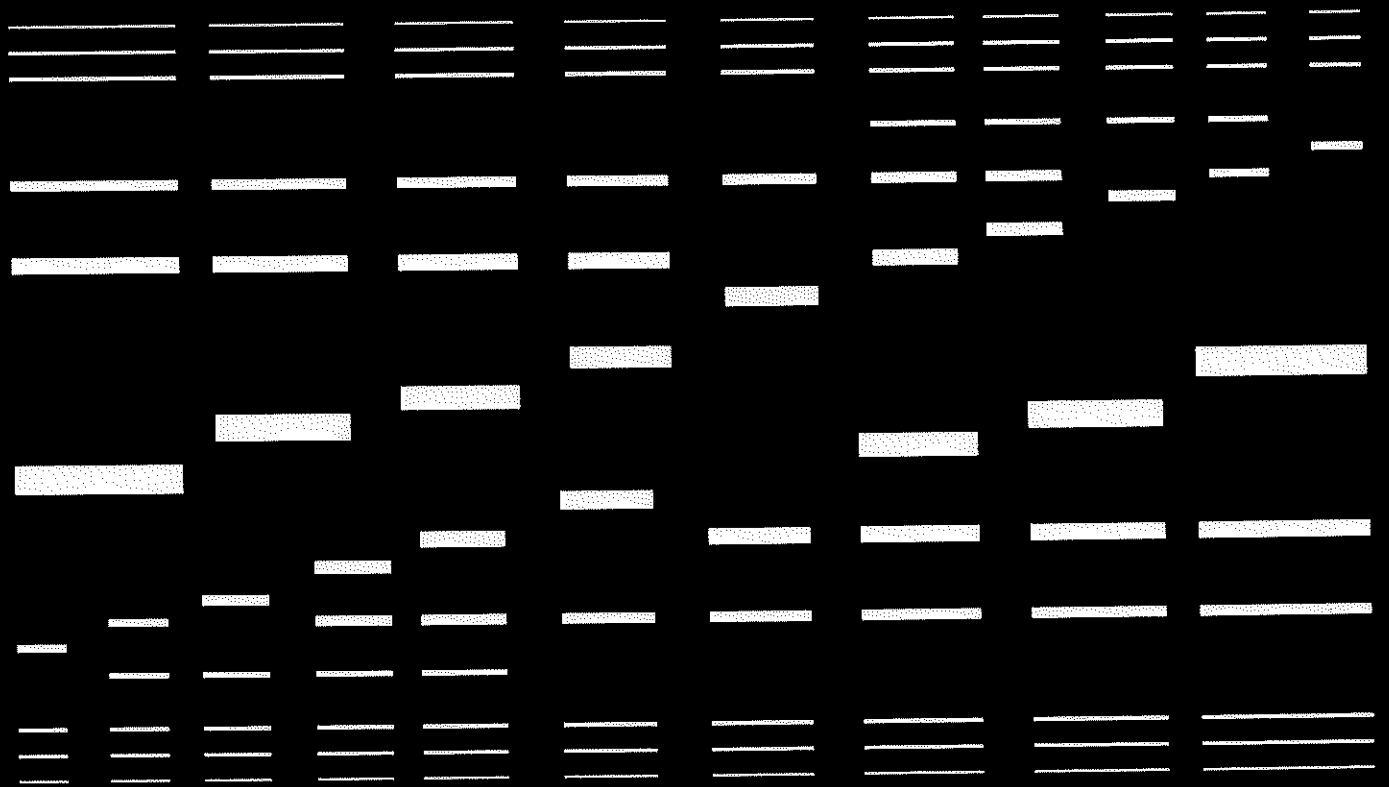
# 次世代

藍 光郎 監修

培風館

# センサハンドブック

室 英夫・大和田邦樹・佐取 朗・石垣武夫・石森義雄 共編



# NEXT GENERATION SENSOR HANDBOOK

Mechanical Systems, 微小電気機械システム)技術で進展しているアクチュエータも包含しており, 各章・節の最後には「次世代センサ」の項目を必ず入れることになっていて, 今後のセンサ・アクチュエータ技術の進展を予測したものとなっている。センサ・アクチュエータ開発者および利用者に本書を積極的に利用して頂ければ, 監修者にとって望外の幸せである。

最後に, 本書の編集に労を取られた, 室英夫編集委員長をはじめ, 大和田邦樹, 佐取朗, 石森義雄, 石垣武夫の各編集委員, さらに公務多端な中をご執筆いただいた執筆者の方々に厚くお礼申し上げる。また, 本書の出版についてご協力いただいた培風館および編集に多大なお骨折りをいただいた松本和宣氏に心よりお礼申し上げます。

2008年6月

監修者 藍 光 郎

編集委員・主査

|    |   |   |       |             |
|----|---|---|-------|-------------|
| 監  | 修 | 藍 | 光郎    | 次世代センサ協議会会長 |
|    |   |   |       | 編集委員        |
| 委員 | 監 | 室 | 英夫    | 千葉工業大学      |
|    |   |   |       | 帝京大学        |
|    |   |   |       | 立教大学        |
|    |   |   |       | エステック       |
|    |   |   |       | (株)東芝       |
| 監  | 修 | 室 | 大和田邦樹 | 佐取 朗        |
|    |   |   |       | 石垣 武夫       |
| 監  | 修 | 室 | 石森 義雄 | 石森 義雄       |
|    |   |   |       |             |

主 査

I 編 査

|      |       |          |
|------|-------|----------|
| 1 章  | 室 英夫  | 千葉工業大学   |
| 2 章  | 木股 雅章 | 立命館大学    |
| 3 章  | 前中 一介 | 兵庫県立大学   |
| 4 章  | 川井 健司 | (株)山武    |
| 5 章  | 柴崎 一郎 | 旭化成(株)   |
| 6 章  | 一ノ瀬 昇 | 早稲田大学    |
| 7 章  | 森泉 豊栄 | 東京工業大学   |
| 8 章  | 本岡 誠一 | 千葉工業大学   |
| 9 章  | 中村健太郎 | 東京工業大学   |
| 10 章 | 田中 秀治 | 東北大学     |
| 11 章 | 江刺 正喜 | 東北大学     |
| 12 章 | 岡山 努  | 岡山技術士事務所 |

II 編 査

|      |       |                 |
|------|-------|-----------------|
| 1 章  | 山崎 弘郎 | 東京大学(名誉教授)      |
| 2 章  | 木下源一郎 | 中央大学            |
| 3 章  | 橋本 周司 | 早稲田大学           |
| 4 章  | 布野 俊彦 | (株)日立ハイテクトレーニング |
| 5 章  | 河村 尚登 | キャノン(株)         |
| 6 章  | 高山 良一 | 松下電器産業(株)       |
| 7 章  | 室 英夫  | 千葉工業大学          |
| 8 章  | 三林 浩二 | 東京医科歯科大学        |
| 9 章  | 信田 茂  | 鹿島建設(株)         |
| 10 章 | 高辻 正基 | 東京農業大学          |
| 11 章 | 藤村 貞夫 | 帝京平成大学          |
| 12 章 | 森田 昌敏 | 国立環境研究所         |
| 13 章 | 佐取 朗  | 立教大学            |

のアプローチも行われている。流速あるいは体積流量に加え、温度、静圧を合わせて計測することで、質量流量とする方式である。

MEMS 技術の利用は一般的かつ不可欠となってきた。本節でも触れている圧力センサにおけるダイヤラム構造、振動型、サプアイヤの使用など、材料、構造の両面で開発が進んでいる。素子自身が大量に、安価に製作できるが、パッケージング技術が非常に重要である。非常に厳しい環境で使用される場合には特に重要である。

微量流量計測は半導体プロセス、燃料電池などの分野での要求があり、開発が盛んである。コリオリ流量計では口径 0.7 mm のものも、実用化されている。

電磁流量計はコイルに電流を流すため、非常に消費電力が大きかったが、1990 年代に二線式が現れ、4 mA 以下での動作が可能とした。最近では 2006 年の水道メータの規格の改定に伴い電池動作で 8~10 年を

可能とするものもあらわれている。さら低消費電力化が進むと考えられる。

低消費電力の無線技術の進歩に伴い配線の自由度が高い無線によるデータ伝送を行うセンサが増えている。またユニバーサリズムもたまってきている。無線化による、設置自由度、メンテナンス性の向上が図られると同時に多くのセンサをネットワークで接続し、それらのデータから、点ではなく、面の情報を読み取ることによって新たな応用が広がるものと考えられる。一方で、一つ一つのセンサの状態を把握することが、可なり、故障診断などを行い、資産管理をすることが、可能となってきたり、メンテナンスの方法も変わってくる。今後とも、いわゆるアセットマネジメントは進むと考えられ、このセンサには状態を診断する技術、ネットワークキーピング技術がさらに浸透していくと考えられる。

# 5

## 磁気センサ

り、本章では除外し、より汎用性の高い磁気センサを中心に取り上げた。また、専門的な記述もさることながら、わかりやすい記述に重点を置いた。さらに高度のより専門的な技術の詳細については参考文献を明示した。できる限り、磁気センサの応用などに関してもふれることに努めた。

### 5.2 ホール素子

#### 5.2.1 ホール素子と応用の発展

ここでは、ホール効果に始まるホール素子の原理や歴史的發展、応用の現状、現在使われるホール素子などについて述べる。

##### (1) ホール素子の応用

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最も代表的な磁気センサである。最も重要、かつ、大量に使われる用途は、磁界を利用した物体の運動や速度、加速度、位置等を検出する非接触センサである。最近の電子機器は、きわめて小型の動力を利用するものが多い。例えば、ビデオテープレコーダ (Video tape recorder: VTR) では磁気テープの駆動に、パソコン (Personal computer: PC) では、メモリデバイス (フロッピーディスクや CD-ROM など) の駆動に小型の制御性のよい動力が必須である。ホール素子は磁気センサとしてこのような超小型の動力の実現のために多数使われている。代表的な応用は、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) 用途である。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

### 5.1 はじめに

磁気センサは今では、身の回りで使われる電子、電気機器などを含め、各方面できわめて多数使われている非接触センサである。本節では、そのなかで代表的なもの、最近開発されて今後が期待されるものについて取り上げた。必ずしも細大漏らさずすべてを取り上げたわけではない。

古くから知られている磁気センサは、電磁誘導を利用して磁界を検出するコイルセンサがある。各種磁気記録を読み出す磁気ヘッドとして使われてきた。このコイルを使う磁気センサは、時間的に変化する磁界を検出でき、しかし、定常磁界は検出できない。

一方、近年、磁束密度を直接検出するタイプの磁気センサの需要が急増し、大量に使われるようになってきた。この磁束密度検出型の磁気センサでは、半導体の薄膜や薄層のホール効果や磁気抵抗効果を使うホール素子や磁気抵抗素子などがよく知られている。集積回路技術を利用して製作するホール IC も近年大きな技術進歩があり、デジタル磁気センサとして用途を拡げている。さらに、最近では、磁気インピーダンス効果 (MI 効果)、巨大磁気抵抗 (GMR) 効果などの利用による磁気センサが開発されている。また、超伝導磁界センサである SQUID は比較的早くから超微弱磁界の検出で実用化されている。

本章は、比較的最近開発され、使われており、電子機器に必須の磁気センサとして重要なものや、あるいは、実用化の段階にきた磁束密度検出型の磁気センサを中心に取り上げた。ハードディスク用途の GMR は、特化された用途で、それ自身で一分野をなしてお

表 5.1 実用化されている主なホール素子

| ホール素子と材料      | ホール電圧 $V_H$       | 駆動条件 | 特徴         | 主な機能デバイス応用                                          |
|---------------|-------------------|------|------------|-----------------------------------------------------|
| InSb ホール素子    | 200~300 mV/0.05 T | 1 V  | 高感度、高出力    | 小型ホールモータ、HICの磁気センサー <sup>*</sup> 、高精度電流センサー、非接触スイッチ |
| GaAs ホール素子    | 80 mV/0.05 T      | 6 V  | 温度依存性小     | 小型ホールモータ、電流センサー、非接触スイッチ                             |
| InAs ホール素子    | 100 mV/250 T      | 6 V  | 温度依存性小     | 電流センサー、HICの磁気センサー <sup>*</sup>                      |
| InAsDQW 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、排気電圧用各種デバイス                                    |

\* HIC(ハイブリッドホールIC)の略

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、さらに、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。いまやホール素子を磁気センサーに使うホールモータなくしては、VTRもパソコンも動作しないのが現状である。このような、ホール素子であるが、歴史経緯を若干述べると、電子部品の感覚で大量生産され、多数使われているInSbなどの高移動度の化合物半導体薄膜を利用するホール素子は比較的最近開発されたものである。

過去二十余年、ホール素子はVTRやパソコンの発展とともにその需要が拡大し、年間の生産量(世界)は、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ーとしては最も多く生産されていると思われる。なかでも薄膜の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。また、ホール素子は、小型で、境界に比例したセンサ出力が得られ、汎用性が高い。スイッチ、電流検出など非接触の磁束密度検出型センサとして汎用性もあり、今なおその用途は広がっている。

表5.1には、現在実用化されている主なホール素子の特徴と応用をリストアップした。

## (2) ホール効果とホール素子の駆動原理

ホール素子は、半導体のホール効果<sup>1)</sup>を利用して境界を送出して電圧信号として出力する磁気センサーである。この電圧信号はホール電圧、またはホール出力電圧(記号:  $V_H$ )と呼ばれ検出境界の磁束密度に比例する。境界を送出し電圧に変換するの磁束密度換算素子とも呼ばれ、境界の計測や検出、磁束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できる<sup>2)</sup>。

図5.1には、4個の電圧1, 2, 3, 4を形成した半導体薄膜のホール効果によるホール素子の原理を示した。 $V_H$ はホール素子の駆動電圧、 $I$ は駆動電流、 $I$

図 5.1 ホール効果とホール素子の駆動原理

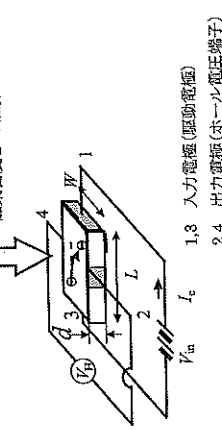


図 5.1 ホール効果とホール素子の駆動原理  
( $d$ : 導体の厚さ,  $L$ : 長さ,  $W$ : 幅, 1, 3: ホール素子駆動電圧, 2, 4: ホール電圧端子電圧,  $V_H$ : ホール電圧,  $V_H$ : 駆動電圧,  $I$ : ホール素子駆動電流, 側面電圧という)

は、素子形状を矩形としたとき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。ホール素子の駆動法で代表的な定電圧駆動(constant voltage driving)と定電流駆動(constant current driving)に対応したホール電圧  $V_H$  の表現を次に示す。駆動電圧  $V_H$  一定の定電圧駆動では、ホール出力電圧  $V_H$  は、ホール効果を生じる材料の電子移動度  $\mu_H$  に比例し、次式で表される<sup>3-7)</sup>。

$$V_H = \mu_H \cdot \frac{W}{L} \cdot B \cdot V_H \quad (1)$$

ここで、 $W/L$ はホール素子の境界検出部の形状比(図5.1を参照)、 $B$ は素子が置かれる境界の磁束密度である。この式により、ホール素子を一定の電圧で駆動する場合は、電子移動度の大きい材料がより大きなホール効果を示すことがわかる。

次に、駆動電流  $I$ (制御電流ともいう)一定の定電流駆動では、ホール電圧  $V_H$  は次式で表される。

$$V_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d} \quad (2)$$

$R_H$ はホール係数で、電子のみが電流を運ぶ最も簡単なモデルでは  $R_H = 1/(en)$  である。 $e$ は電流を運ぶ電子の電荷、 $n$ は電子密度である。定電流駆動ではホール電圧は、磁束密度  $B$  に比例するほか、ホール係数  $R_H$  に比例し、センサ部の厚さ  $d$  に逆比例する。このため、当初、ホール素子材料の高純度化や単結晶化による電子密度の低減と高電子移動度化、および

表 5.2 薄膜ホール素子の実用化の歴史

| 西暦    | 化合物半導体薄膜磁気センサー(ホール素子)の歴史                                                                                                                                                                                  |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1879  | 1879年E. H. Hallは磁界が電流に力を与え、これを発見                                                                                                                                                                          |
| 1947  | 1947年G. A. PersonはゲルマニウムのHall効果で境界を測定する装置を作る                                                                                                                                                              |
| 1952  | 1952年W. WelkerはInSbの大きな電子移動度を発見                                                                                                                                                                           |
| 1958  | 1958年G. GüntherはInSbの大きな電子移動度を発見し、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、センサ部の薄膜化により大きなホール電圧が得られる。このような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、薄膜化が重要な技術的ポイントである。 |
| 1958? | 1958年? 日本では当時電機研究所の片岡肇氏がホール素子を実験                                                                                                                                                                          |
| 1960  | 1960年東京大学の酒井善雄、大下正男によるInSb薄膜ホール素子の蒸着法による論文 <sup>10)</sup>                                                                                                                                                 |
| 1965  | 1965年電機研究所、片岡肇氏「磁気変換素子」を出版 <sup>11)</sup>                                                                                                                                                                 |
| 1975  | 1975年マルチポールの製作(始化成)                                                                                                                                                                                       |
| 1980  | 1980年高感度InSb薄膜ホール素子の量産開始(始化成)                                                                                                                                                                             |
| 1980  | 1980年高感度InSb薄膜ホール素子を磁気センサーに使うVTR用小型精密制御のホールモータ実用化                                                                                                                                                         |
| 1981  | 1981年InAsヘテロ構造の不飽和ドーピングにより温度依存性の抑制技術の発明 <sup>14)</sup>                                                                                                                                                    |
| 1983  | 1983年厚さ0.8 μmのInSb薄膜への金属の低温接合と樹脂封止によるInSb薄膜ホール素子の実用化、家庭用VTRの本体構造でホール素子/ホールモータの需要の拡大が始まる                                                                                                                   |
| 1983  | 1983年SIのイオン注入型GaAsホール素子が商品化                                                                                                                                                                               |
| 1984  | 1984年2インチ基板7枚セットの純型MBEによる磁気増幅型InAs薄膜ホール素子の実用化(始化成)                                                                                                                                                        |
| 1986  | 1986年高感度InSb薄膜ホール素子の1年間の生産が1億個を超える。需要が更に拡大                                                                                                                                                                |
| 1987  | 1987年InAs異結晶薄膜を2インチ基板12枚に同時成長、量産用純型MBE装置の開発(始化成)                                                                                                                                                          |
| 1991  | 1991年MBE法によりSIをドーピングしたInAs異結晶薄膜ホール素子の実用化 <sup>15,16)</sup>                                                                                                                                                |
| 1991  | 1991年InAsDQWホール素子の発明 <sup>17)</sup>                                                                                                                                                                       |
| 1993  | 1993年InAsDQWホール素子の論文発表 <sup>18-20)</sup>                                                                                                                                                                  |
| —     | VTRに加え、パソコンの普及によりホールモータ用ホール素子の需要が大きくなる                                                                                                                                                                    |
| 2000? | InSbの温度依存性を一掃低減するSi及びSnドーピング技術の発明と論文発表 <sup>21,22)</sup>                                                                                                                                                  |
| 2002  | InAsDQW(新材料・新技術)ホール素子の実用化                                                                                                                                                                                 |
| 2003  | 高感度InSb薄膜ホール素子の年間生産量が15億個となる                                                                                                                                                                              |
| 2004  | 2003年までの累計生産130億個を達成(高感度InSb薄膜ホール素子: 始化成)                                                                                                                                                                 |
| 2006  | 格子ミスマッチ0.5%のInSb/AlInSb量子構造の電子輸送特性の論文発表(MBE06) <sup>23)</sup>                                                                                                                                             |
| 2007  | 格子ミスマッチゼロのInAsSb/AlInSb量子構造の電子輸送特性論文発表(NGSI03) <sup>24)</sup>                                                                                                                                             |

\* 次世代磁気センサー材料(5.8.1参照)

し、ホール素子実用化による、ホールモータ開発と応用の進展、拡がりが見られる。

## 5.2.2 ホール素子材料とその特性制御

ここでは、現在実用化されているホール素子材料の現状をまとめた。また、ホール素子材料の温度依存性の低減技術に関して基本的な事項を述べる。

### (1) ホール素子材料とその特性

ホール素子の製作には、電子移動度の高い電磁材料が必要である。初めに、代表的なホール素子に使われ

る薄膜化技術を観察する。ホール素子材料では、電子移動度は定電圧でホール素子を駆動するときの磁界較出感度を決める。このため、ホール素子材料が適当かどうかは、材料の固有の電子移動度の値と動作層を製作した場合のシート抵抗値の大きさが判断される場合が多い。

表5.3には、実際にホール素子の動作層として使われている材料の代表的な目安としての電子移動度をバルク値と比較するとともに対応する材料形態を示した。Siは単体のホール素子としては使われていないが、ホールICの磁気センサーであるホール素子として使われており、ICプロセスで作られるホール素子部の推定値を載せてある。このように現在では各種の材料が実用的なホール素子の動作層の材料として使われている。(MBE)の表示は、ホール素子の動作層が分子線エビタキシー(MBE)法で作られた単結晶薄膜または薄層であることを意味している。表5.3から明らかなように、ホール素子材料としては、Siを除けば、いずれも化合物半導体で電子移動度の大きい材料の薄層や薄膜が使われている。しかし、この表より、実用的なホール素子製作の目的で、薄膜、薄層を製作したときに得られる電子移動度は、必ずしも対応する材料のバルク値と同じではない。理由は、薄膜化したときのシート抵抗値や量産性、コスト、特性、製作プロセスからの制約などの条件の総合判断によって決められるからである。

また、モノリシックホールICのようなSiのIC回路により磁気センサーを製作する場合は、磁気センサーとなるホール素子は、当然であるが、Siをホール素子材料として使っている。このように、実用的なホール素子に使われる各種材料には、それぞれが使われた理由がある。

こうした点を、簡単に述べる。

(a) InSbやInAsのホール素子は、当初は、バルク結晶を研磨により薄層化して製作された。この方法は厚さの精密な制御や薄膜化に限界があり、小さなホール素子を量産することは難しかった。その後提案された、真空蒸着法で製作される、厚さが1μm(1,000nm)以下のInSb薄膜は、フォトリソグラフィ法などの応用により高精度でパターン形成できる半導体プロセスの手法が適用できる好適なホール素子材料である。現在量産されている高感度InSbホール素子は、真空蒸着でマイカ基板上に製作したInSb薄膜が使われている<sup>4,5,7)</sup>。

(b) 真空中で薄膜を製作する手法の一つである分子線エビタキシー(MBE)法は、大面積で単結晶薄膜が成長でき、厚さの制御精度に優れ、組成の違う薄膜の種類、さらに、ドナー不純物のドーピングなどが容易にできる。InAsホール素子では、電子移動度が大きい

い単結晶薄膜が必要とされ単結晶薄膜製作にMBE法が使われている。MBE装置については大面積の電圧装置が開発されている。MBE法は、一原子層単位で装置して単結晶薄膜や超格子などが制作できる技術であり、InAs超薄膜ホール素子(InAs量子井戸)や素子、または、InAsDQWホール素子ともいったりInSb単結晶薄膜のホール素子にも使われている<sup>11-13,15)</sup>。

(c) GaAsのホール素子製作では、半導体GaAs基板の表面にSiをイオン注入、アニールして製作した動作層が、簡便かつ量産性に優れているので使われている。

(d) 次節で述べるが、Siのホール素子は単体のホール素子としては製作されないが、集積回路(IC)技術で製作するモノリシックホールICの磁気センサーとして使われている。ホール素子材料としてのSiは、その意味で表5.3に載せられている。ICプロセスで製作可能なn型のSi薄層がホール素子動作層に使われる。SiCでは、n型の導電層の製作には、ドナー不純物の熱拡散法、他、イオン注入法が使われる。Siは電子移動度が小さく磁界較出感度も低いため、ホール素子と同じSiチップ上に製作されるICチップでホール電圧を増幅して出力するホールICとして実用化されている<sup>27)</sup>。

このようないくつかの薄膜化技術が、各種の実用的なホール素子材料の製作法として使われている。

表 5.3. 実用的なホール素子に使われる薄膜、薄層材料の電子移動度とバルク値の比較

| 材料                                               | 電子移動度<br>(cm <sup>2</sup> /Vs) | 備考                                                                  |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| InSb                                             | 70,000                         | バルク単結晶                                                              |
| InSb薄膜                                           | 20,000<br>~30,000              | 厚さ 800 nm 多結晶薄膜<br>(蒸着)                                             |
| InSb/GaAs                                        | 40,000                         | 厚さ 1,000 nm 薄膜<br>Si ドープ(MBE)                                       |
| InAs                                             | 32,000                         | バルク単結晶                                                              |
| InAs/GaAs                                        | 10,000                         | 厚さ 50 nm Si ドープ薄膜<br>(MBE)                                          |
| GaAs                                             | 8,000                          | バルク単結晶                                                              |
| GaAs n 型導電層                                      | 3,000<br>~4,000                | n 型層<br>(Si イオン注入)                                                  |
| Si (P ドープ)                                       | 1,400<br>600                   | バルク単結晶<br>IC 中の n 型導電層<br>(砒、イオン注入)                                 |
| AlGaGaAs/AsGaSb<br>/InAs/AlGaGaAs<br>AsGaSb/GaAs | 20,000                         | 厚さ 50 nm, AlGaGaSb による InAs 量子井戸構造<br>(MBE)                         |
| AlGaInAs/InSb/<br>AlGaInAs/GaAs                  | 40,000                         | 厚さ 300 nm, AlInSb による InSb サンドイッチ構造<br>(MBE) <sup>90)</sup>         |
| AlGaInAs/InAs/<br>SbGa/AlGaInAs/GaAs             | 35,000                         | 厚さ 100 nm, AlInSb による InAsSb サンドイッチ構造<br>量子井戸構造(MBE) <sup>90)</sup> |

(2) ホール電圧および入力抵抗値の温度係数の算出  
本項では、式(1)および式(2)で表わされるホール素子のホール電圧とホール素子の入力抵抗値等の温度依存性について室温周辺での簡単な算出をする<sup>7,14,23,27)</sup>。  
ホール素子の入力抵抗値  $R_H$  (幅  $W$ , 長さ  $L$  の薄膜の抵抗値)は、感磁部を構成するホール素子材料の抵抗率を  $\rho$  とすると、次のように書ける。

$$R_H = \rho \frac{L}{W \cdot d} \quad (3)$$

式(1)および式(2)、式(3)の両辺を温度で微分して温度係数を求める。

$$\text{定電流駆動のホール電圧 } V_H \text{ の温度係数は、}$$

$$\beta_H = \frac{1}{V_H} \cdot \frac{dV_H}{dT}$$

$$= \frac{1}{R_H} \cdot \frac{dR_H}{dT} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} = -\beta_n \quad (4)$$

ここでは、ホール係数  $R_H = 1/en$  とした。

温度係数は、電子密度の温度係数  $\beta_n$ 、すなわち、電子密度の逆数  $1/n$  と、1°C あたりの電子の励起数  $dn/dT$  に比例する。定電圧駆動では

$$\beta_H = \frac{1}{V_H} \cdot \frac{dV_H}{dT} = \frac{1}{\mu_H} \cdot \frac{d\mu_H}{dT} = \beta_\mu \quad (5)$$

この場合は電子移動度  $\mu_H$  の温度係数  $\beta_\mu$  と同じになる。

素子の入力抵抗値の温度係数は、式(3)より、

$$\beta_R = \frac{1}{R_H} \cdot \frac{dR_H}{dT} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = \beta_\rho \quad (6)$$

であり、抵抗率  $\rho$  の温度係数  $\beta_\rho$  と同じである。上式は、抵抗率  $\rho = 1/en\mu_H$  の関係から、書き直すと、

$$\beta_R = \frac{1}{R_H} \cdot \frac{dR_H}{dT} = -\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} \cdot \frac{1}{\mu_H} \cdot \frac{d\mu_H}{dT} \quad (7)$$

と表せる。温度係数  $\beta_n$ ,  $\beta_\mu$ ,  $\beta_\rho$  の間には、

$$\beta_\rho = -\beta_n - \beta_\mu \quad (8)$$

の関係がある。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小さくしようとすると、式(4)の右辺  $(-1/n) \cdot (dn/dT)$  を小さくすればよい。

$dn/dT$  の値はバンドギャップで決まる電子の励起数であり、室温周辺では温度変化によるのはあまり大きく変化しないと考えられる。したがって、ドーピングで  $n$  を大きくすると定電流駆動時のホール電圧の温度依存性、すなわち温度係数は小さくできる。一方、式(5)からわかるように定電圧駆動のホール電圧は電子移動度の温度依存性で決まるので定電圧駆動では、ホール電圧の温度依存性をドーピングで小さくすることは難しいことが予想できる。

素子抵抗値の温度依存性は式(7)から明らかのように、第一項の電子密度の温度係数と第二項の電子移動度の温度係数の単純和であり、電子密度の温度変化に対応する、すなわち、式(7)第一項はドーピングで小

さくすることが可能である。

このように、n 型の不純物ドーピングにより定電流駆動のホール電圧やホール素子の入力抵抗値の温度依存性を減少できる。

ドナー不純物のドーピングによる温度依存性の減少は、現在では、実験的にも観測されており、電子移動度と抵抗率に關して上記の議論から予想した有効性が確認されている。InAs や InSb の単結晶薄膜では、低温で真性電子の密度が減少するので電子移動度の温度依存性低減の効果は特に大きい。また、上記の計算から明らかなように、この効果は、電子密度のみの効果であり、不純物の種類にはよらない<sup>12,15,23,29)</sup>。

### 5.2.3 実用ホール素子各論

現時点で知られている代表的な実用ホール素子は表5.1に示してある。以下では、現在使われている主なホール素子について技術、特性などについて概説する。ここでいう実用ホール素子とは、現在製作され、実際に使われているホール素子を意味するが、近未来に使われる可能性のあるもので重要と思われるものも含めた。

#### (1) 高感度 InSb 薄膜ホール素子

(磁気増幅型 InSb 薄膜ホール素子)

当初の InSb 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小さかった。このため、ホール素子は高価で量産性に欠け、小型化が難しい等の課題があった。さらに、信頼性が低い等の問題もあり、磁気センサーとして一般の電子機器に使用する電子部品としては難点が多く、その応用は、限定されており、磁界計測用途のアプローチが中心であった。

このような、旧来のホール素子の問題を解決し、現在も多く生産され使われているホール素子は、真空蒸着法で製作される InSb 薄膜のホール効果を使う高感度ホール素子である<sup>4-7,14)</sup>。図5.2には、各種の形状でパッケージされた高感度 InSb ホール素子の写真

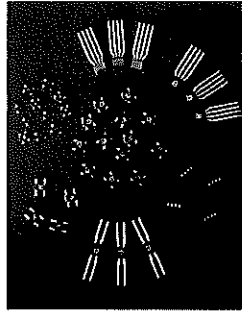


図 5.2 市販の高感度 InSb ホール素子の写真

表 5.4 高感度 InSb ホール素子の代表的な特性 (HW-300A, Asahi-kasei Electronics)

| 項目        | 記号        | 特性                                             | 条件                                      |
|-----------|-----------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| ホール電圧     | $V_H$     | 168~320 mV                                     | $B=50 \text{ mT}$ , $V_a=0 \text{ V}$   |
| 入力抵抗      | $R_{in}$  | 240~550 $\Omega$                               | $B=0 \text{ mT}$ , $I_c=0.1 \text{ mA}$ |
| 出力抵抗      | $R_{out}$ | 240~550 $\Omega$                               | $B=0 \text{ mT}$ , $I_c=0.1 \text{ mA}$ |
| 不平衡電圧     | $V_0$     | $\leq \pm 7 \text{ mV}$                        | $B=0 \text{ mT}$ , $V_a=1 \text{ V}$    |
| ホール電圧温度係数 |           | $\pm 0.1 \sim 0.2 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ | $B=50 \text{ mT}$ , $V_a=1 \text{ V}$   |
| 抵抗温度係数    |           | $-1.8 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$             | $B=0 \text{ mT}$ , $I_c=0.1 \text{ mA}$ |

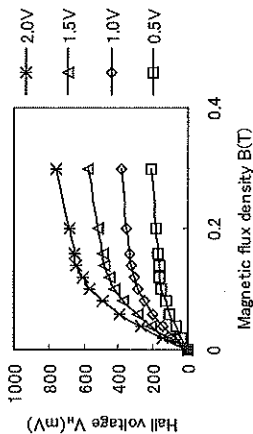


図 5.4 定電圧駆動時のホール電圧と磁束密度の関係 (HW-300 A, Asahi-kasei Electronics)

$V_H$  の関係を示した。フェライトの飽和により高磁界では磁束密度 (magnetic flux density) に比例しなくなる本素子特有の特性を有する。

図 5.5(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きわめて少ない。また、図 5.5(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。 $-2\text{ }^\circ\text{C}$  で温度の上昇とともにホール電圧は減少する。このようにホール電圧は、定電流駆動では温度依存性が大きいが定電圧駆動ではきわめて小さい。

また、図 5.6 は高感度 InSb ホール素子の入力抵抗値 (Input resistance) の温度依存性である。 $-2\text{ }^\circ\text{C}$  で抵抗値は減少する。室温周辺から外れた  $100\text{ }^\circ\text{C}$  以上や  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  以下で素子を使う場合は大きな駆動電流増加の対策等の必要性を示している。

以上述べたような高感度 InSb 薄膜ホール素子の特徴をまとめると、

- ① 強固な樹脂パッケージのホール素子で超小型磁気センサー
- 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、高出力電圧)
- ③ ホール素子部 InSb の薄膜化により入力抵抗が大き (中心値 350  $\Omega$ ) 高入力抵抗ホール素子

ある。

#### (b) 磁気増幅構造

ソフトライトの基板とソフトライトの微小チップの間にホール素子の磁気センサー部の InSb 薄膜をサンドイッチする物理的な構造 (磁気増幅構造) である。図 5.3(a) にこの構造の断面構成を示した。この構造により、検出しようとする磁界の大きさに比例してフェライトが磁化することを利用し、InSb 薄膜に加わる磁束密度を 3~6 倍程度大きくすることにより、ホール素子の材料である InSb の薄膜の特性から得られるオリジナルの磁界検出感度の 3~6 倍の高感度の達成という、それまで開発されたホール素子とはまったく違った実用的な高感度を実現した。

#### (c) 製作工程

高感度 InSb 薄膜ホール素子の製作工程は、マルチポート蒸着法による加熱したマイカ基板上に InSb 薄膜を製作する工程、マイカ基板上の厚さ  $0.8 \mu\text{m}$  の InSb 薄膜を剥離しフェライト基板に接着する工程、こうして製作した InSb 薄膜ウェハをスタターにし、集積回路製作で使われるフォトリソグラフィ技術を用い、InSb 薄膜を高精度でエッチ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ー部に接着する工程、ウェハを個々のホール素子チップ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 (図 5.3 参照) を製作する。個別のホール素子に切り離された後は、ダイビング、ワイヤーボンディングの工程を経て、最後はトランスファーマーモールドプロセスによりエポキシ樹脂のパッケージが行われ 1 個のホール素子として完成する。

#### (d) 磁気センサーとしての特徴

- ① この高感度 InSb 薄膜ホール素子は、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 薄膜を感磁部採用し、かつ、磁気増幅構造を採り入れることで、これまでの常識を破る高感度、低消費電力を実現した。
- ② 薄膜の採用によりホール素子の入力抵抗値の標準が、 $350 \Omega$  と大きく、定電圧駆動が可能な素子である。5.2.1 項の式 (1) により定電圧駆動すれば、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くなる。すなわち、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可能な InSb ホール素子である。

表 5.4 には、このような高感度 InSb ホール素子の代表的な特性を示した。

次に、図 5.4 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 (Hall voltage)

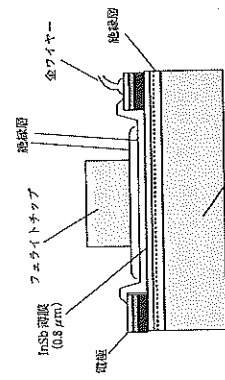


図 5.3(a) 高感度 InSb 薄膜ホール素子の断面構成

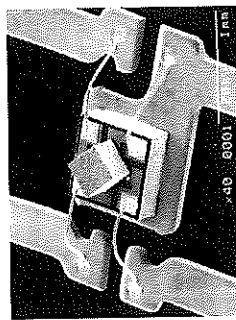


図 5.3

が示されている<sup>20)</sup>。高感度 InSb 薄膜ホール素子の特徴は、次のようである。

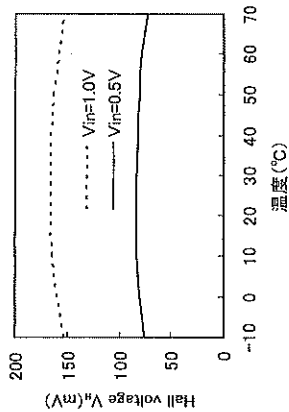
- ① ホール素子部 (磁気センサー部) には、薄いマイカ基板上に、真空蒸着法で製作した、厚さ  $0.8 \mu\text{m}$ 、電子移動度  $20,000 \sim 30,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  の InSb 多結晶薄膜を使う薄膜ホール素子。
- ② 高感度化のため磁気センサー部に加わる磁界を 3~6 倍増幅するためにフェライト基板とチップで InSb 薄膜を上下からはさみ込む、新規な磁気増幅構造を有する。また、図 5.3(a) には、磁気増幅構造を有する高感度 InSb 薄膜ホール素子の断面構成、図 5.3(b) には、パッケージされる前の高感度 InSb 薄膜ホール素子の写真を示した。

この高感度 InSb 薄膜ホール素子の特徴的な点をあげる。

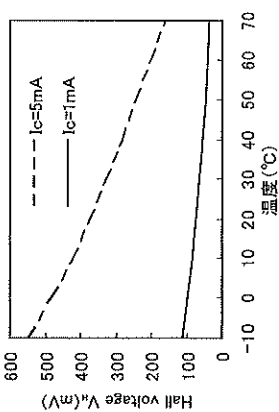
#### (a) マルチポート蒸着法

InSb 多結晶薄膜を製作する技術は、マルチポート真空蒸着法と呼ばれ、InSb 薄膜用に独自に開発された方法である。

専用に開発した真空用真空蒸着装置により、真空中で複数の蒸着源から順次 InSb を蒸発させ、加熱したマイカ基板上に InSb 薄膜を堆積形成し、化学量論的な組成をきわめて単純に制御し、厚さ  $0.8 \mu\text{m}$  で、電子移動度が  $20,000 \sim 30,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、シート抵抗値が  $170 \Omega$  程度の InSb 薄膜を工業的に量産する技術で



(a) 定電圧駆動時のホール電圧の温度依存性 (HW-300A, Asahi-kasei Electronics)



(b) 定電流駆動時のホール電圧の温度依存性 (HW-300A, Asahi-kasei Electronics)

図 5.5

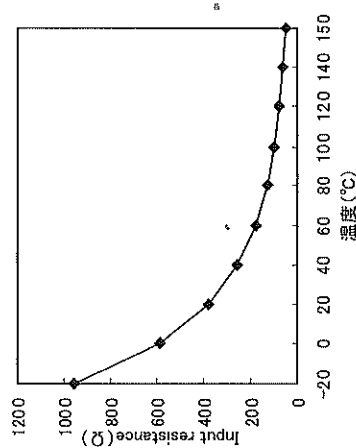


図 5.6 高感度 InSb ホール素子の入力抵抗値の温度依存性 (HW-300 A, Asahi-kasei Electronics)

- ④ 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、 $1/10 \sim 1/20$  に低減されたホール素子 (薄膜化により実現)

表 5.5 には、高感度 InSb ホール素子の特徴と対応する応用上のメリットをあげた。

このホール素子は、高感度の磁界検出性能、温度依

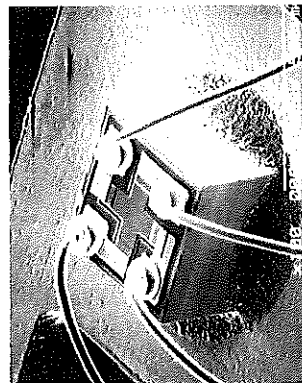


図 5.7 Si ドープ InAs 単結晶薄膜のホール素子チップ (InAs の厚さ 0.5 μm, チップサイズは 0.36 mm<sup>2</sup> 角)

表 5.6 Si ドープ InAs ホール素子の特性

| 項目         | 記号               | 特性             | 条件                                      |
|------------|------------------|----------------|-----------------------------------------|
| ホール電圧      | $V_H$            | 100 mV         | $B=50 \text{ mT}$ , $V_m=6 \text{ V}$   |
| 入力抵抗       | $R_{in}$         | 320 Ω          | $B=0 \text{ mT}$ , $I_c=0.1 \text{ mA}$ |
| 出力抵抗       | $R_{out}$        | 320 Ω          | $B=0 \text{ mT}$ , $I_c=0.1 \text{ mA}$ |
| 不平衡電圧      | $V_{\text{off}}$ | ±8 mV          | $B=0 \text{ mT}$ , $V_m=6 \text{ V}$    |
| ホール電圧の温度係数 |                  | -0.08~0.12 /°C | $B=50 \text{ mT}$ , $V_m=6 \text{ V}$   |
| 抵抗温度係数     |                  | +0.2 /°C       | $B=0 \text{ mT}$ , $I_c=0.1 \text{ mA}$ |

度でのホール出力電圧(温度係数)が量産素子で得られている。

③ ホール出力電圧の温度依存性は -0.18%/°C、きわめて小さい。適当な駆動条件を選ぶことで -40~150°C の広い温度範囲で駆動できる。

④ ノイズやオフセット電圧のドリフトが少ない(電流検出などの応用では特に重要な特性)。

このように Si ドープ InAs 単結晶薄膜のホール素子は、図 5.8 に例示したように、ホール電圧と磁束密度の比例関係にも優れている。さらに、図 5.9(a) および、図 5.9(b) に示したように、ホール電圧の温度依存性も少なく、低温から高温まで安定して動作す

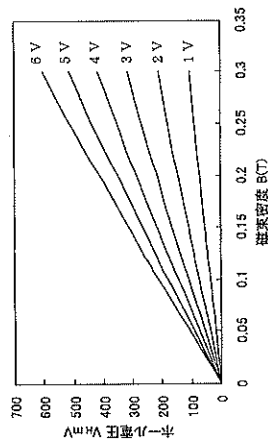


図 5.8 定電圧駆動における Si ドープ InAs 単結晶薄膜ホール素子の磁束密度-ホール電圧特性(図中の表示駆動電圧)

が必要である。  
真空蒸着法に次いで開発された分子線エビタキシ-法(MBE 法ともいう)は、原子を一層ずつ積層することと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い InAs 単結晶薄膜が成長できる。さらに、特性の優れた単結晶薄膜が大面積で製作できる。

また、この技術では、InAs の結晶成長中に再現性よく、安定して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る。すなわち、MBE 法は、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。MBE 法で製作し、実用化されている Si をドープした InAs 単結晶薄膜を動作層とするホール素子について以下述べる。

(a) Si ドープ InAs 単結晶薄膜ホール素子  
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。そのため、大面積の InAs 薄膜が成長できる MBE システムが開発されている。この 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、InAs の薄膜が 12 枚同時に成長できる量産用の MBE 装置である(24,145)。

ホール素子の動作層を製作するため半絶縁性の GaAs 基板の(100)面より 2° 傾いた表面に、Si をドーピングした、膜厚 0.5 μm 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 MBE 法により成長させる。この単結晶 InAs 薄膜は Si や Sn 等のドナー不純物をドーピングすると、電子移動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 を適量ドーピングした InAs 単結晶薄膜は、室温での電子移動度はアンダー 10<sup>5</sup> cm<sup>2</sup>/V・s に比較して大きく、10,000 cm<sup>2</sup>/V・s を超える。

この大面積 MBE 装置により、GaAs 基板上に成長した厚さ 0.5 μm、Si ドープ InAs 薄膜の標準的な特性は電子移動度 8×10<sup>5</sup> cm<sup>2</sup>/V・s、電子移動度は 10,000~11,000 cm<sup>2</sup>/V・s である。この薄膜を用い、感磁部が十字の対称パターンで、入力抵抗、出力抵抗を 320 Ω、チップサイズは 0.36 mm<sup>2</sup> 角で設計し、本素子特有のウエハプロセスにより素子化し、量産ラインでパッケージした InAs ホール素子を製作した。図 5.7 の写真は Si ドープ InAs ホール素子チップである。

Si ドープ InAs ホール素子の磁界での特性は、表 5.6 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、ホール素子の感度は 100 mV/6 V・0.05 T(6 V 駆動、0.05 T の磁束密

が拡大している。今後大きな拡がりが期待されるホール素子の応用分野である。また、非接触で低温から高速まで、回転速度や角速度を検出し、速度にもよらないセンサ信号が得られる高精度の回転センサにもホール素子を使うことが可能である。鉄道や自動車用途も磁束密度の直接検出型の磁気センサであるホール素子の有力応用分野である。

ところで、InSb ホール素子の最大の課題は、0.17 eV 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る。VTR やパソコン等で使われるホールセンサーではこれら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。しかし、低温や 100°C 以上の高温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、このような大きな素子抵抗値の温度変化は問題となる。

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るが、VTR やパソコン等の温度範囲と比べて実質 2 倍の約 200°C に動作温度範囲は拡大する。将来、省電力などの応用が期待されている大電力を非接触計測する電流センサや大型産業機械等への応用は、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がホール素子に期待されている。

かくして、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きわめて重要である。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。
- ② InSb そのものの温度依存性を変える。

という 2 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に使うことができ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。InAs は、InSb に次ぐ高い電子移動度を有し、バンドギャップは 0.36 eV(300 K)で InSb のおよそ 2 倍である。格子定数は 6.06 Å、室温でのバルクアンダーの単結晶の電子移動度は 33,000 cm<sup>2</sup>/V・s、 $d(\Delta E_g)/dT$  は  $0.35 \times 10^{-4}$  eV/K である。室温周辺ではエネルギーギャップの温度依存性はきわめて少ない。高感度でしかも低温から高温まで安定して動くホール素子が期待できる素子材料である。これが、InAs 系のホール素子が必要とされる理由である。しかし、このような InAs ホール素子の実現には、新たな高い電子移動度を得る InAs の薄膜技術

表 5.5 高感度 InSb 薄膜ホール素子の特徴と応用上のメリット

| 特徴              | 応用上のメリットなど                   |
|-----------------|------------------------------|
| 高感度             | 弱磁場の高精度検出、リーク電界などの検出が可能      |
| ホール電圧の温度依存性が小さい | 室温周辺では温度の影響が少なく、使いやすい        |
| 低消費電力駆動が可能      | バッテリー駆動も可能                   |
| 小型のプラスチックパッケージ  | 高い信頼性、小型モータ等や小型マイコンへの応用などが可能 |

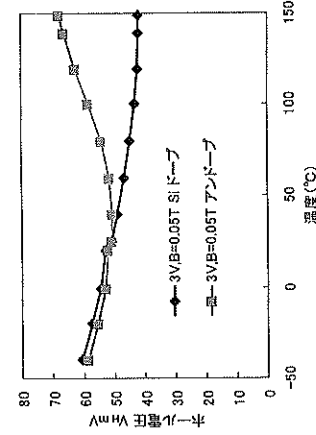
性が小さく、低消費電力など応用上のメリットがきわめて大きい。

この高感度 InSb 薄膜ホール素子は、導電ゆえに素子抵抗値が室温で 300 Ω 以上あり、高感度の磁界検出性能、温度依存性が小さい、さらに、低消費電力、室温周辺のホール電圧の温度依存性がきわめて小さい等に加えて、小型で強固な樹脂パッケージ、面実装パッケージ、ハンダフロープロセッサ対応の耐熱性、信頼性など大量に使用する上での高い信頼性、電子機器の一般的な要請である、軽い、薄い、小型電子機器対応など応用上大きなメリットがある。特に、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、すなわち、ホールモータの磁気センサとして多数使われてきた。最近では、家電製品に使われる小型のパワーモータのセンサとしても用途を伸ばしている。

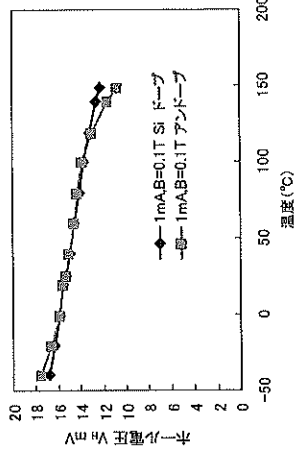
(2) InAs 薄膜ホール素子、InAsDQW ホール素子  
しづめに、なぜ InAs ホール素子が必要とされるかについて。先に述べた InSb ホール素子は多結晶の真空蒸着膜を磁気センサ部(感磁部)とし、磁気増幅線を取り入れることで高感度磁気センサとして実用化された。ホールモータの磁気センサとして多用され、その他にも応用範囲の広い高感度 InSb ホール素子である。素晴らしい特性であるが、将来の応用を考えると改善すべき課題もあった。

非接触で物体の位置や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、最近では多くの応用が期待されている。

これまではあまり注目を集めなかったが、厳しい環境で精密な動作を要するパワーモータの回転制御用センサや、各種の非接触位置センサ等が、ホール素子の重要な応用分野となりつつある。さらに、ホール素子を使えば、非接触で直流、交流、過渡電流等の計測可能な磁束密度検出型の電流センサが製作できる。このような電流センサはホール素子の最も特長的な応用の一つである。ホール素子の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高精度、省エネルギー制御は、エアコンなどの家電製品等に応用



(a) 定電圧駆動時の InAs 単結晶薄膜ホール素子のホール電圧の温度依存性比較



(b) 定電流駆動時の InAs 単結晶薄膜ホール素子のホール電圧の温度依存性比較

図 5.9

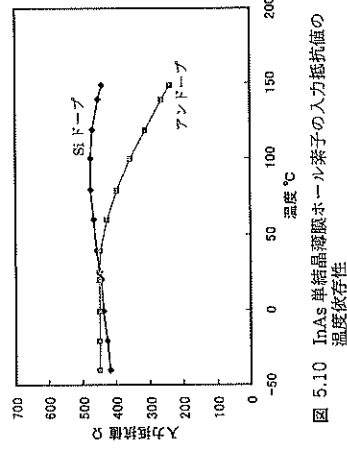


図 5.10 InAs 単結晶薄膜ホール素子の入力抵抗値の温度依存性

る。図 5.10 には、高温で駆動するとき重要な素子抵抗値の温度依存性が示されている。Si ドープ InAs 単結晶薄膜のホール素子は、図 5.10 から明らかに、100°C 以上でも至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きわめて少なく信頼性もよい。

この Si ドープ InAs ホール素子は、磁束密度とホ

ール電圧の比例性がよく、安定、高精度で、直流も含む過渡的な電流を精度よく測定できる。このため、非接触の電流センサとして実際に使われている。また、低温から高温まで動作する素子の特徴は、将来の自動車用途の磁気センサとしても有力である。

#### (b) InAs DQW ホール素子

InAs ホール素子の磁気検出感度の向上を狙った InAs の量子井戸構造のホール素子である InAs DQW (deep quantum well) ホール素子が開発されている<sup>67)</sup>。温度依存性を少なく、かつ、磁界で高感度もしくは大きな出力が得られる InAs ホール素子の動作には、高い電子移動度と高い電子密度、さらに、高いシート抵抗値の InAs 薄膜が必要である。この要求を満たすホール素子では InAs 薄膜をきわ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 (格子整合のよい) 絶縁層が有効である。このため、InAs と格子整合する 4 元素の絶縁層である GaAs/AlGaAs/As<sub>0.5</sub>Sb<sub>0.5</sub> 層で InAs の動作層を上下からサンドイッチした構造、すなわち、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 cm<sup>2</sup>/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。図 5.11 には、試作した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。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/6 V・0.05 T の高感度、高出力が得られた。このホール電圧は磁気増幅構造の InSb ホール素子の感度に匹敵する。ホール電圧と検出磁界との比例性にも優れ、ホール電圧の温度依存性もきわめて少ない。

この InAs DQW ホール素子の高い磁気センサとしての可能性を示すために、図 5.12 には、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。図から InAs DQW ホール素子は、

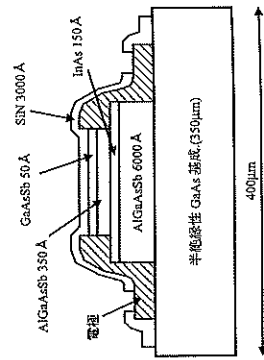


図 5.11 InAs DQW ホール素子の断面 (試作構造)

## 5.2 ホール素子

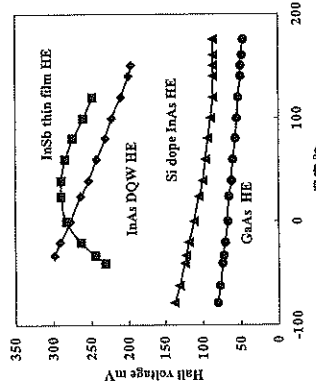


図 5.12 各種ホール素子のホール電圧とその温度依存性の比較 (駆動電圧は、高感度 InSb 薄膜ホール素子は 1 V、その他の素子は 6 V 駆動である)

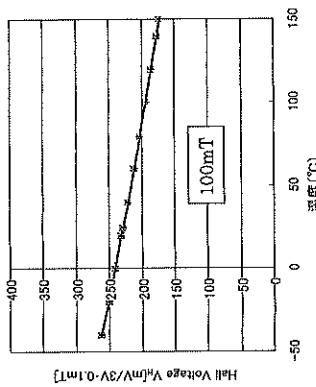
- ① 磁界での感度 (ホール電圧) が高感度 InSb 薄膜ホール素子並に高い。
- ② 温度依存性は小さい。
- ③ 動作温度範囲が広い。
- ④ 高入力抵抗のため素子の消費電力がきわめて少ない。

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<sup>12,13,22–24)</sup>。この InAs DQW ホール素子は、ルームエア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た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。表 5.7 は、市販されている InAs DQW ホール素子の特性表である。この素子は、動作層の InAs の厚さが 50 nm である<sup>29)</sup>。

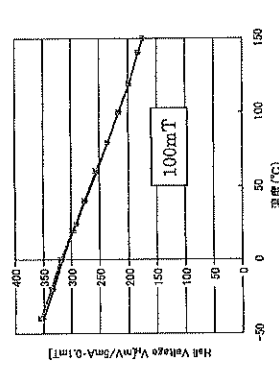
図 5.13(a) は定電圧駆動、および図 5.13(b) は定電流駆動の場合のホール電圧の温度依存性を示した。本素子は、図 5.13 からわかるように、ホール電圧の温度に対する変化が直線的である。これは、ホール電圧の回路的な温度補正が容易となる特徴である。さらに、図 5.14 には、ホール素子の入力抵抗値  $R_{in}$  の

表 5.7 InAs DQW ホール素子特性 (旭化成エレクトロニクス、HQ-00III)<sup>29)</sup>

| 項目        | 記号        | 特性                        | 条件                     |
|-----------|-----------|---------------------------|------------------------|
| ホール電圧     | $V_H$     | 90–130 mV                 | $B=50$ mT, $V_a=3$ V   |
| 入力抵抗      | $R_{in}$  | 750–1150 Ω                | $B=0$ mT, $I_c=0.1$ mA |
| 出力抵抗      | $R_{out}$ | 750–1150 Ω                | $B=0$ mT, $I_c=0.1$ mA |
| 不平衡電圧     | $V_e$     | $\leq \pm 6$ mV           | $B=0$ mT, $V_a=3$ V    |
| ホール電圧温度係数 |           | $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ | $B=50$ mT, $V_a=3$ V   |
| 抵抗温度係数    |           | $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ | $B=0$ mT, $I_c=0.1$ mA |



(a) InAs DQW ホール素子のホール電圧の温度依存性 (3 V 定電圧駆動)



(b) InAs DQW ホール素子のホール電圧の温度依存性 (5 mA 定電流駆動)

図 5.13

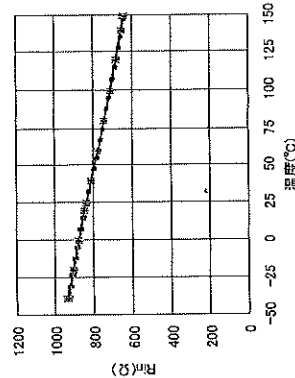


図 5.14 InAs DQW ホール素子の入力抵抗の温度依存性

温度変化を示した。ホール電圧も、素子の抵抗値も温度変化は小さい。

#### (3) GaAs ホール素子

GaAs は、バンドギャップエネルギーが 1.4 eV で狭ギャップの化合物半導体ではない。しかし、この大きなバンドギャップゆえに、ドナー不純物、または、アクセプタ不純物をドーピングしない限り絶縁性である。このため、容易に絶縁性の単結晶基板の製作が可能で

にも覆れるプロセスで動作層を製作するので、コストも安くつく特徴がある。現在では、InSbのホール素子に次ぐ生産量の多い重要なホール素子である。小型のホールモータを中心として、電流検出や車載センサ分野などで応用が拡大している。定電流駆動をする場合、エビタキシャル技術により、あらかじめ製作した基板の上に所望の導電性の薄膜層を形成する方法もとられるが、電界効果トランジスタやホール素子などの製作では、絶縁性のGaAs基板をあらかじめ製作し、次いで、この表面に不純物原子の加速したイオンを打ち込み、 $n$ 型導電性、または、 $p$ 型導電性の薄膜を形成して所望の素子を製作する。GaAsホール素子もイオン注入法で製作することが可能である。

GaAsホール素子の製作では、当初はMOCVD法により $n$ 型の動作層をエビタキシャル成長して形成する方法とされたが、現在は、製作の容易さ、コストメリットなどから、Siのイオン注入により $n$ 型の動作層を製作する方法が主流である。以下GaAsホール素子の製作法の概要を述べる。

イオン注入法によるホール素子の動作層の製作は、あらかじめ製作しておいた半絶縁性のGaAs基板表面にイオン注入法により、加速したSiイオンを打ち込み、 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 付近の温度で、加熱アニールすること、Siイオンの打ち込みで破壊されたGaAsの結晶格子を再配列するとともに、打ち込んだSiイオンを活性化して $n$ 型導電層をGaAs基板の表面に形成する。Siイオン注入後のアニールの方法は、Asの蒸気圧が高く、加熱するとGaAs基板からのAs抜けが生じるので、詳細は略すが、不活性ガスで希釈したアルシランガス中でのアニールの他、As抜け防止のために瞬間的に加熱したアニールする光アニール法がつか

われる。ホール効果を生じる動作層の電子密度の調整は、イオン注入時の注入電流(イオン電流)を変え、注入時間を調整することで可能である。イオン注入時の加速電圧にもよるが、動作層の厚さは、通常、 $0.3\mu\text{m}$ 程度である。一般には、イオン注入したSi原子は、加速電圧に比例した深さを中心にGaAsの表面付近で、深さ方向に正偏分布する。したがって、GaAs表面に形成される $n$ 型動作層の深さ方向のSi原子の分布密度は、加速したSiイオンの速度分布もあり、さらに、高密度に言えば、アニールによる再分布も加わり一様にはならない。最終的には、注入時の正規分布に近い分布である。アニール後のGaAs動作層の電子移動度

は、Siイオンとの衝突で格子が破壊されることもあ

り、アニールで完全にもとに戻るわけでもない。また、Siによる不純物散乱の影響も大きく、バルクの値には及ばない、おおむね $4,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度である。こうして形成された $n$ 型の導電層のホール効果を利用するのがGaAsホール素子である。

ホール素子パターン製作は、代表的に2つの方法がある。その一つは、2インチ、または4インチ径の半絶縁性のGaAs基板の表面にホトリソグラフィプロセスによりホール素子の形状に合わせて説明したSiイオンフォトリソのマスクを利用して加速したSiイオンを打ち込みホール素子の動作層のパターンを形成する方法と第二の方法は、半絶縁性のGaAs基板の全面にSiイオンを打ち込み、その後、フォトリソングラフプロセスによりメサエッチングしてホール素子の形状をつくる方法がある。

基板上に、製作されたGaAsホール素子は、ダイシング工程を経て個別の素子に切り離されて、ボンディング、樹脂パッケージされて製品として完成する。

イオン注入法によるGaAsホール素子は、上述のように、動作層の電子移動度が低く、磁界検出感度はInSbやInAsのホール素子には及ばないが、定電流駆動すれば、ホール電圧の温度依存性がきわめて少ない、歪差が小さくコストメリットがあるなど、様々な利点があり利用されている。

GaAsホール素子の特徴は、バンドギャップの大きいことに起因し、ホール係数が室温で室温付近ではほとんど変化しないことから、定電流駆動時のホール電圧の温度依存性が $-0.06\%/^\circ\text{C}$ で、きわめて小さいことである。しかし、定電圧駆動では、ホール電圧の温度係数は、抵抗値、または、電子移動度の温度係数とほぼ同じ値の $-0.3\%/^\circ\text{C}$ である。また、動作層の電子移動度が小さいので磁気抵抗効果の影響が小さく、かなり大きな磁束密度までホール電圧の磁束密度比例性がある。表5.8には、イオン注入法により製作された、GaAsホール素子の標準的な特性例を示した<sup>20)</sup>。

また、GaAsホール素子は、InSbホール素子として早くから開発されホールモータの磁気センサとして多数使われてきた。当初は、GaAs基板が高価なため、コスト的な問題があった。その後、GaAs基板の量産による価格低下もあり、イオン注入という量産性

表 5.8 GaAsホール素子特性  
(旭化成エレクトロニクス、HG-302C)<sup>20)</sup>

| 項目         | 記号        | 特性                       | 条件                                    |
|------------|-----------|--------------------------|---------------------------------------|
| ホール電圧      | $V_H$     | $35\sim 75\text{ mV}$    | $B=50\text{ mT}$ , $V_a=6\text{ V}$   |
| 入力抵抗       | $R_{in}$  | $650\sim 850\ \Omega$    | $B=0\text{ mT}$ , $I_c=0.1\text{ mA}$ |
| 出力抵抗       | $R_{out}$ | $650\sim 850\ \Omega$    | $B=0\text{ mT}$ , $I_c=0.1\text{ mA}$ |
| 不平衡電圧      | $V_u$     | $\leq 11\text{ mV}$      | $B=0\text{ mT}$ , $V_a=6\text{ V}$    |
| ホール電圧の温度係数 |           | $-0.06\%/^\circ\text{C}$ | $B=50\text{ mT}$ , $I_c=5\text{ mA}$  |
| 抵抗温度係数     |           | $-0.3\%/^\circ\text{C}$  | $I_c=0.1\text{ mA}$                   |

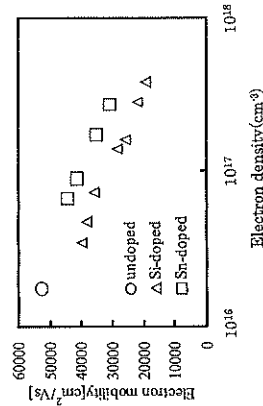


図 5.15 MBE法で製作したInSb単結晶薄膜の電子移動度と電子密度の関係(InSbの厚さは $1.0\mu\text{m}$ )

度の低下はそれほど顕著でなく、 $30,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える電子移動度が得られている。結果として、SnやSiをドーピングしたとしてもInSb単結晶薄膜はホール素子と磁気抵抗素子などの磁気センサ材料としては極めて魅力的である。SnはSiに比較して高い電子移動度が得られる不純物である。

InSb単結晶薄膜に、ドナー不純物をドーピングするメリットは、InSb薄膜の電子移動度やシート抵抗の温度依存性を低減できることである。InSbが抱えている従来の課題である $-2\%/^\circ\text{C}$ のという大きな抵抗の温度依存性の低減を実現した。

InSb単結晶の成長中にSiやSn等のドナー不純物をドーピングすることにより、InSb薄膜の抵抗値(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できる。このことを明らかにするために、図5.16には、アンダーブとSiまたはSnをドーピングした厚さ $1.0\mu\text{m}$ のInSb薄膜の $50^\circ\text{C}$ と $100^\circ\text{C}$ のシート抵抗値の比と電子密度との関係を示した。SiやSnの抵抗値の比と電子密度の増大に対しては1に漸近的に近づき、抵抗の温度依存性が少なくなことを示している。同図より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よらず、ドーピングで生じた電子密度のみに依存し、電子密度の増

大

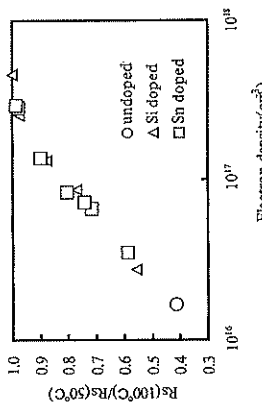


図 5.16 MBE法で製作したInSb単結晶薄膜の $50^\circ\text{C}$ と $100^\circ\text{C}$ のシート抵抗値の比と電子密度の関係

大とともに減少することを示している。

図 5.16 の結果は、すなわち室温で InSb のような真性半導体の抵抗値 (抵抗率) の温度依存性が、ドナー不純物のドーピングで自由に変えられることを示している。Si や Sn 等の不純物ドーピングは、InSb の電子密度を増加し、温度依存性を低減するための手段である。

図 5.17 で、アンドープ (室温の電子密度は  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) およびドーピングした薄膜では大きな温度依存性の違いが見られる。この大きな違いは、InSb 単結晶薄膜では、ドナーレベルから励起して生じた電子密度は低温で減少しない。一方、アンドープの状態では真性の電子密度は、価電子帯から伝導体へ励起した真性の電子が大部分を占めており、低温では減少してしまいう。このため、低温の電流輸送が両者で大きく違ってくることに よる。

次に、ドナー不純物のドーピングで電子移動度の温度依存性も大きく変わり、結果として温度依存性が一桁低減できることを示す。図 5.18 には、厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  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を示した。アンドープの InSb 薄膜は室温付近にピークをもつ導膜に特徴的な温度依存性を示している。Sn ドープ InSb 薄膜は、室温付近のピーク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、スモ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きわめて少なくなっている。また、この図 5.18 においても、InSb 単結晶薄膜は、アンドープとドーピングした薄膜を比較すると、ドーピングした InSb 単結晶薄膜は、不純物散乱の影響で電子移動度が若干低下するが、電子移動度  $30,000$

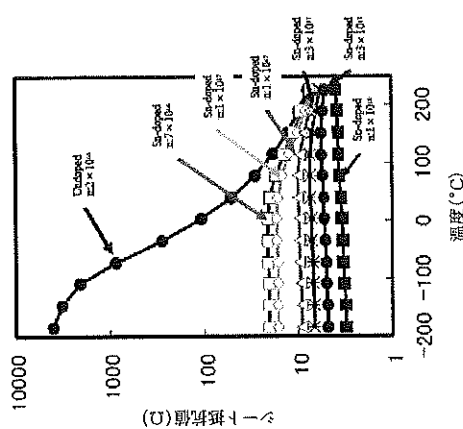


図 5.17 InSb 単結晶薄膜のシート抵抗値の温度依存性と電子密度の関係 (厚さ  $1.0 \mu\text{m}$ )

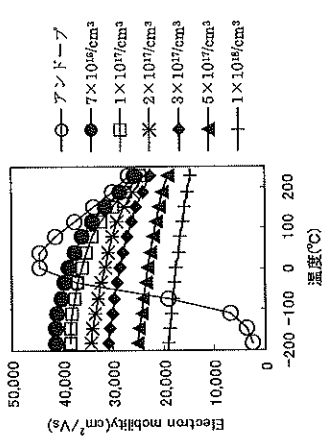


図 5.18 MBE 法で GaAs 基板上に製作した InSb 単結晶薄膜 (厚さ  $1.0 \mu\text{m}$ ) の電子移動度の温度依存性

$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  以上の大きな電子移動度を室温でもつことを示している。このように Si や Sn をドーピングした InSb 薄膜は、他の材料では実現できない大きな電子移動度を有し、大きなホール効果を示し、温度依存性がきわめて少ない、したがって、高感度のホール素子が製作できる魅力的な薄膜材料である。

Sn や Si のドーピングにより InSb 単結晶薄膜の温度依存性の低減がなぜ起こるの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。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な電子移動度である。このように、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た 2 層構造をしていると考えられ、ドーピングしない 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。しかるに、低温では、ヘテロ界面から離れた部位の結晶性のよい部位の電子の伝導帯への励起が減少し、駆動電圧の多い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れる電流が流れる。この結果、室温より低温の低いところでは大きな移動度を示し、低温で移動度の高くなる。一方、不純物をドーピングするとヘテロ界面から離れた部位の結晶性のよい部位を電流は常時流れることになり、電流流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。ここでは詳しく述べないので参考文献をあげておく<sup>35)</sup>。

#### (b) InSb 単結晶薄膜ホール素子の特性

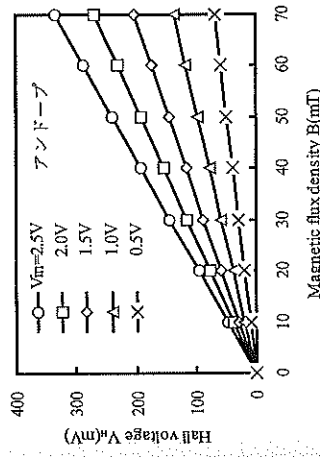
MBE 法で製作した InSb 単結晶薄膜を用い、製作したホール素子の特性を示す。ここでは、フォトリソグラフィを用いたホール素子のパターン製作工程や電極形成工程などを省き、ホール素子を作成した。図

## 5.2 ホール素子

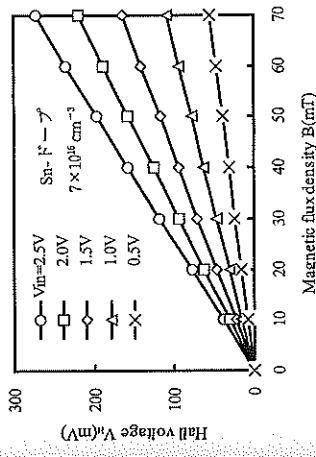
作した InSb 単結晶薄膜ホール素子の特性を次に示す。

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、すなわち、ホール電圧と磁束密度の関係 ( $V_H$ - $B$  特性) を図 5.19 に示す。図 (a) 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を示した。図 (b) には、Sn をドーピングした厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の電子密度  $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  の InSb 単結晶薄膜のホール素子の磁界特性を示した。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出力特性の低抵抗効果は、このより直線からずれる可能性があるが低抵抗効果は、これはきわめて小さく、InSb 単結晶薄膜のホール素子のホール電圧  $V_H$  との磁束密度の比例性がきわめてよい。また、図 (b) では、Sn のドーピングにより電子移動度が少し低下するので、アンドープに比較して磁界検出の感度は少し低下している。

次に、InSb 単結晶薄膜のホール素子の温度特性を示す。図 5.20 (a) は、厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の Sn ドープの



(a) MBE 法で GaAs 基板上に製作した厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  のアンドープ InSb 単結晶薄膜で製作したホール素子のホール電圧と磁束密度の関係 (定電圧駆動時の  $V_H$ - $B$  特性)



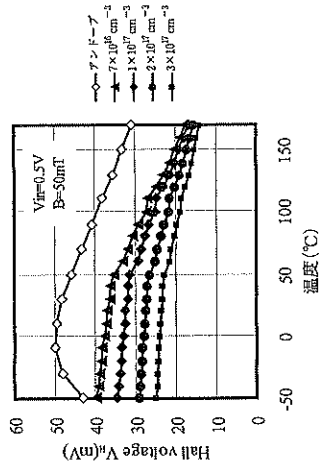
(b) MBE 法で GaAs 基板上に製作した厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の In ドープ InSb 単結晶薄膜で製作したホール素子のホール電圧と磁束密度の関係 (定電圧駆動時の  $V_H$ - $B$  特性)

図 5.19

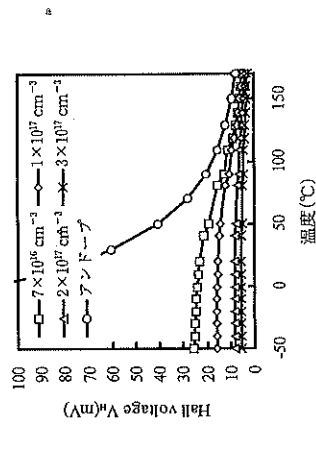
InSb 単結晶薄膜ホール素子の定電圧駆動時のホール電圧の温度依存性がドーピングによる電子密度変化に対応して変わる様子を示した。アンドープに比べてドーピングにより温度依存性が減少していることが理解される。

図 5.20 (b) 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圧駆動時のホール電圧 (Hall voltage) の温度依存性が Sn のドーピングによる電子密度変化に対応して大きく変わる様子を示した。定電圧駆動では、Sn ドープによる電子密度の増大に伴い温度依存性がドーピングに比較して大幅に減少している。

図 5.21 には、 $-50^\circ\text{C}$  で規格化 ( $-50^\circ\text{C}$  の抵抗値を  $1.0$  とした) InSb 単結晶薄膜ホール素子の入力抵抗値の温度依存性を測定したデータを示した。Sn のドーピングによる電子密度の増大に対応して抵抗の温度依存性は劇的に低減する。今まで、InSb ホール素子



(a) MBE 法で GaAs 基板上に製作した Sn のドーピングレベルを変えた、厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の InSb 単結晶薄膜で製作したホール素子のホール電圧の温度依存性 ( $0.5 \text{ V}$  定電圧駆動、磁束密度  $50 \text{ mT}$ )



(b) MBE 法で GaAs 基板上に製作した Sn のドーピングレベルを変えた、厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の InSb 単結晶薄膜で製作したホール素子のホール電圧の温度依存性 ( $0.5 \text{ mA}$  定電流駆動、磁束密度  $50 \text{ mT}$ )

図 5.20

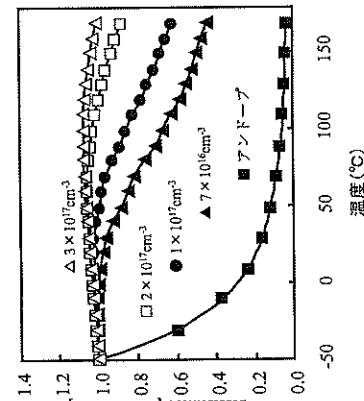


図 5.21  $-50^{\circ}\text{C}$  で観測した InSb 単結晶薄膜のホール素子の入力抵抗値の温度依存性を各電子密度に対してプロット

は $-2^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ で抵抗値が(温度の上昇とともに)低下して高温での駆動を難しくしているが、上述のように Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜をセンサ部に使うことで $100^{\circ}\text{C}$ を超える高温でも安定して使うことが可能となった。また、このような InSb ホール素子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、かつ、 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下の低温域や $100^{\circ}\text{C}$ を超える高温域での使用上の信頼性が大きく上がる。

表 5.10 には、Sn ドープの InSb 単結晶薄膜(電子密度 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )で製作したホール素子の特性を、アンドープ場合と比較して示した。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。

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かな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、この技術により、初めて広い温度範囲で駆動できる、温度依存性の少ない 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 というきわ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、従来の問題点を解決し、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。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きわめて少ない特徴がある。この特性は高精度の磁界計が必要となる各種の新規用途で有用である。

最後に、ドナー不純物として Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜で製作したホール素子の特性をまとめた。

- ① 高感度で磁界、特に超微弱磁界を検出できる。
- ② 低温域から高温まで、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も優れ、駆動できる温度範囲も広い。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く、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)がきわめて小さい。

この InSb 単結晶薄膜ホール素子のポテンシャルを示す応用例として、超微弱磁界の計測特性を調べた例を図 5.22 に示した。

図 5.22 は Sn をドーピングし、電子密度が $n=3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 厚さが $1.0 \mu\text{m}$ 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、超微弱磁界計の例である。図 5.22 より、ホール電圧は磁束密度のおよそ $1/30$ の $1 \mu\text{T}$ 以上で磁束密度に比例してあり、検出できる最小値は概ね $1 \mu\text{T}$ 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。この Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜ホール素子は、磁束密度の高感度検出、抵抗値やホール電圧の温度依存性が小さいという特性から、この素子を電流計測に応用すると、従来のホール素子ではできなかった $1 \mu\text{T}$ に対応する微小電流の検出が可能である<sup>33,34)</sup>。適当な、ソフトライトや純鉄などの強磁性材料の円形リング状のコアを使うと、コアを貫く $1 \text{mA}$ の電流は、コアにつくられた狭い空腔に

表 5.10 厚さ $1.0 \mu\text{m}$ の InSb 単結晶薄膜で製作したホール素子の特性と比較

| 項目            | アンドープ                      | Sn ドープ<br>( $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ) |
|---------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| ホール電圧 $V_H$   | 49 mV                      | 39 mV                                           |
| ホール電圧 $V_H$   | 59 mV                      | 21 mV                                           |
| オフセット電圧 $V_s$ | $\leq \pm 0.6 \text{V}$    | $\leq \pm 0.3 \text{V}$                         |
| 入力、出力抵抗値      | 130 $\Omega$               | 55 $\Omega$                                     |
| ホール電圧の温度係数    | $-0.19\%/^{\circ}\text{C}$ | $-0.11\%/^{\circ}\text{C}$                      |
| ホール電圧の温度係数    | $-1.9\%/^{\circ}\text{C}$  | $-0.33\%/^{\circ}\text{C}$                      |
| 入力、出力抵抗値の温度係数 | $-1.7\%/^{\circ}\text{C}$  | $0.22\%/^{\circ}\text{C}$                       |

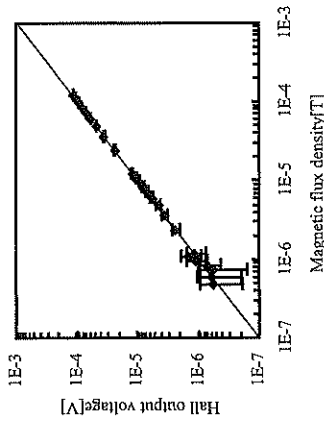


図 5.22 GaAs 基板上に成長した Sn ドープ InSb 単結晶薄膜(厚さ $1.0 \mu\text{m}$ 、電子密度 $n=3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )で製作したホール素子のホール電圧と磁束密度の関係(駆動電圧 $V_a=1.0 \text{V}$ の定電圧駆動)

およそ $1 \mu\text{T}$ の磁束密度を生じる。したがって、この空腔にホール素子を挿入し、これまでホール素子では難しかった $1 \text{mA}$ レベルの DC 電流検出がこのホール素子を使うことで可能である。ホール素子を駆動するとき、入力、出力を入れ替えてホール素子を駆動するスピニングカレント法を用いると、計測できる磁束密度は、さらに一桁小さい $0.1 \mu\text{T}$ まで計測できる。また、将来は、 $1 \text{nT}$ の磁束密度計測も期待される。

## 参考文献

- 1) E. H. Hall: Am. J. Math. 2, p. 287, 1879.
- 2) 片岡照栄: 磁電変換素子, 日刊工業新聞社, 1972.
- 3) H. Weiss: 磁電変換素子の構造と応用, 片岡照栄訳, コロナ社, 1974.
- 4) 柴崎一郎: 日化通年報, Vol. 41, No. 5, p. 12, 1988.
- 5) I. Shibasaki: Technical Digest of the 8th Sensor Symposium, p. 211, (IEE Japan) 1989.
- 6) 柴崎一郎: 電子材料, Vol. 37, No. 11, p. 108, 1998.
- 7) 柴崎一郎: 電気学会論文誌 E, Vol. 119-E, No. 8/9, p. 405, 1999.
- 8) G. L. Pearson: Review of Scientific Instruments, Vol. 19, p. 263, 1948.
- 9) K. G. Guenter: Z. Naturforsch., 13 a, p. 1081, 1958.
- 10) 池井波雄, 大下正秀: 電気学会雑誌, 80, p. 166, 1960.
- 11) 最先端のインテリジェントモーション, 技術調査会, p. 101, 1989.
- 12) 柴崎一郎: 応用物理, Vol. 67, p. 289, 1998.
- 13) I. Shibasaki, J. Crystal Growth, 175/176, p. 13-21, 1997.
- 14) 柴崎一郎, 榊野, 田近寛彦: 日本特許 P159818, 出版 July 13, 1982.
- 15) I. Shibasaki, Y. Kanayama, T. Ito, F. Ichimori, K. Nagase, T. Yoshida, K. Harada: Digest of Technical Papers, Transducers 1991, p. 1069, IEEE.
- 16) Ichimori, T. Yoshida, and K. Harada: Technical Digest of the 10th Sensor Symposium, 1991, p. 113, (IEE Japan).
- 17) I. Shibasaki, N. Kuze, K. Nagase, T. Iwabuchi: 日本特許 P 793440, 出版 July 16, 1992.
- 18) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, T. Iwabuchi, A. Ichii, M. Toyama, I. Shibasaki: Digest of Technical Papers

- (Late News), The 7th International Conf. on Sensors and Actuators: Transducers, '93, p. 32, 1993, (IEE, Tokyo, Japan)
- 19) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, A. Ichii, I. Shibasaki, K. Mori: Technical digest of the 12th Sensors Symposium, p. 209, 1994, (IEE, Tokyo, Japan)
  - 20) N. Kuze, K. Nagase, S. Muramatsu, S. Mya, T. Iwabuchi, A. Ichii, I. Shibasaki: J. Crystal Growth, 150, 1995, p. 1357
  - 21) I. Shibasaki: J. Crystal Growth, 175/176, p. 13-21, 1997.
  - 22) 柴崎一郎, 岡本敦, 吉田幸, 岡田一朗: 日本特許 P 916870, 出版 Aug. 6, 1999.
  - 23) 岡本敦, 柴崎一郎: 応用物理, Vol. 67, p. 193, 2000.
  - 24) H. Gaka, A. Okamoto, Satoshi Yamada, Hiromasa Goto, Kazuo Yoshida, and Ichiro Shibasaki: J. of Crystal Growth, 301-302, 2007.
  - 25) Ichiro Shibasaki, Hirota Ceka and Atsusi Okamoto: Proceedings of the 13th International Conference on Narrow Gap Semiconductors, Springer Proceedings in Physics 119, p. 89-92, 2007.
  - 26) T. Iwabuchi, T. Ito, M. Yamamoto, K. Sako, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Yoshida, F. Ichimori, I. Shibasaki: J. of Crystal Growth 150, p. 1302, 1995.
  - 27) Pavel Ripka: Editor, Magnetic sensors and Magnetometers, Artech House, p. 184, 2003.
  - 28) Atsusi Okamoto, Arata Ashihara, Takayuki Akaogi and Ichiro Shibasaki, Journal of Crystal Growth, Vol. 227/228, p. 619, 2001.
  - 29) 旭化成電子株式会社, ホール素子カタログ
  - 30) I. Shibasaki, A. Okamoto, A. Ashihara and K. Suzuki: Technical Digest of Sensor Symposium, p. 233, 2001.
  - 31) I. Shibasaki: Proceedings of the 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors, IPAP Conference Series, Vol. 2, p. 137, 2001.
  - 32) 柴崎一郎: InSb 単結晶薄膜の物理と磁気センサ応用, 電気学会論文誌 E, Vol. 123, No. 3, p. 691, 2003.
  - 33) I. Shibasaki, A. Okamoto, M. Takada, H. Goto and R. Uchiyama: 3 E 115, Proceedings of 12th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers 03, Boston, p. 1626, 2003.
  - 34) 柴崎一郎: Journal of Advanced Science, Vol. 17, No. 3 & 4, p. 225, 2005.
  - 35) I. Shibasaki, H. Geka and I. Shibasaki: Journal of Crystal Growth vol. 278, p. 604, 2005.

## 5.3 ホール IC

### 5.3.1 ホール IC とは

ホール IC は集積回路技術を利用した磁気センサである。古くから使われ、よく知られているものは、ホール素子の検出する磁束密度に比例したホール電圧を波形成型したデジタル信号に変換する増幅回路がホール素子に付加され、磁界の検出に対応した 2 値の電圧を出力する構成の素子である。一定の閾値以上の磁束密度の磁界の検出-非検出に対応した ON-OFF の 2 値出力が得られるもの(正または負の一方の磁界のみで動作)、もしくは、一定の閾値以上の正・負の磁束密度の磁界検出に対応した ON-OFF の 2 値出力、または、磁束密度の正・負に対応した、正・負の 2 電圧出力

が得られるものがあり、いずれもデジタル出力の磁気センサである。また動作磁束密度は、ON-OFF に対応して異なった閾値が設定されるので動作磁束密度に因って常にヒステリシスを有することも基本的な特徴である。ホールIC(HIC)はホール素子と増幅回路をSiの1チップ上に製作したモノリシック型が一般的によく知られている。古くから、バイポーラICのプロセスで製作されてきたが、近年は、CMOSプロセスも用いられるようになった<sup>1-3)</sup>。

ホールICは、その構成上から分類すると磁界検出のホール素子の違いにより2種類ある。従来から知られているホールICとして、集積回路の製作プロセスを利用して、Siのホール素子と増幅器をSiの基板上に集積化したモノリシック(Monolithic)ホールIC(MHIC)がある。もう一つは、例えば、InSb薄膜ホール素子など化合物半導体の薄膜のホール素子と集積回路プロセスで製作したSiCの増幅器チップを組み合わせて、1個のパッケージに収めた構造のもので、ハイブリッド(Hybrid)ホールIC(HHIC)と呼ばれている。いずれも現在使われており、ホール素子と同様、今や重要な磁気センサである<sup>2-6)</sup>。

ホールICは、出力電圧の形式から分類すると、磁界の検出、非検出に対応したON-OFF的なデジタル出力のホールICがある。このほかに、ホール素子が検出した磁界検出信号であるホール電圧をリアンアップで増幅し、検出した磁界に比例する増幅出力の得られるものがあり、リニアホールICと呼ばれる比較的最近開発されて使われ始めたものである。モノリシックリニアホールICとハイブリッドリニアホールICの二種ある。ホールICはホール素子を応用した磁気センサであるが、その機能はきわめて単純かつ基本的なものであり、ホール素子とは異なった機能の独立な磁気センサとして考えるのが自然である。

ホール素子と同じような構成で、ホール素子の信号を様々な形でSiのIC回路で増幅し、より機能的な、特定用途向けのセンサとして製作する素子も開発され使われている。一例は、DCプラシレスモータ駆動のホール素子内蔵のカスタム製作のICでホールドライバICがある。このような素子も広い意味では、混乱を避けるため除外した。ホールICまたはハイブリッドホールICとの呼称は、上述のきわめて一般的な汎用的なデジタル、またはリアンアップ出力の機能を有するものに限った。特定用途向けのものは、通常、用途名や対応する機能名を付けた呼称で呼ばれるからである。

### 5.3.2 デジタル出力型ホールIC (デジタル磁気センサ)

ホールIC(HIC)はホール素子と増幅回路をSiの1

チップ上に製作した磁気センサで、磁界の検出-非検出に対応したON、OFFの2値出力が得られるデジタル磁気センサである。図5.23には、オープンコレクタタイプの出力形式の最も一般的なホールICの基本的な回路構成を示した<sup>3-6)</sup>。この図中では、ホール素子は+で示されており、ホール電圧  $V_H$  をデジタル増幅する回路に接続されている。増幅後のホールICの出力は  $V_{out}$  で示されており、これがセンサ出力である。

図5.24にはホールICの動作特性を示した。動作磁束密度にヒステリシスを有し、センサ出力である電圧  $V_{out}$  は磁束密度が  $B_{op}$  以下では、ホールICの駆動電圧  $V_{cc}$  と同一電圧(High level =  $V_{cc}$ : OFF)である。磁束密度が増加して  $B_{op}$  を超えると  $V_{out}$  はゼロ電圧(Low level =  $G_{nd}$ : ON) = 磁界検出時の電圧アース電位となる。磁束密度が減少して  $B_{op}$  より小さい磁束密度ではHigh level(OFF) = 磁界非検出となり、 $B_{op}$  の差に対応するヒステリシスを有し、磁界の検出、非検出に対応した2信号が出力されるセンサである。ホールICの動作は、磁束密度の正-負(磁界の向きの変化)を検出して信号を発生するタイプもある。

ホールICの種類は磁界を検出するホール素子の種類によって2種類ある。

- ① Si集積化技術によるSiのホール素子とその信号を増幅するアンプを1チップ上に集積化し

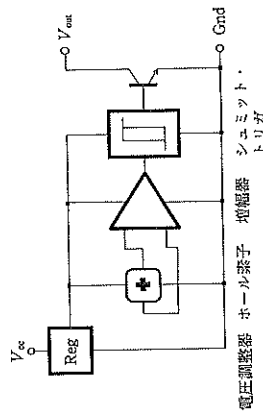


図 5.23 ホールICのコンセプトを示す回路構成図  
(+印は磁気センサであるホール素子を示す)

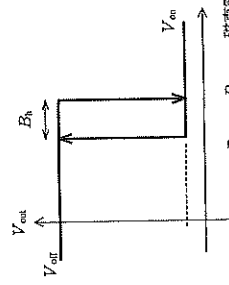
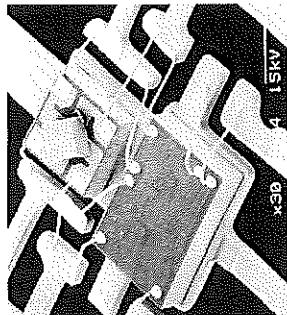


図 5.24 ホールICの動作特性例。  
 $B < B_{op}$  では出力電圧は  $V_{out} = V_{cc}$  level、 $B > B_{op}$  では  $V_{out} = G_{nd}$  level、 $B_h$  はヒステリシス

- ② 磁気センサ部を化合物半導体の薄膜ホール素子、たとえばInSb薄膜ホール素子とSiCパッケージに取付けたハイブリッドホールIC(HHIC)がある。

図5.25には、高感度InSb薄膜ホール素子を磁気



(a)

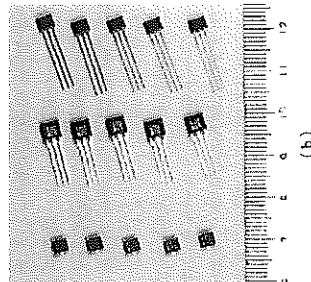


図 5.25 高感度InSb薄膜ホール素子とSiC増幅器を組み合わせたハイブリッドホールICの写真を示す。(a)金ワイヤー接続されたSiCアンプと高感度のInSbホール素子チップ (b)パッケージされたハイブリッドホールICの製品

センサ部に使い、SiC増幅器を組み合わせたハイブリッドホールICの写真を示した。図(a)にはSiCチップと高感度のInSbホール素子チップが金線で接続されている様子を、図(b)ではパッケージされた商品を示した<sup>3,5,9)</sup>。

表5.11には高感度InSb薄膜ホール素子を磁気センサとしたハイブリッドホールICとCMOSプロセスによるSiモノリシックホールICの特性例を示した。CMOSプロセスのホールICの場合は図5.23で出力形式が若干変わり、CMOS形式となる<sup>9)</sup>。

ホールICは、駆動電圧に大きな自由度がある。磁界の磁束密度が小さく閾値以下( $B < B_{op}$ )のOFFレベルでは、出力端子電圧、センサ出力は駆動電圧の電圧に等しい。閾値以上( $B > B_{op}$ )の磁束密度を検出したときのセンサ出力電圧、すなわち、ONレベル電圧は、通常は  $V_{cc}$  に比べて一桁小さい電圧が設定されている。

ハイブリッドホールICでは、最初はバイポーラプロセスで製作されたアンプが使われたが、消費電力の少ないCMOSアンプも可能である。また、CMOSモノリシックホールICでは、ホール素子は、駆動電力を少なくするため、周期50~100ms程度のパルス駆動方式が採られている。従来はCMOSプロセスによるホール素子は、オフセットが大きく実用上大きな問題であった。しかし、比較的最近、ホール素子の入力、出力を入れ替えて出力電圧を平均して出力することとでオフセット電圧をキャンセルするスピニングカレント法と呼ぶ技術が発明され、CMOSホール素子の大きなオフセットの問題が解消し、CMOSプロセスによるモノリシックホールICは、大きな性能上の進歩が実現した。現在市販されているCMOSホールICは、スピニングカレント法による、駆動、すなわち、ホール素子の入力、出力を入れ替えて出力電圧を平均して出力するダイナミックオフセットキャンセル駆動を採用している<sup>9)</sup>。CMOSホールICの利点は、複雑な回路処理が可能なことである。CMOSホールICの残る問題は、パルス駆動の周期やオフセット

表 5.11 高感度InSb薄膜ホール素子を磁気センサとしたホールICの特性例

| 磁気センサ                 | ハイブリッドホールIC        | SiモノリシックホールIC              |
|-----------------------|--------------------|----------------------------|
| InSb薄膜ホール素子           | InSb薄膜ホール素子        | Siモノリシックホール素子              |
| 駆動電圧 $V_{cc}$         | 4.5~24 V           | 1.6~5.5 V                  |
| On 磁束密度 $B_{op}$      | 3.2 mT             | 3.0 mT                     |
| Off 磁束密度 $B_{np}$     | 9.0 mT             | 2.2 mT                     |
| $V_{out}(B > B_{op})$ | $V_{out} < 0.2 V$  | $V_{out} < 0.4 V$          |
| $V_{out}(B < B_{op})$ | $V_{out} = V_{cc}$ | $V_{out} = V_{cc} - 0.4 V$ |
| 出力形式                  | オープンコレクタ           | CMOS形式                     |
| オフセットキャンセル            | なし                 | あり*                        |
| 動作温度範囲                | -20°C~+115°C       | -20°C~+115°C               |

\* ホール素子の入力、出力を入れ替えて出力電圧を平均して出力するスピニングカレント方式のダイナミックオフセットキャンセル駆動方式を採用している。

キャンセルに要する時間以下の高速の応答ができないことである。しかし、CMOS ホールICで難しい、高速の応答を求められる場合は、オフセットキャンセルをしないバイポーラプロセスによるホールICやハイブリッドホールICの出番である。

歴史的にはバイポーラプロセスのSiモノリシックホールICが最初に開発された。次いで、比較的最近になって、ホールICの高感度化や信頼性などの性能アップのためInSb等化合物半導体のホール素子を使うハイブリッド型のホールICが開発された。さらに、消費電力の少ないCMOSプロセスでも近年はホールICが製作されるようになり、今ではいわずもがなそれらの特徴をいかして使われている。用途は当初は各種の位置検出や非接触スイッチ用のセンサ、ハードディスク(HDD)ドライブのモータ等に使用されていた。DCブラシレスモータ分野はホール素子と組み合わせられることも多い。最近では、家電製品に使うパワーマータの省エネルギー駆動のために使われている。

ここでは、先に述べた「スピニングカレント法(オフセットキャンセル付ホール電圧増幅回路)」について簡単に理論の概要を述べる。

モノリシックホールIC(MHIC)の磁気センサであるSiのホール素子は、オフセット電圧が大きく、ホール電圧がきわめて小さいことが開発当初から問題であった。しかし、ホール素子の駆動電圧端子(入力)とホール電圧端子(出力)を入れ替えてホール電圧を測るとホール電圧は同符号であるが、オフセット電圧が逆符号になり、この2つの電圧を平均化処理するとオフセット電圧がキャンセルしてホール電圧のみが得られる。この電圧を増幅するとオフセット電圧のきわめて少ない増幅後の磁束密度に比例した電圧が得られる。この操作は、スピニングカレント法と呼ばれ、この増幅方式のホール電圧の増幅回路がCMOSプロセスのホールICで実用化している。この技術により、モノリシックホールICではオフセット電圧がホール電圧に対して大きいという問題点をほぼ解決し、高感度のホールICの製作が可能となった。最近の境界は、IC技術の設計や回路の動作速度にもよるが、ホール電圧回路の設計や回路の動作速度に10ms程度以下の早い磁束密度変化の検出は難しいことである。しかし、磁束変化が緩やかな非接触スイッチなどの応用についてはきわめて有用で、CMOSプロセスで製作されたモノリシックホールICの実用性を上げた。またこの方法は、ハイブリッドホールICの増幅回路にも適用できる。しかし、高感度の薄膜ホール素子を磁気センサに使うハイブリッドホールICは、ホール電圧に対するオフセット比率の小さい高感度のホール素子が磁気センサとして使えるので、スピニングカレント法を使わないでも、高感度で、高速の動作が可能なるホールIC製作が

可能である。この点は、ハイブリッドホールICのモノリシックホールICに対する有利な点である。

### 5.3.3 リニアホールIC

ホール電圧を、リニア増幅し、磁束密度に比例した増幅信号の得られるリニア出力のホールICも開発されている<sup>8)</sup>。磁気センサであるホール素子とSiICのリニアアンプを組み合わせたもので、Siホール素子を磁気センサに使うモノリシック型と高感度の化合物半導体薄膜のホール素子を磁気センサに使い、リニア増幅回路にSiのICを使うハイブリッド型がある。図5.26にリニアホールICのコンセプトを示す回路図を示した。

直線的に変化する位置の検出や回転検出、磁束密度の忠実な計測が必要とされる電流検出器への応用などが主な用途である。ホール素子を直接使うよりは使いやすい磁束密度に比例した電圧が得られるのが特徴であり、ホール素子の応用を拡大する技術となっており、モノリシックのリニアホールICは、オフセットキャンセルを必要としない、1msオーダーの高感度で境界が変化する用途には難しい。しかし、ハイブリッドリニアホールICの場合は、高感度で低オフセットのホール素子を磁気センサに使えるメリットがあり、過渡的な電流変化を忠実に検出できる電流センサ等に用いられる。

表5.12には、磁気センサにInAsDQWホール素子を使ったリニアハイブリッドホールICの特性を示した。また、図5.27は、InAsDQWホール素子を磁気センサとして使ったリニアホールICの写真を示した。図5.28には、InAsDQWホール素子を磁気センサとしたリニアホールICの動作特性例を示した。電源電圧 $V_{cc}=5.0V$ で駆動すると、出力端子電圧は、ゼロ境界では2.5Vであるが、磁束を加えると2.5Vを中心に、磁束密度の正、負に対応して増幅出力が磁束に比例して得られる。磁束密度との比例関係もきわめ

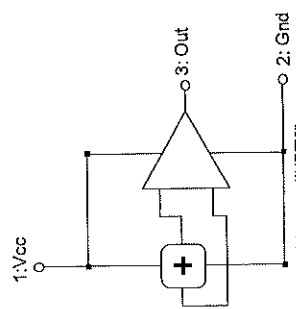
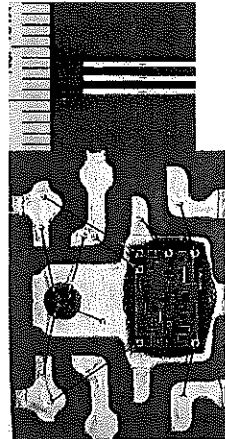


図 5.26 リニアホールICの回路構成図

### 5.4 半導体薄膜磁気抵抗素子

表 5.12 磁気センサにInAsDQWホール素子を使うリニアハイブリッドホールICの特性

| 項目            | 特性                     | 条件                               |
|---------------|------------------------|----------------------------------|
| 電源電圧 $V_{cc}$ | $5V \pm 0.25V$         |                                  |
| 出力電圧 $V_o$    | $2.5V \pm 1.56V$       | $B = \pm 25mT$ , $V_{cc}=5V$     |
| 無磁界出力 $V_o$   | $2.5V (1/2V_{cc})$     | $B=0mT$ , $V_{cc}=5V$            |
| 消費電流 $I_{cc}$ | 8mA                    | $V_{cc}=5V$                      |
| 出力電流 $I_o$    | Max. $\pm 1mA$         | DC                               |
| 動作温度          | $-30 \sim 100^\circ C$ | $V_{cc}=5V$                      |
| 感度温度係数        | $-0.08\%/^\circ C$     | $-20 \sim 80^\circ C$ , $B=25mT$ |
| オフセット電圧       | $-0.2mV/^\circ C$      | $-20 \sim 80^\circ C$ , $B=0mT$  |
| 温度変化          |                        |                                  |



(a) リニアホールICのチップ  
レイアウト  
(b) パッケージした  
リニアホール  
ICの製品

図 5.27 InAsDQWホール素子を磁気センサとして使ったリニアホールICの写真(化合物半導体薄膜)

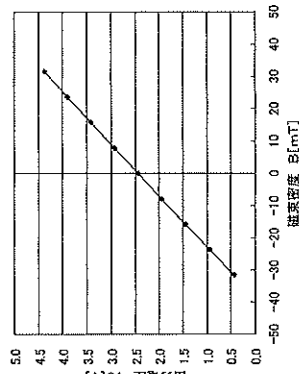


図 5.28 InAsDQWホール素子を磁気センサとしたリニアホールICの動作特性例

てよい。また、このリニアホールICはオフセットキャンセルをしていないので高周波磁界の検出にも優れ、過渡電流やパルス電流の高精度検出に使われる。

図5.29は、このリニアホールICを使った小型の電流検出器の特性を示した。また、図5.30には、このリニアホールICを使った小型の電流検出器の写真を示した。このような電流検出器の実際の応用例であるが、エヤコンや冷凍機などのモータの制御用インバータ等における電流検出に実際に使われている。

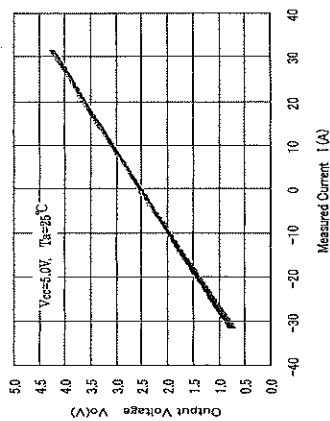


図 5.29 リニアホールICを使った小型の電流検出器の電流検出特性(化合物半導体薄膜)

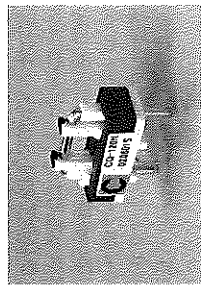


図 5.30 リニアホールICを磁気センサに使った電流検出器(磁気センサは化合物半導体薄膜)

### 参考文献

- 1) Pavel Ripka, Editor: *Magnetic sensors and Magnetometers*, Artech House, p. 201, 2001.
- 2) RS Popovic: *Hall Effect Devices*, Second Edition, Series in Sensors, Institute of Physics Publishing, 2003.
- 3) 地化エレクトロニクス株式会社, ホールICカタログ, 2007.
- 4) 石橋和敏, 田近 徳風, 杉山 岡田, 今井 実昭一郎: 電気学会東京支部, 沼津, 山梨支所合同研究会予稿集, p. 17, 1995.
- 5) K. Ishibashi, I. Okada and I. Shibasaki: *Technical Digest of the 18th Sensors Symposium* pp. 245, 2001.
- 6) K. Ishibashi, I. Okada and I. Shibasaki: *Sensors and Materials*, Vol. 14, No. 5 P. 253, 2002.
- 7) Bellekom, A. A., and P. J. A. Munter: *Sensors and Materials*, Vol. 5, p. 253-263, 1994.
- 8) K. Suzuki, K. Kuriyama, T. Takatsuka, Y. Shibata, M. Nakao, and I. Shibasaki: *Technical Digest of Sensor Symposium*, p. 167, 2003.
- 9) 栗山憲治, 牧野崇史, 梁澤尚也, 鈴木健治, 柴崎一郎: 電気学会研究会資料, TER-08-6, PHS-08-6, 2008.

### 5.4 半導体薄膜磁気抵抗素子

分子線エビタキシ(分子線エビタキシ(MBE)法によりGaAs基板上に製作したInSb単結晶薄膜は、電子移動度が大き

く、大きな磁気抵抗効果を示す。Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜は、抵抗値の温度依存性が小さく、温度依存性の少ない磁気抵抗効果を示し、実用上のメリットが大きい磁気抵抗素子が製作できる。本節では、このような磁気抵抗効果を利用した半導体薄膜の磁気抵抗素子(MR, または MR 素子)について最近の技術概説する<sup>1-8)</sup>。

### 5.4.1 磁気抵抗効果と磁気抵抗素子

磁気抵抗素子は抵抗値が磁界によって変化する現象を利用し、磁界を検出する素子である。本質的に2端子素子と半導体の電気抵抗が増加する現象が見られ磁気抵抗効果と呼ばれている。

磁気抵抗効果は、ホール効果と同じく、電流を運ぶ荷電粒子に及ぼすローレンツ力による効果であり、見かけ上電流の流路方向の抵抗変化として観測される。抵抗変化には、抵抗値の変化と抵抗率の変化がある。抵抗変化は、磁界の正、負によらず同じ大きさであり、 $B^2$  の関数で、それほど磁界の大きさが大きくなれば、 $B^2$  の関数で、磁束密度  $B$  の2乗に比例する。ホール効果とローレンツ力が原因で生じる効果であり、電子移動度の大きい材料では、磁気抵抗効果も大きい。電子移動度  $\mu_H$  と磁束密度  $B$  の積は、無次元量であり、これらの結果を考慮すると、磁気抵抗効果による抵抗変化量は、 $\mu_H \cdot B$  の関数であり、磁束密度の小さい低磁界では、 $\mu_H \cdot B$  の2乗に比例する<sup>9,7)</sup>。ところで、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効果がある。素子の抵抗値の磁界による変化は抵抗率の変化も含むが、素子の形状にも依存して変化率は違ってくる。工学的応用で重要なのはこの抵抗値の形状による変化である。磁気抵抗効果素子、または、磁気抵抗素子は、ホール素子と同じく磁界の検出ができるので非接触センサなどへの応用が可能である。図 5.31 には InSb 薄膜の磁気抵抗素子の基本的な構造を示した<sup>18)</sup>。

絶縁性の GaAs 基板上に形成された InSb 単結晶薄

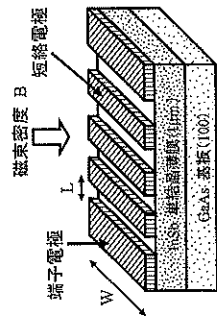


図 5.31 InSb 薄膜の磁気抵抗素子(MR)の基本的な構造

膜の両端に設置されている端子電極間の InSb 単結晶薄膜の表面にオーミック接合した短絡電極(ショートバー電極)を形成した構造である。磁気センサ部は短絡電極が形成されている面端2個の端子電極間である。磁気抵抗変化は、短絡電極の間端  $L$  と InSb 薄膜の幅  $W$  によって大きく変わる。一般に、磁気抵抗効果が  $W/L$  で大きく変わる現象は形状磁気抵抗効果と呼ばれ、磁界で抵抗率が変化する磁気抵抗率効果より大きく、磁気抵抗素子の抵抗変化の主要部を占める。このため、形状効果により磁気抵抗効果がより大きくなるために、磁気抵抗素子では短絡電極が形成される。

#### (1) 低磁界での磁気抵抗効果

(磁束密度の2乗に比例する抵抗変化)

磁気抵抗効果、すなわち、磁界がそれほど大きくないときの磁界による抵抗率の変化は半導体の電子移動度  $\mu_H$  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2乗  $(\mu_H \cdot B)^2$  に比例する。抵抗変化率  $\Delta R/R_0$  とすると、 $\Delta R/R_0 = (R_H - R_0)/R_0$  であり、 $R_0$  は磁界中の抵抗、 $R_H$  は磁界がないときの抵抗値である。そして、低磁界では、

$$\Delta R/R_0 \propto (\mu_H \cdot B)^2$$

である。

図 5.32 は、GaAs 基板上に成長した電子遷度  $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、電子移動度  $38,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、膜厚  $1 \mu\text{m}$  の Sn ドープ InSb 単結晶薄膜の磁気抵抗効果を実際に測った結果である。テストに使った磁気抵抗素子は、図 5.31 の構造で、設計寸法:  $W = 125 \mu\text{m}$ ,  $L = 24 \mu\text{m}$ ,  $L/W = 0.192$ 、短絡電極の長さ  $11 \mu\text{m}$ 、端子電極間の距離  $1249 \mu\text{m}$ 、ショートバー電極、端子電極は Ti/Au の2層を順次蒸着して製作した。このテスト素子は、磁束密度  $0.5 \text{ T}$  で磁気抵抗変化率  $(\Delta R/R_0)$  は約 260% であった。抵抗値の磁束密度による変化は、図 5.32 からわかるように、低磁界領域においては、 $\Delta R/R_0$  は  $B^2$  に、または  $(\mu_H \cdot B)^2$  に比例する。

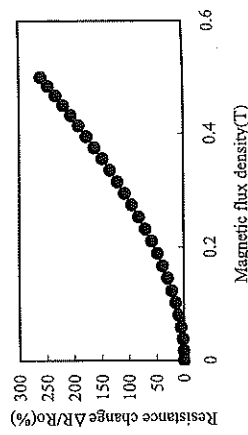


図 5.32 GaAs(100)基板上に形成された厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の InSb 単結晶薄膜の磁気抵抗効果

### 5.4 半導体薄膜磁気抵抗素子

#### (2) 高磁界での磁気抵抗効果

(磁束密度に比例する抵抗変化)

ところで、図 5.33 は、図 5.32 のグラフで高磁界領域  $(0.4 \sim 0.5 \text{ T})$  の磁気抵抗効果を拡大して示したものである。この領域においては、磁束密度の変化に対して抵抗値が比例的(線形)に変化している。このように、磁気抵抗素子に加える磁界の磁束密度  $B$ 、または、 $\mu_H \cdot B$  の値の大きいところでは磁気抵抗素子の抵抗  $R(B)$  ( $= R + \Delta R$ )、磁束密度  $B$  のときの抵抗値は、磁束密度の変化  $\Delta B$  ( $B \rightarrow B + \Delta B$ ) に比例して増加する。すなわち、

$$\Delta R/R \propto \mu_H \cdot \Delta B$$

の関係が成り立つ。

高磁界におけるこのような磁気抵抗効果を利用すると磁束密度の微小な変化をきわめて高精度検出でき、磁束密度の大きいパイアス磁界を、永久磁石等で磁気抵抗素子に、あらかじめ加えることで、高磁界における磁気抵抗効果を利用することが可能である。パイアス磁界下では、磁気抵抗素子の抵抗変化は磁束密度変化に比例し、微弱な磁束密度の変化を極めて高精度で検出できる。例えば、 $1 \mu\text{T}$  程度の磁束密度変化は容易に検出できる。

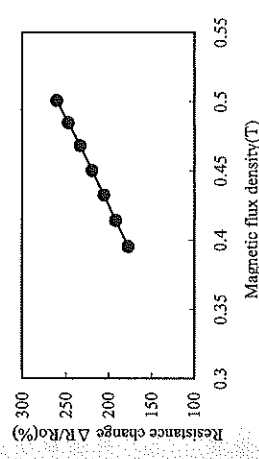


図 5.33 高磁界領域  $(0.4 \sim 0.5 \text{ T})$  の InSb 単結晶薄膜の磁気抵抗効果(テスト素子は図 5.32 と同じ、磁束密度の変化に対して線形に比例している)

#### (3) 磁気抵抗素子材料と磁気抵抗効果の温度依存性

磁気抵抗効果は、一般に、磁束密度の大きさによって変わるが、材料によっても大きな違いがある。ホール効果と同様に磁気抵抗効果は電子移動度の大きな化合物半導体で大きい。このため、電子移動度の大きい InSb 単結晶の薄膜や真空蒸着薄膜、GaAs 基板上に成膜した InSb の単結晶薄膜など、電子移動度の大きな材料が磁気抵抗素子として好適である。特に、電子移動度の大きい薄膜は、実用的な磁気抵抗素子製作する上で好適である。薄膜は、素子化するときの高精加工が容易なことや高抵抗素子が製作でき、境界検出時のセンサ出力を大きくとれる、消費電力が少ない等メリットがある。古くから磁気抵抗素子材料とし

て、バルクのアンドープ InSb の単結晶を専ら使われてきた。最近、MBE 法で製作される InSb の単結晶薄膜は、電子移動度も高く、シート抵抗値も大きく、通常の半導体素子と同じフォトリソグラフィによる素子製作プロセスが可能である等、今後の実用的な磁気抵抗素子を製作する上できわめて注目すべき重要材料である。また、特筆すべきは、Sn や Si などのドナー不純物のドーピングが容易にできるので、従来はできなかった素子抵抗値の温度依存性が従来比で、およそ一桁、きわめて小さい磁気抵抗素子が製作でき、このように材料を使うことで磁気抵抗素子の実用応用の拡大が期待できる。

図 5.34 は、Sn をドーピングした InSb 単結晶薄膜の温度依存性を、アンドープの場合と比較したものである。温度依存性がきわめて少ないことが、理解されよう。図 5.35 は、磁気抵抗効果の温度依存性を示した。磁気抵抗効果は、電子移動度の2乗に比例することから、電子移動度の2乗と同じ温度依存性を示す。したがって、図 5.18\* の電子移動度の温度依存性に対応した温度依存性である。図 5.35 は、InSb 単結晶薄膜の磁気抵抗効果の温度依存性を比較した実験データである。Sn をドーピングすることで温度依存性がアンドープより少ないことがわかる。また、低温では、Sn ド

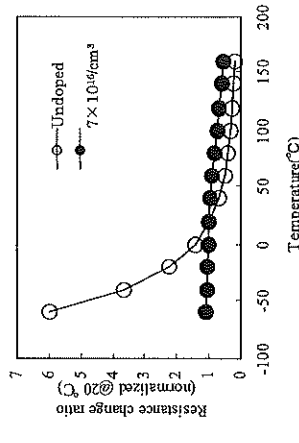


図 5.34 Sn ドープ及びアンドープ InSb 単結晶薄膜の抵抗値の温度変化の比較  $(20^\circ\text{C}$  での抵抗値を1として正規化してある)

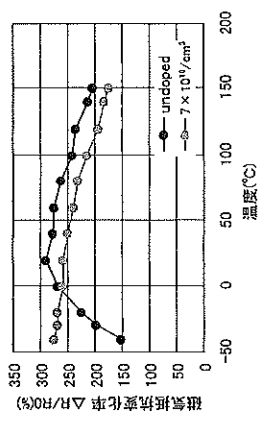


図 5.35 InSb 単結晶薄膜の磁気抵抗効果の温度依存性と Sn ドープ効果(実験)

一ピンングした素子の抵抗変化率が大い。これは、図5.18のアンドープInSb単結晶薄膜の電子移動度の温度変化を反映している<sup>9)</sup>。

## (4) 基礎免疫抵抗効果の薬の薬子形状依存性

一般に、抵抗変化高は素子形状に大きく依存する。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。

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通ふ電子が半導体内を斜め行走し、結果として電子の行走距離が長くなり抵抗の増加を生じる効果である( $\tan \theta = \mu_H B$  で決まる  $\theta$  はホール角で、磁界がないときに電子が走る方向に対して電子が斜めに走る角度の目安で、 $\mu_H B$  が大きいほど  $\theta$  は大きく、 $I/W$  が小さいほどこの効果が有効に生かされる)。実用には磁気抵抗素子の設計で重要と思われるので、図 5.36 に、厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の  $\text{InSb}$  単結晶薄板で測定した磁気抵抗効果における形状効果、すなわち、 $I/W$  と磁気抵抗率化率の関係を示した。

この  $L/W$  の違いによる形状磁気抵抗効果は、工学的応用上きわめて重要な現象である。一方、形状に左右されない磁気抵抗効果は物性的な原因で生じる。形状磁気抵抗効果に比較して  $\text{InSb}$  など化合物半導体薄膜磁気抵抗効果では前者の寄与は磁気抵抗効果では小さい。筆野の巻子では前者の寄与は磁気抵抗効果では小さい。

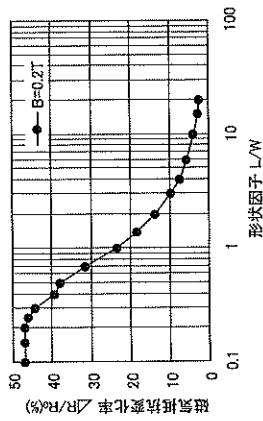


図 5.36 磁気抵抗効果の形状 ( $L/W$ ) 依存性:  $L/W$  と抵抗変化率の關係 ( $B=0.2\text{ T}$ )

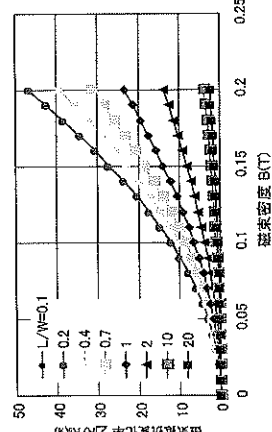


図 5.37 磁気抵抗効果の形状 ( $L/W$ ) 依存性: 磁束密度と抵抗変化率の関係

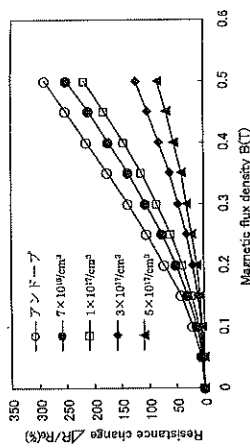


図 5.38 電子密度の違う InSb 単結晶薄膜の磁気抵抗効果(膜厚 1.0  $\mu\text{m}$ ,  $L/W=2.6$ )

果の抵抗変化として加算されて現れ、区別できない。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、図 5.31 に示すように磁気抵抗素子には筒状に形成されたショットバー電極を形成する。 $L/W$  をかえり、図 5.32 に示すような磁気抵抗効果の例を図 5.37 に示した。実用的な磁気抵抗素子では、大きな形状効果を利用するたために、 $L/W$  を小さく設計する。このショットバー電極は、磁気抵抗素子チップの大きな、 $\text{InSb}$  薄膜の厚さを、電極の形成精度、 $\text{InSb}$  薄膜の厚さなどで若干の制約も生じる。通常は、 $L/W$  値は、0.2 程度で設計される。図 5.38 には、電子密度の違う  $\text{InSb}$  単結晶薄膜の室温における磁気抵抗効果(膜厚  $1.0\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L/W = 0.2, 2.6$ )を示した。 $L/W$  の値が一定なので、抵抗変化率の違いは、電子移動度が電子密度によって異なることによる。当然であるが、アンドープの  $\text{InSb}$  単結晶薄膜の磁気抵抗効果率が室温では最も大きい。

## (5) 朝鮮の半島に戦艦を駐在せしむ。

磁気抵抗素子は、実際の応用では、後に述べる回路板出用のセンサが実用化されている。単体で使われることもあるが、多くの場合、磁気抵抗素子はセンサ出力を電圧で取り出すため、複数の素子で抵抗ブリッジを組んで使われる。この場合は、1チップ上に2個、または、4個の磁気抵抗素子が製作され、チップ上で測定される。図5.39(a)は、4個の磁気抵抗素子で抵抗ブリッジを組んで用いられる。

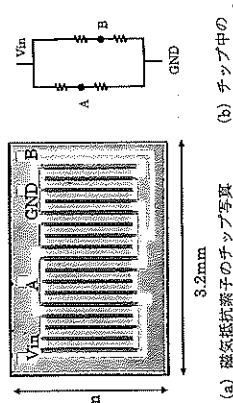


図 5.39 実際の InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子のチップ写真(a)および4個の磁気抵抗素子がブリッジ接続されている磁気抵抗素子回路図(b)

素子(MR)が、同図(b)のように、4端子のブリッジ構成で製作された、回転検出用に製作された例である<sup>10)</sup>。

(6) 動作磁束密度

(実用磁気抵抗素子の動作磁束密度, 最適動作磁束密度, バイアス磁界の設定)

磁気抵抗素子は、抵抗変化が  $\mu_{Hr}$ 、 $B$  の 2 乗に比例するため、磁界の小さいところでは磁気感度が小さい。一方、高磁界では、抵抗変化は  $\mu_{Hr}$ 、 $B$  に比例し、 $B$  の変化に対する抵抗変化(磁気感度)が大きいく。このため、磁気抵抗素子を実際に応用する場合は、磁気抵抗素子にあらかじめ永久磁石などでバイアス磁界を加えて磁界の変化に対して比例的に抵抗変化が生じる高磁束密度の点に動作点を設定する場合が多い。このように、磁気抵抗素子の動作点をバイアス磁界の印加によって高磁束密度で設定すると、磁束密度の変化に対して  $\mu T$  レベルの磁気感度が得られ、きわめて弱い磁界の検出も可能になる。通常は、図 5.32 からわかるように、バイアス磁界は、应用する場合の条件によるが、0.2~0.5 T 程度の範囲で設定されることが多い。永久磁石を用いるのが簡便である。これも応用上の条件からの選択によればよい。次に述べる、磁気抵抗素子の回転検出応用では、バイアス磁界を MR に加える磁石(バイアスマグネット)は希土類系の永久磁石が使われている。

### 5.4.2 InSh 单結晶蕙膜磁気抵抗素子の応用

磁気抵抗素子は、本質的には2端子素子である。ホール素子と同様磁気センサーであるが、一点での磁界を検出するホール素子とは違い、素子の端子間との場所に加わる磁界の影響も等しく加算されて(積分されて)端子間の抵抗変化として現れる。ホール素子に点磁界の検出素子とすれば、磁気抵抗素子は端子間に形成されている境界線(境界線)に広がった各点の磁界による磁気抵抗変化を加算、または、積分して取り出す磁気センサーである。積分型の磁気センサーといってもよい。このような、磁気抵抗素子は、実用的な応用も多様である。このことは、つまり、使い方によって素子の形状や構成が異なることを意味する。ここでは、回転検出の応用を例にして多様な磁気抵抗素子の使い方を例示する。

(1) 丑寅國の長子孫氏

磁気抵抗素子は、非接触型デテンシオ、非接触の位置検出、回転検出、紙巻の磁気インクによる印刷パターンを検出など多くの応用がこれまでに開発されてきた。図5.40は、プリッジ巻線された2個の磁気抵抗素子とパイアス磁界を加える永久磁石からなる組み合わせとパイアス磁界を加える永久磁石からなる組み合わせ

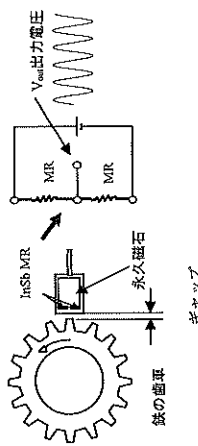


図 5.40 永久磁石を背面に設置した InSb 磁気抵抗素子 (MR) プリッジにより、鉄磁層の回転後交換 (回転) 軸に依らず、ギヤの凹凸の凹内に対応して変化する磁葉密度を、磁気抵抗素子のプリッジにより検出し、正振幅として取り出し、回転角を高精度で検出する)

のモジュールによって回転を検出する例である。回転する軸に取り付けられた鉄歯車とパイパス磁石の間に生じる磁束密度変化を磁気抵抗素子のブリッジにより正誤差の電圧出力として取り出し、歯車を取り付けられた軸の回転角や角速度を高精度で検出する磁気抵抗素子による回転角検出の構成例である。この図はハーブリーッジの例であるが、もちろん、4個のMR素子でフルブリッジを組んで回転センサが構成される場合もある。最も簡単な例は、2個のMRでブリッジを組んだ回転センサで、1チップ上に2個のMR素子パターンが歯車の山と谷に対応した2ビットで配置された磁気抵抗素子を使い、3結合、個別チップとして製作されたMR素子が配置されて歯車の歯の山と谷に対応した2ビットで回転されて回転センサを構成する方法<sup>10)</sup>がある。

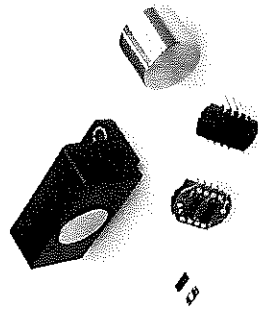


図 5.41 歯車の回脈検出用の樹脂モールド磁気抵抗素子(左下の小型パッケージ素子)とこの素子を2個組み合わせて製作された回脈センサの写真

子のバイアス磁石と歯車との間隔に依存する。また、このように、磁界がバイアスされた領域では、磁気抵抗素子の出力信号は正確に磁束密度変化に比例し、磁気抵抗素子の出力信号の波形は歪みの少ない正弦波が得られる。

回転センサの出力信号電圧は、歯車の先端と磁気抵抗素子の感面との距離(ギャップ)に大きく依存する。図5.43は、厚さ1.0 $\mu\text{m}$ 、SnドープInSb単結晶薄膜磁気抵抗素子の回転センサのセンサ出力のギャップ依存性を示した。Gap=0.65 mmで、500 mV以上の大きな出力信号の振幅が得られていることがわかる。ここで言う出力信号の振幅(amplitude)は、正弦波形状の出力信号の最大と最小の差である。

磁気抵抗素子は磁束密度検出型の磁気センサであり、センサ出力が回転速度に比例しないことを示す。図5.44はSnをドープした、厚さ1.0 $\mu\text{m}$ のInSb単結晶薄膜磁気抵抗素子を磁気センサ部として使った回転センサの回転速度検出特性である。横軸の周波数は、回転する歯車の歯の山、谷に対応して得られる正弦波の周波数で、回転速度に比例した量である。縦軸は、回転センサから得られる出力電圧の振幅である。磁気抵抗素子の感面とは、磁気抵抗素子のパッケージン面ではなく、InSb単結晶薄膜面である。このテスト歯車では、(周波数)[Hz]=64 $\times$ (回転数)[rpm]/60である。結果は、4 Hz $\sim$ 6.1 kHzと極低速から高

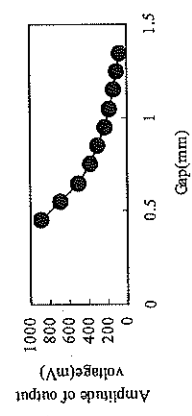


図 5.43 厚さ1.0 $\mu\text{m}$ 、SnドープInSb単結晶薄膜の磁気抵抗素子の回転センサのギャップ特性 (MR素子面と歯車の歯頂との間隔、歯車は $m=0.8$ のJIS規格品)

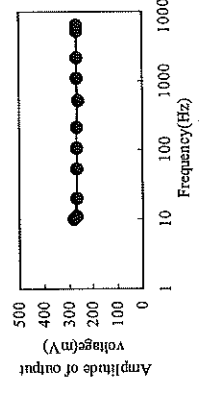


図 5.44 厚さ1.0 $\mu\text{m}$ 、SnドープInSb単結晶薄膜の磁気抵抗素子を磁気センサ部として使った回転センサの回転速度検出特性(回転速度は、歯車の歯の山谷に対応する出力電圧の正弦波の周波数として表示。周波数は回転速度に比例する。測定に用いた歯車は、歯の基本周長 $p=mr$ 、 $m=0.8$ のJIS規格品)

速まで出力電圧振幅は一定である。歯車を駆動するモータの回転数の制限で、周波数6.1 kHzに対応した周波数)まで安定して回転の検出が可能である。この領域まで安定して回転の検出が可能である。この例から、InSb単結晶薄膜のMRを使う回転センサでは、回転速度にまったく依存しない出力電圧の振幅が得られることがわかる。

図5.45は、この磁気抵抗素子の回転センサの出力電圧の振幅の温度依存性である。出力電圧の振幅の温度変化が広い範囲で小さい(ほとんど変化しない)特徴が見える。また、図5.46には、動作時のオフセット電圧である出力電圧のDC成分(出力電圧振幅の平均値で等点または動的オフセットに相当)の温度依存性を示す。-20 $\sim$ 140 $^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、出力信号の振幅およびDC成分ともほとんど変化しないことがわかる。温度変化は+0.02 mV/ $^{\circ}\text{C}$ である。

このようにSnをドープしたInSb単結晶薄膜の磁気抵抗素子は、従来の素子では予想できない安定した素子である。特に、温度ドリフトのきわめて少ないことと出力信号の温度依存性がきわめて少なく、従来のアンドープのInSb単結晶を使った磁気抵抗素子では実現できなかった特性である。これらの測定結果は、超高精度の角速度制御に使われる磁気エンコーダや回転センサ等の動力制御に関わる応用にきわめて有利な

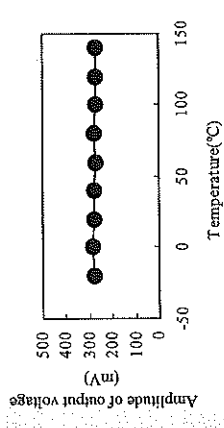


図 5.45 厚さ1.0 $\mu\text{m}$ 、SnドープInSb単結晶薄膜の磁気抵抗素子回転センサの出力電圧の温度依存性(歯車は $m=0.8$ のJIS規格品、ギャップ0.65 mm)

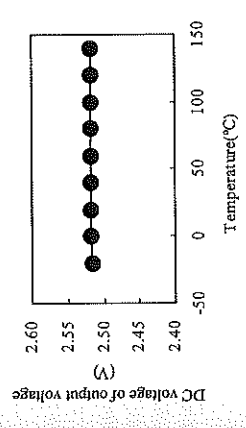


図 5.46 SnドープInSb磁気抵抗素子の出力電圧のDC成分(MR素子の出力端子の無磁界時の電圧=オフセット電圧)の温度依存性

特性である。

### 5.4.3 磁気抵抗素子による微弱磁界検出応用

磁気抵抗素子は1 $\mu\text{T}$ レベルの磁束密度検出も可能である。積分型の磁気センサの特徴が最もよく現れる例として、磁気インクにより印刷したパターンを検出がある。これまでは、バルク単結晶の磁気抵抗素子が使われてきたが、薄膜のInSb磁気抵抗素子もまた安定して磁気インクの印刷パターンを検出できる。図5.47は、希土類磁石でバイアス磁界を加えた厚さ1.0 $\mu\text{m}$ のSnドープのInSb単結晶薄膜磁気抵抗素子により、磁気インクで印刷した2種のテストパターンをスキャンして計測した例である。センサ信号は10,000倍増幅して表示してある。振幅に対応する磁束密度は、1.5 mmピッチのパターンで10 $\mu\text{T}$ である。ちなみに、地磁気は30 $\mu\text{T}$ の大きさである。Snドープの

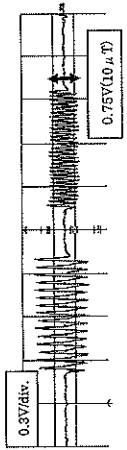
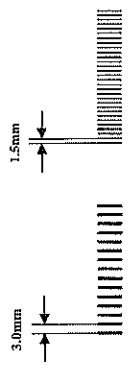


図 5.47 磁気インクにより印刷した2種のパターンをSnドープInSb単結晶薄膜の磁気抵抗素子による検出

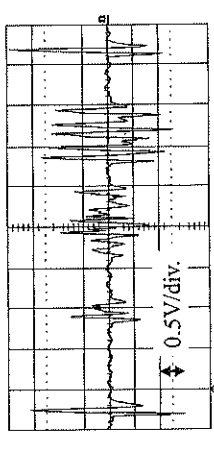
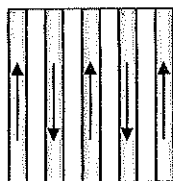


図 5.48 紙幣の磁気パターンをSnドープInSb単結晶薄膜磁気抵抗素子で検出した信号例



多層膜 GMR  
図 5.52 多層膜 GMR と SV-GMR  
スピンバルブ GMR  
反強磁性膜

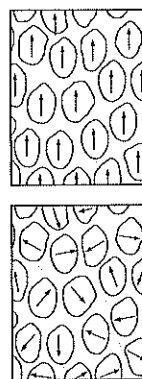
相対角度である。

磁性膜の磁化を交互に反平行になるように積層したものを一般的に多層膜 GMR と称する。一方の強磁性層のうち、一方の内部磁化を反強磁性膜で固定(ピン止め)した構造も提案されている。これをスピンバルブ GMR (SV-GMR) と呼んでいる(図 5.52)<sup>19)</sup>。

#### (4) その他の GMR

人工格子以外にも GMR となる材料がいくつかある。その代表的なものはグラニューラー GMR である<sup>20)</sup>。グラニューラー膜は、非強磁性体(多くは Ag, Cu, Au)などの貴金属およびその合金の中に Co, CoFe などの強磁性体粒子が分散した構造をもつ(図 5.53)。

分散磁性体粒子は、ゼロ境界で磁化方向は、ランダムである。しかし、外部磁界の印加により磁化が平行にそろうので抵抗が減少すると考えられている<sup>21,22)</sup>。



外部磁界 0  
外部磁界印加  
図 5.53 グラニューラー膜構造と外部磁界印加による磁化の変化

### 5.5.2 人口格子 GMR 磁気センサ

現在、GMR センサとして実用化が進められているのは、主に多層膜 GMR およびスピンバルブ GMR である。以下、この 2 つについて述べる。

#### (1) 多層膜 GMR センサ

多層膜 GMR は強磁性層と非強磁性層を交互に積層し、非強磁性層をゼロ磁界で反平行になるように設定したものである。強磁性膜には、Co, Fe, Ni およびその合金が、また、非強磁性層には Cu, Al, Ag などの貴金属とその合金が用いられる。Ni

### 5.5.1 GMR (巨大磁気抵抗効果)

#### (1) 強磁性人工格子多層膜内の磁化変化

強磁性とは格子間レベルで原子のスピンをそろえようとする交換力である。したがって、強磁性層を格子レベルで近接させると磁性層の交換力が作用する。

2 つの強磁性体間に働く交換結合磁界  $H_{ex}$  は、距離により強磁性的スピンバイラル回転しながら変化する(図 5.50)。GMR はこの強磁性の性質を利用して新しい特性をもつ多層膜を開発しようとする試みから生まれた<sup>23-25)</sup>。

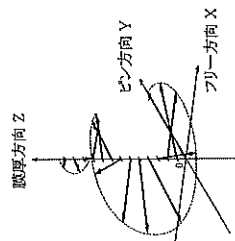


図 5.50 強磁性層間の交換結合磁界の作用

#### (2) 磁性多層膜の磁化方向と抵抗変化

導電性の高い非強磁性中間層を磁性層ではさんだ人工格子膜において、中間層を通過する伝導電子は磁性層表面で磁化スピンによる散乱を受ける(図 5.51)。上下の磁性膜の磁化が平行 (spin-up) のときは伝導電子の散乱は小さく、磁性膜の磁化が反平行 (Spin-down) のときは大きくなる。この散乱の差による伝導電子の易動度の違いは抵抗値の変化として表れる<sup>26)</sup>。

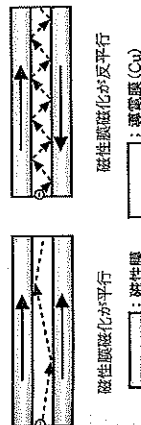


図 5.51 人工格子磁性膜の基本構成

#### (3) 人工格子 GMR

人工格子の強磁性層間に層間交換結合 (IEC: Inter-layer Exchange Coupling) が働くとき、強磁性体の磁化には内部磁界  $H_m$  が作用する<sup>27)</sup>。人工格子磁性膜の抵抗値は、 $H_m$  と外部磁界  $H_t$  のなす角  $\theta$  に依存し、次式で表される。

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{MR}{2} \cos \theta \right) \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ : 抵抗値、 $\rho_0$ : ゼロ境界の抵抗値、MR: MR 比(磁気抵抗変化率)、 $\theta$ : 中間層をはさむ磁化の

## 5.5 GMR (巨大磁気抵抗効果) 磁気センサ

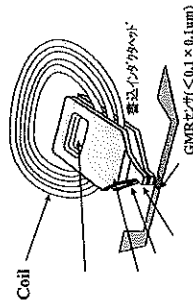
磁気記録の分野では、記録密度向上のためのセンサ材料として低モジュールで抵抗変化率の大きな材料が求められていた。

1988 年、Fe/Cr 多層膜にて GMR (巨大磁気抵抗効果) が発見されると、ハードディスクドライブ用高性能磁気再生素子として、従来の AMR 膜に代わる材料として注目された<sup>28-30)</sup>。1994 年には、高磁気記録密度薄膜磁気ヘッド用としてスピンバルブ型巨大磁気抵抗が考案された<sup>31)</sup>。そして、早くも 1995 年には、ハードディスクドライブ用スピンバルブ GMR ヘッドが開発された<sup>32)</sup>。

実際の薄膜磁気ヘッドへの GMR センサ搭載例を図 5.49 に示す。GMR の素子寸法は 0.1  $\mu\text{m}$  以下まで微細化され、GMR 膜の磁気抵抗も向上したことから、ハードディスクドライブの記録密度は 250 Gbit/inch<sup>2</sup> を超えた。2006 年には年間 10 億個以上の GMR センサが使用され、今後とも増大すると予想されている。近年、磁気記録での商業的成功により GMR 素子の原理と特性に関心が高まり、これを利用した磁気センサが開発されるようになってきた。ここでは、GMR 磁気センサとしてよく用いられるようになった多層膜 GMR とスピンバルブ GMR の特性について、その原理から応用例までについて述べる。



(a) 薄膜ヘッド SEM 写真



(b) GMR の薄膜ヘッドへの応用

InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子は、このような微弱な磁束密度であっても安定して検出できる。

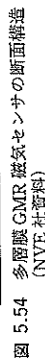
また、図 5.48 は、紙幣の磁気パターンを検出した例で、磁気抵抗素子の微弱な磁束密度検出の大きな可能性を示す例である。このように、薄膜の Sn ドープ InSb 薄膜磁気抵抗素子は微弱磁界の検出でも有効である。特に、Sn ドープによって抵抗の温度依存性が低減されたことで、温度変化の影響を受けない測定ができる。

### 5.4.4 まとめ

Sn ドープ InSb 単結晶薄膜は分子線エビタキシー法で製作される。この薄膜の磁気抵抗効果を利用し、最近開発された磁気抵抗素子の基礎的な特性とこの磁気抵抗素子を応用する回転センサについて述べた。薄膜の磁気抵抗素子は、量産性、高精度の磁界検出が温度によらずにできる。この特徴は、回転検出の例について本書で紹介したが、微弱磁界の検出を必要とする磁気インクによる印刷パターンの非接触検出、非接触ポテンシオ、微小なリニア位置の変化の検出への応用などこれらまであり普及しなかった磁気センサ応用もこれからは可能である。高精度で磁束密度を検出できる特性は、微弱な磁性微粒子の検出、高精度の磁気エンコーディングなど多くの新たな応用の開発も期待できる。

### 参考文献

- 1) 柴崎一郎: InSb 単結晶薄膜の物性と磁気センサ応用、電気学会論文誌 E, Vol. 123, NO. 3, p. 69, 2003
- 2) A. Okamoto, A. Ashihara, and I. Shibasaki: Proceedings of 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Sendai, p. 514, 1999.
- 3) Atsushi Okamoto, Takashi Yoshida, Shogo Muramatsu, Ichiro Shibasaki: Journal of crystal growth, Vol. 201/202, p. 765, 1999.
- 4) Atsushi Okamoto, Arata Ashihara, Takayuki Akaogi and Ichiro Shibasaki: Journal of Crystal Growth, Vol. 227/228, p. 619, 2001.
- 5) A. Okamoto, A. Ashihara K. Nishimura, H. Goto, K. Saotome, and I. Shibasaki: Technical Digest of Sensor Symposium, p. 239, 2001.
- 6) 片岡康夫: 磁電変換素子、日工工業新聞社, 1972.
- 7) H. Weiss: 磁電変換素子の構造と応用、片岡昭康、コロナ社, 1974.
- 8) 岡本敬、柴崎一郎: 応用物理, 67, p. 193, 2000.
- 9) K. Nishimura, H. Goto, H. Geka, A. Okamoto, I. Shibasaki: Proceedings of the 20th Sensors Symposium 2003, pp. 161, Proceedings of the 20th Sensor Symposium, p. 161, 2003.
- 10) 柴崎一郎、西村和浩、後藤広将、岡本敬: 電気学会論文誌 E, No. 8, 2006.
- 11) A. Okamoto, K. Nishimura, H. Goto, K. Yoshida and I. Shibasaki: IEEE Trans. SM, Vol. 127, No. 8, p. 371, 2007.


$$\cos \theta = \frac{H_f^2 - H_n^2}{H_f^2 + H_n^2} \quad (2)$$

磁界感度は、外部磁界の変化  $\Delta H_e$  による  $\cos \theta$  の変化  $\Delta \cos \theta$  で表わされる。

$$\frac{d \cos \theta}{dH_i} = \frac{4H_i \cdot H_{in}^2}{H_i^2 + H_{in}^2} \quad (3)$$

強磁性膜の保磁力  $H_0$ 、異方性磁界  $H_u$  などの実効磁界が作用するときは、 $H_0 = H_1 + H_2 + H_u$  で置き換える。式(3)から  $H_2 + H_u$  が大きくなると、外部磁界  $H_0$  ( $H_1 = 0$  から  $H_1 = \infty$ ) による  $\cos \theta$  の変化幅が小さくなる (MR が小さくなる)。このとき、 $H_m$  が大きくなる (MR が小さくなる)。しかし、飽和磁界も大きくなる。実際の磁気センサでは、強磁性膜の保磁力  $H_0$ 、異方性磁界  $H_u$  等の実効磁化が大きいと MR 比、感度とともに低下するので軟磁気特性を改善する必要がある。磁界検知用に用いられている多層膜 GMR センサの膜構成の一例を図 5.54 に示す<sup>10)</sup>。超格子膜では結晶配向が重要であり、 $\text{SiAlN}$  等の下地配向膜を作成してから、多層膜 GMR を形成する。強磁性層は、 $\text{NiFeCo}$  を  $\text{CoFe}$  で置きこんだ構造になっている。NiFeCo は NiFe に比べて一軸異方性磁界  $H_u$  が小さく、MR 比の低下を防ぐ。

Ta保護膜を含め、3層多層GMRでは、350 Å程度の層厚になっている。多層間GMRは、層数が多く、反平行を高々数Åの膜厚で制御するため、実用上は製造上の課題が多い<sup>16,17)</sup>。

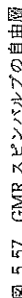
(2) スピンバルブGMR磁気センサ

スピントラル GMR は片面の強磁性膜が反強磁性体でピン止めされている。これを固着層 (ピン層: PML) と呼ぶ (図 5.5f)。反強磁性とは、磁化が逆向きで対になっている磁性膜であり、反強磁性体の一方の磁化が強磁性体の磁化と結合してピン止めする。

素子の小型化とともに素子端での交換結合磁界の一



図 5.56 シンセチック SV-GMR の固着層



様性を改善するために積層フェリ磁性交換膜を用いた固着磁種成が考案された<sup>18)</sup>。

これをセンセチック型スピントラルGMRと呼ぶ(図5.56)。積層フェリ磁性交差中間膜にはRuがよく用いられる。固着層の強磁性膜には中間膜のCuと拡散しにくい、Co、あるいは、CoFeなどの合金膜が用いられる。

スピンバルブGMRでは(図5.57), 固着膜と対をなす強磁性体膜は外部磁界で容易にスピン方向の向きが変えられるので、自由層(フリー層:FML)と呼ばれる。

スピンバルブGMRの磁気特性は異方性であり、AMRと同様に磁界回転が検出できる。磁界スピンバルブGMRの自由層にはピン方向と直角に一軸異方性を付与し、軟磁気特性を改善して使用する。

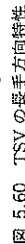
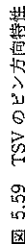
(3) 直変化スピンバルブ(TSV)

一般に、スピントラル GMR の自由層は、ピン方向と直角の長手方向へ一軸異方性を与える。これを直交化スピントラル (TSV; Transverse Spin Valve) と呼んでいる (図 5.58)<sup>19)</sup>。

直交化スピニングバルブでは、製膜後、ビン方向に強い磁界を加えて反磁磁化アニールを行い、次に垂直方向に磁界をかけアニールを行う。これを直交化アニールと呼ぶ。TSVはビン方向からの磁界を較知すること、磁界特性は磁極の反方向に2つの鋭利抵抗値をもつ(図5.59)。

反強磁性化アニールでの印加磁界は大きい(1 T以

### 5.5 GMR(巨大磁気抵抗効果)磁気センサー



上)ので、TSVの自由層は異方性かく乱履歴を受け、わずかに残留ステリシスが残る(図5-59)。

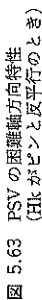
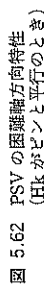
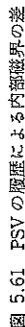
また、TSVの長手方向はゼロ磁界近傍で大きなヒステリシスをもつ(図5.60)。

ピン方向磁界検知ではゼロ磁界近傍で長手方向の浮遊磁界の影響を受けやすいので、長手方向にバイアス磁界を印加して容易軸方向の浮遊磁界の影響を避ける必要がある。

(4) 平行スピンドルズ(PSV)

スピントラル GMR のヒステリシスを改善する方法として平行スピンバルブ(PSV: Parallel Spin Valve)がある<sup>19)</sup>。平行スピンバルブでは、反強磁性、長手方向に印加磁界は同一方向である(図 5.61)。PSV ではヒステリシスはほとんどなくなる。しかし、MR比は TSV の半分になる。また、フリー層の方向がビントと平行、反平行で特性が変化する。

PSVは困難軸方向のヒステリシスは小さいが、異



方形磁界の大きさと方向により2つの安定点をもち、  
で(図5.62, 図5.63), ピン方向の動作点バイアスど  
長手方向の安定化バイアスの2方向のバイアスが必要  
である。

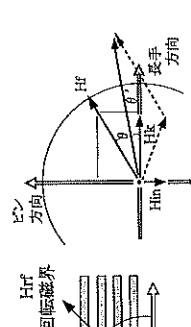
(5) スピンバルブ GMR の回転磁界特性  
スピンバルブ GMR (TSV) に平行回転磁界を印加したとき、MR 回転特性は次のように表される。

$$\text{GMR}(\theta) = \frac{AR}{R} \cdot (1 - \sin \theta) \quad (4)$$

( $\theta=90^\circ$ : 外部磁界  $H_z$  のピン方向との角度)

実際の案子では、内部磁界  $H_{in}$ 、異方性磁界  $H_k$  によって影響を受け、外部回転磁界  $H_{rot}$  と  $H_{in}$ 、 $H_k$  のベクトル合成磁界がピン方向となす角は、 $\theta' - 90^\circ$  である。

図5.64から $\sin \theta'$ は次式で示される。

図 5.64 外部回磁磁界角  $\theta$  と  $H_H$ ,  $H_B$  の関係

$$\sin \theta' = \frac{H_H \sin \theta}{\sqrt{(H_H \sin \theta + H_H)^2 + (H_H \sin \theta + H_B)^2}} \quad (4)$$

$H_H > H_B$  のときは,  $\sin \theta = \sin \theta'$  とみなせる。  
また,  $H_B > H_H$  のときは, 次式のようになる。

$$\sin \theta' = \frac{H_H \sin \theta}{\sqrt{(H_H)^2 + (H_B)^2}} \quad (5)$$

これ以外のときは, 実効回磁磁界は (3) に示すようになり, 変形歪を生ずる。

図 5.65 に変形歪の例を示す。歪をさけるには, 式 (6), (7) を満足することが目安となる。

$$H_H > 20 H_B \quad (6)$$

$$H_H < H_B / 20 \quad (7)$$

式 (7) の場合, 外部磁場で  $H_H$  が反転し, 特性が変化する。このときは, 長手方向へ定期的なパルス状の磁界をかける磁気リフレクシユが必要である<sup>20)</sup>。通常, GMR センサ素子はブリッジ回路を組んで使用される (図 5.66)<sup>21)</sup>。

しかし, 同一平面内の回磁配置で反平行にしたブリッジ (図 5.67)<sup>1)</sup> では, 素子の製造上の偏差の影響を受けやすい。とくに,  $H_H$  が小さいとき, ブリッジのオフセット偏差が問題となる。

オフセットが大きくなるのは,  $H_H$  やビン方向の偏差が強調されるからである。オフセットの偏差を小さくするためにはブリッジ配置のブリッジ接続とし, これらの偏差を打ち消すようにするのが効果的である (図 5.67)<sup>2)</sup>。

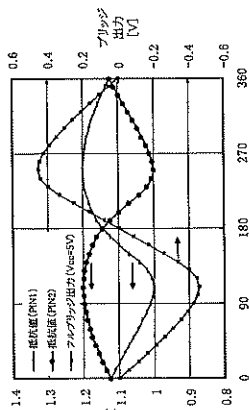
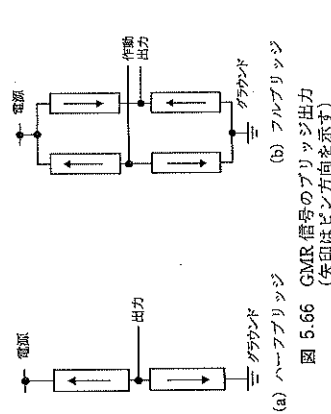
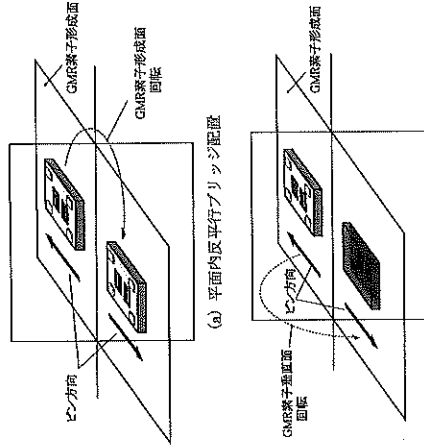
図 5.65 スピンバルブ回磁磁界角特性  
 $H_H = 30$ ,  $H_B = 10$ ; 単位 [Gauss]図 5.66 GMR 信号のブリッジ出力  
(矢印はビン方向を示す)

図 5.67 GMR 素子のブリッジ配置

## (6) GMR 膜の抵抗と温度係数

近年の抵抗型磁気センサは, 低消費電力, 小型化が求められている。多層膜 GRM, スピンバルブ GMR は  $10 \sim 20 \Omega/\square$  のシート抵抗をもち, NiFe-AMR の  $1 \sim 3 \Omega/\square$  より一桁大きく, 磁気センサバタンの小型化に有利である。

多層膜 GMR の抵抗温度係数 (TCR) は,  $\sim 1600$  ppm である<sup>22)</sup>。一方, 最近のハードディスク用のスピンバルブ GMR の TCR は  $900 \text{ ppm}/^\circ\text{C} \sim 1200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  である。この差は TCR に影響のある自由層の膜厚が低下しているからである。

GMR センサでは磁気特性改良のため自由層を厚くすることが多く, TCR も若干大きくなる。

自由層の NiFe 強磁性層膜厚の増大とともに TCR も大きくなるが,  $1800 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  を上回る可能性はほとんどない。通常は AMR の半分と考えよう。

GMR 膜の MR 変率 ( $\Delta R/R$ ) は,  $100^\circ\text{C}$  の変化で 7~10% 減少する。

## 5.5 GMR (巨大磁気抵抗効果) 磁気センサ

$$\frac{dR}{dT} = -700 \sim 1000 \text{ ppm}/^\circ\text{C} \quad (8)$$

温度変化の大きい環境下でのアナログ出力の測定では, なんらかの温度補償回路が必要となる。

### (7) 温度信頼性

磁気センサとして GMR の耐熱使用温度は比較的高い。多層膜 GMR では,  $250^\circ\text{C}$  以上の温度でも安定であり<sup>23)</sup>,  $150^\circ\text{C}$ ,  $1500$  時間でも実用上特性変化がない<sup>24)</sup>。しかし, 強磁性体の交換結合磁界は中間体の Cu 膜厚によって影響を受け, Cu 厚が  $9.2 \text{ \AA}$  では,  $150^\circ\text{C}$ , 数時間で安定性が失われた<sup>25)</sup>。

多層膜 GMR の耐熱性は非磁性中間膜 (Cu) と強磁性膜の相互拡散による結合磁界の変化によるものであり, 結晶配向およびその分散などによって変化する。考えられている<sup>26)</sup>。実際, 製膜前の基板状態 (平滑度, 結晶配向), 下地膜, 製膜装置の初期真空度あるいは残留ガス濃度などで変化する<sup>24,27)</sup>。

スピンバルブ GMR の耐熱は, 多層膜と同様に Cu 厚に依存する。Cu 厚  $20 \text{ \AA}$  で,  $200^\circ\text{C}$  以上の耐熱性を確保できる。しかし, 素子の発熱による温度上昇が加わるので注意が必要である。素子が小型化するとともに耐熱が低下するので, 高温での使用には素子の寸法を必要以上に小さくしないことが大切である。

また, スピンバルブ GMR では固溶層に高いプロセッシング温度をもつ反強磁性膜 (PtMn, IrMn など) を用いているが, 外部磁界が加わると  $200^\circ\text{C}$  以下でもビン方向が変化する。結晶配向の分散を小さくすることも大切であり, スパッタガスの純度, スパッタガス種の選択, 下地材料の検討などが必要である<sup>28-31)</sup>。

### (8) GMR センサの磁界検出範囲

各種 GMR 素子の常温での磁界検出範囲を表 5.13 に示した<sup>23)</sup>。多層膜 GMR, グラフェン GMR の変化率は大きく, 低温ではこれ以上の大きな GMR 比が報告されている。しかし, これらは飽和磁界も大きく, そのままでは磁界感度は高くない。

一般磁界中では素子を大きくするが, あるいは磁気取束手段を用いることにより磁界感度を上げることができ。しかし, 測定対象の磁性体が小さくなくとも磁束も減少し, 飽和磁界が大きい膜を用いた GMR センサの磁気感度は低下する。センサ自身の磁気感度 (分解力, 飽和磁界が小さく) なければ, 高い磁気感度 (分解

表 5.13 各種 GMR の磁気飽和特性比較

| GMR 構造 (Oe) | GMR (%) | 飽和磁界     |
|-------------|---------|----------|
| 多層膜 GMR     | 15~65   | 80~5 k   |
| グラフェン GMR   | 8~40    | 150~10 k |
| スピンバルブ GMR  | 8~16    | 5~30     |

能)は得られない。AMR の場合, 飽和磁界  $10 \text{ Oe}$  で磁気分解能は  $10^{-6}$  Gauss レベルといわれている<sup>32)</sup>。

GMR センサは, 自由層の膜厚が小さいので磁気モーメント量 ( $M \times V$ :  $M$  は磁化モーメント,  $V$ : 体積) が小さな磁気センサである。スピンバルブ GMR は, 磁気モーメント, 飽和磁界が小さく, 磁気分解能を必要とする用途に最も適している。

## 5.5.3 GMR の磁気センサへの応用

### (1) 磁界検知センサ

GMR を用いた一様磁界センサの磁界測定範囲は, ホール素子, MI センサ等と重なる部分が多い<sup>33)</sup>。

図 5.68 は, 多層膜 GMR と磁界集束シールドを用いた, 多層膜 GMR ブリッジセンサチップの一例である (NVE 社カタログより)。

チップ中心に GMR 素子があり, 左右に磁気取束とシールドを兼ねたヨークが設けられている。これまでの AMR を用いた磁界検出素子は,  $15 \sim 20 \mu\text{m}$  の素子幅であったが, GMR では, パターン幅が  $2 \mu\text{m}$  でも磁気特性が劣化せず, 素子面積が  $1/100$  に縮小可能であったと報告されている<sup>34)</sup>。

GMR 素子は, 小型で温度特性 (TCR, 耐熱性) がよいことから, シリコン集積回路 (IC) 上に組み込むのに適している<sup>35)</sup>。すでに低磁界から高磁界までの各種センサユニットがつくられ, 磁界発生用コイルやシールド取束用磁気回路とともに集積化された例がある<sup>36)</sup>。これまでに, AMR 素子や Hall 素子をシリコン素子上に搭載する例はあったが, GMR 素子は感度と温度安定性に優位性をもっている。

磁界検知では, 多層膜 GMR の応用が先行していたが, 最近では, スピンバルブ GMR で小型ブリッジ回路を形成した磁気検知チップも開発されている<sup>36)</sup>。

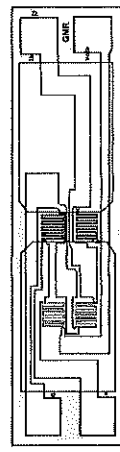


図 5.68 GMR ブリッジセンサチップ

### (2) 位置検出センサ

スピンバルブ GMR は磁界飽和方向により 2 つの飽和安定な抵抗値をもつ。また, 自由層の磁気モーメント量が少ないので小さな磁化で飽和させることが容易である。図 5.69 にデジタル磁気エンコーダへのスピンバルブ GMR 素子の応用を示す。デジタル出力用バターンでは, 素子幅が狭く, 磁極反転部以外では素子は飽和しているため矩形波に近づく。スピンバルブ GMR を用いた磁気エンコーダでは, 飽和デジタル出

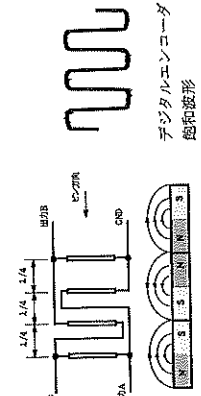


図 5.69 デジタルエンコーダパターンの波形出力

力が大きく変動が少ないので、デューティ比(正負の波形間隔の比)が安定する。

アナログエンコーダでの使用例を図 5.70 に示す。磁化反転長さと同じ何本かの素子パターンを含むブロックがあり、それぞれのブロックを組み合わせてアブリックが形成される。チップが移動することにより、ブロック内で磁界方向の異なる面積比が変化する。

磁気エンコーダの抵抗値  $R$  は素子が受ける磁界方向の比率  $r_n$  で決まる ( $R_n$ : 磁界が NS 方向のときの飽和抵抗,  $R_s$ : 磁界が SN 方向のときの飽和抵抗)。

$$R = r_n \cdot R_n + (1 - r_n) \cdot R_s \quad (9)$$

移動距離と  $r_n$  は比例するので、移動距離と出力は、磁化媒体の磁化反転区域域内で直線的に変化する。

図 5.71 に磁化反転長さ 30  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$  厚の磁性媒体 (磁気テープ:  $H_k = 1600$  Gauss,  $M_r = 190$  mT) を用いて、ギャップ(素子と磁気テープの隙間)を 5  $\mu\text{m}$  にしたときの長手磁界強度と、GMR 磁気エンコーダ素子の出力を示す(素子パターンの異方性磁界は  $H_k = 25$  Gauss)。

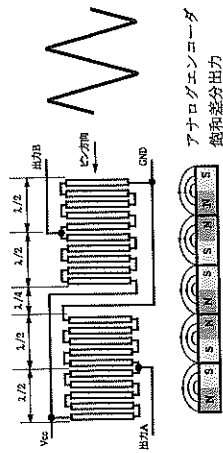
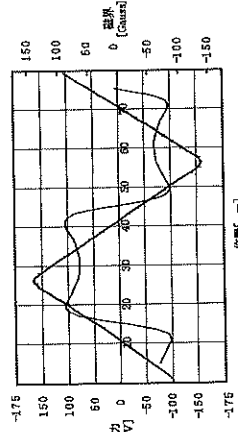


図 5.70 アナログエンコーダと波形



注: フルブリッジ、 $V_{cc} = 3.3V$

磁界は計算で求めた値である。

図 5.71 GMR 磁気センサの飽和出力

Gauss)。素子のモーメントが小さく、エンコーダパターンのほとんどが飽和しているため、磁化反転距離を半周期とする三角波が得られる。

### (3) 角度検出

スピニングバルブ GMR の回転磁界特性の応用である。素子が小型化するほど磁気回路も簡単になり、回転磁界  $H_{rt}$  を大きく均一化できるので、波形歪みの少ない回転出力特性が得やすくなる(図 5.72)。

図 5.73 は、 $H_{rt} = 0.34$  Gauss (地磁気) 下で、フリック配置してフルブリッジ接続されたスピニングバルブ GMR の回転出力特性である。センサの出力は小さいが、回転歪、オフセット偏差がなく再現性がよくなっている。

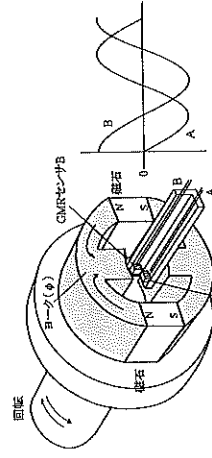
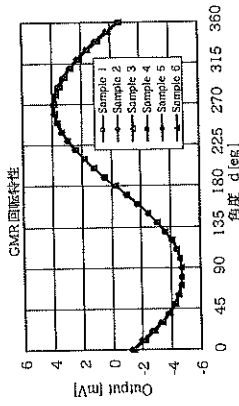


図 5.72 回転角エンコーダ

図 5.73 低  $H_{rt}$  での回転出力

### (4) 微小角度変位検出

スピニングバルブ GMR 素子の膜面に垂直に磁界を印加し、傾斜時の面内の磁界成分変化を検知して角度分解能を上げることができる。

図 5.74 にスピニングバルブ GMR 膜に 60~1000 Gauss の垂直磁界を印加し、素子のピン方向に傾斜させたときの角度  $\theta$  と抵抗値との関係を示した。

$\theta = 90^\circ$  (膜面に垂直) 近傍で大きな抵抗変化をする。物理量を微小角度変化としてとらえるセンサへの応用が可能である。磁界強度  $H_k = 600$  Gauss、異方性磁界  $H_a = 25$  Gauss のスピニングバルブ GMR 素子を用いて、 $\pm 0.001$  deg 以下の角度分解能が得られる。

磁石、マイクログラスパシビゼーション、GMR 素子を組み

## 5.5 GMR (巨大磁気抵抗効果) 磁気センサ

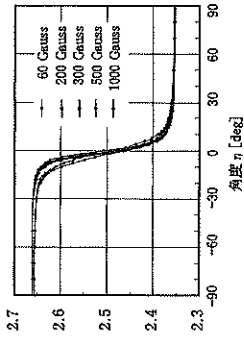


図 5.74 膜面垂直磁界傾斜角磁気抵抗変化

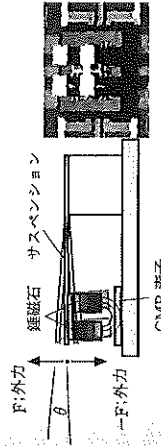


図 5.75 磁石による外力測定

合せた外力測定センサへの応用例を示す(図 5.75)。

### (5) 微小磁化検出

スピニングバルブ GMR は、磁気モーメントが小さく、飽和磁界も小さいので、微小磁化で高い感度をもつ。いま、 $dR/dH$ : MR 抵抗変化率、 $D_m$ : 被測定体の磁化モーメント量、 $D_s$ : センサのモーメント量、 $H_k$ : 異方性磁界、 $r$ : 微小磁化とセンサ間の距離とすると、磁気抵抗センサの感度は、次式であらわされる。

$$S = \left( \frac{D_m}{D_m + D_s} \right) \frac{1}{r^2} \frac{dR}{dH} \quad (10)$$

ハードディスクの高記録密度のために、媒体のモーメント量  $D_m$  を小さくする必要があった。このとき、GMR センサは、モーメント量  $D_s$  を下げて感度の低下を防ぎ、メディアとセンサの間隔  $r$  の縮小、GMR 変化率の上昇によって感度を高めていたことがわかる。

ここでは、低  $D_m$  を検知する磁気センサの応用として、渦電流を用いた導体表面凹凸検知と磁性粒子濃度検知センサを例として取り上げる。

(a) 渦電流探傷: ECT (Eddy Current Testing)  
渦電流で非磁性導体表面の傷や欠陥を検知する方法が知られている<sup>37)</sup>。導体表面とセンサ面に垂直に交差する磁界を加え、導体表面の形状変化が渦電流の変化として検知することができる。これまでは、渦電流の検知に小さなコイルが用いられていた。これを GMR センサに置き換えて小型・高感度を実現した<sup>38,39)</sup>。最近では、スピニングバルブ GMR を用いて表面形状をさらに高感度、高分解能で検知できるようになった(図 5.76)<sup>40)</sup>。

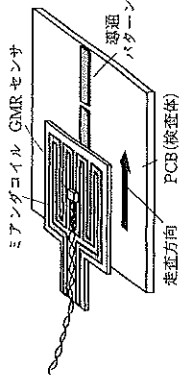


図 5.76 GMR 磁気センサによる ETC

GMR 素子のモーメントが小さいほど感度は上昇し、小型化により分解能が向上する。

### (b) 微小磁化測定ブルー

被ミクロンの磁性粒子の磁化を測定するために開発された微小磁化検出用ブルーへの応用例を示す(図 5.77)。

ブルー先端には、断面寸法 250  $\mu\text{m}$  角の針状先端に 75  $\times$  45  $\mu\text{m}$  の GMR センサパターンが形成されている。

外部交番磁界中で、液体中の 2  $\mu\text{m}$  の磁性粒子の磁化量を検知することが可能で、磁性粒子濃度 0.25% 以下までの検知が可能であった。生化学での官能基を化学修飾した磁性粒子により特定物質のトレースを行うなどの応用が考えられている。

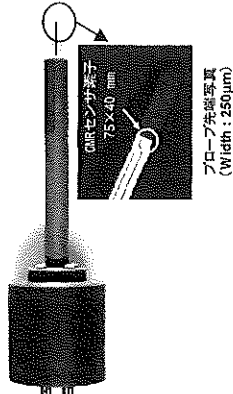


図 5.77 微小磁化測定ブルー

## 参考文献

- 1) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas: *Phys. Rev. Lett.*, 61, No. 21, 2472, 1988.
- 2) G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach and W. Zinn: *Phys. Rev. B*, 39, 4828, 1989.
- 3) J. Barnas, A. Fuss, R. Camley, P. Grunberg and W. Zinn: *Phys. Rev. B*, 42, no. 13, 8110, 1990.
- 4) B. Dieny, V. Speriosu, S. Metin, S. Parkin, B. Gurney, P. Baumgart and D. Wilhoit: *J. Appl. Phys.*, 69, No. 8, 1991.
- 5) C. Tang, R. E. Fontana, T. Lin D. E. Heim, V. S. Speriosu, E. A. Gurney and M. L. Williams: *IEEE Trans. Magn.*, 30, 6, 3801, 1994.
- 6) H. Yoda, A. Hori, K. Saito, H. Iwasaki and M. Sahashi: *Trans. Magn.*, 31, No. 6, 2666, 1995.
- 7) J. C. BRUYERE, G. CLERC, O. MASSENET, D. PAC-CARD, R. MONTMORY, L. NEEL, J. VALIN, and A. YELON: *IEEE Trans. Magn.* Vol. Mag-1, No. 3, 1995.

基本的に異なり、携帯電話では機器充電スペースの狭い条件と消費電力の徹底的抑制の条件がある。このため、パソコンでは不要であった垂直磁気記録のヘッドディスタグ(VHD)が、携帯電話では必須のものとして2007年末から実用化されている。このVHDでは、GMRはもとよりTMRヘッドも感度不足が懸念されている。さらに、携帯電話はパソコンと異なり、ユーザが手の内にしてどこにでも携帯し、電話だけでなくユーザの日常行動の判断支援デバイスとしての機能も付加されるようになり、GPSと組み合わせて、電子コンパスのように画面の地図内でのユーザの位置と方向を示す機能を標準装備化されるようになった。ここでは地磁気を感じて方位を決定する方法が標準であり、地磁気の千分の1の磁界検出分解能が必要である。

## 5.6 MI センサ

### 5.6.1 はじめに

MI センサは、「磁気インピーダンス効果(Magneto-Impedance effect)形高感度マイクロ磁気センサ」の略称である<sup>1-6)</sup>。マイクロ磁気センサは、磁界検出用センサヘッドの長さ1mm未満のマイクロメートル領域にある磁気センサを用いる。高感度磁気センサは、磁界検出分解能が0.1 mT (10<sup>-3</sup> T)以下である。地磁気は約0.5 Gaussであるから、高感度磁気センサは地磁気の5000分の1以下の微小な磁界を検出することができ、高感度磁気センサの検出対象には、岩石残留磁気や生体の心臓磁気(心磁図)などがあり、それぞれ0.1 nT程度の直流磁気やパルス磁界が必要となり、このことから、高感度マイクロ磁気センサとは、センサヘッドの長さが1mm未満で、磁界検出分解能が10 nT以下の磁気センサである、ということになる。

この高感度マイクロ磁気センサの需要は、1990年頃から急速に高まった。これは、情報化社会がいわゆるマルチメディア時代に入るとする時期であり、カラー動画像を処理すべく高密度・大容量の磁気記録装置が必要になり、それまでの磁気抵抗効果(MR)ヘッドが不要になり、それまでの磁気抵抗効果(MR)ヘッドは記録媒体磁界の検出能力が不足することが明白になったためである。これに対して、1988年にA. Fertらによって発見された巨大磁気抵抗効果(GMR)を基礎に、より高感度のGMRヘッドが開発されていき、1990年代後半からMRヘッドがGMRヘッドに置き換えられていった。しかし、GMRヘッドは磁界検出分解能が0.1 Gauss程度であるので、準高感度マイクロ磁気センサといふべきであり、2007年現在、GMRヘッドの感度不足が深刻な問題になってきている。この間1994年には宮崎村によってトンネルGMR効果(TMR)が発見され、現在GMRからTMRへの切り替えが始まっている。しかし、このTMRでも磁界検出分解能は30 mG程度であり、近い将来感度が不足することが懸念されている。

この磁気記録ヘッドの感度向上の要求は、2000年ごろから急浮上してきた携帯電話の急速な普及によって加速されている。2008年には、世界の携帯電話の普及は10億台に達する見通しであり、インターネットを基盤とする高度情報社会の主役はパソコンから携帯電話(携帯電話端末)に遷移している。メモリに關しては、パソコンのメモリと携帯電話のメモリの装置が

れている。フラックスゲートセンサ<sup>7)</sup>は伝統的な変調型高感度磁気センサであり、アポロ計画で月磁気の測定にも使用された。岩石磁気や地磁気などの科学計測に広く使用されている。しかし、原理的にヘッドの両端に強い反磁界が現れ、ヘッド両端部に「磁気的に死んだ状態」にあるため、反磁界の影響の少ないヘッド中央部に検出コイルを設置して使用する。ヘッドの長さは必然的に長くなり、市販のフラックスゲートセンサでは10~20 mmの長さになっている。したがって、従来の磁気センサには、高感度ミリ磁気センサはあっても高感度マイクロ磁気センサは存在しない。この意味で、MI センサは、世界初の高感度マイクロ磁気センサである。本節では、MI センサの原理とセンサ回路および携帯電話用電子コンパスを中心とする応用センシング例を解説する。

### 5.6.2 MI センサの発見、原理

#### (1) 磁気インダクタンス効果型磁気センサ

1992年、名古屋大学の筆者の研究では、高感度マイクロ磁気センサを創出するべく、その端緒を探索するため零磁歪アモルファスワイヤに正磁化電流電流を流して、ワイヤの両端の電圧を測定した。その結果、ワイヤの電圧抵抗分による正磁化電圧波形の上に微小なパルス電圧波形を見出し、電圧抵抗分電圧を相殺する抵抗ブリッジ回路によってこのパルス電圧のみを抽出する回路構成で、フラックスゲートセンサで必要な励磁コイルや検出コイルなしに高感度の磁界を検出するものとなった(図5.78)。アモルファスワイヤは、ユニチカ(株)中央研究所に依頼してFeCoSiBのわずかに負磁歪(0.1 μm 歪率)の120 μm 径 as-quenched ワイヤを30 径に線引きした後強力熱処理を行って、ワイヤの円周方向に磁気異方性を誘導したものである。このワイヤを2 mm まで短くしても磁界検出感度(分解能約1 μOe)が劣化しないため、筆者は“Magnetoe-Inductive effect”と命名してINTER-MAG'92 で公表し、IEEE Transactions on Magnetics に掲載した<sup>8)</sup>。この論文はISI社のScience Citation Index (SCI: 他者掲載論文への引用回数調査)の2007年9月調査で224 回であり、工学系論文引用回数としては非常に高い数値である。高感度磁気センサ技術の面では、表5.14を参照すれば従来のフラックスゲートセンサのヘッド長を10~20 mm から一挙に2 mm 長まで短縮できることになり、この面では画期的であった。

しかし、ワイヤ長を1 mm に短くすると磁界検出特性で不感域が現れ、厳密な意味での高感度マイクロ磁気センサにはならないことが判明した<sup>9)</sup>。この原因は、アモルファスワイヤを強力熱処理しても、ワイヤの中心部(core)の磁気異方性がワイヤ長方向と重な

表 5.14 磁気センサの性能比較

| センサ      | ヘッドの長さ    | 分解能            | 反応速度   | 消費電力   |
|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| ホールセンサ   | 10~100 μm | 0.5 Oe/±1 kOe  | 1 MHz  | 10 mW  |
| MR センサ   | 10~100 μm | 0.1 Oe/±100 Oe | 1 MHz  | 10 mW  |
| GMR センサ  | 10~100 μm | 0.01 Oe/±20 Oe | 1 MHz  | 10 mW  |
| フラックスゲート | 10~20 mm  | 1 μOe/±3 Oe    | 5 MHz  | 200 mW |
| MI センサ   | 0.6 mm    | 1 μOe/±3 Oe    | 1 MHz  | 6 mW   |
| SI センサ   | 1~2 mm    | 0.1 Gal/30 Gal | 10 MHz | 5 mW   |

- 8) D. H. Mosca, F. Petroff, A. Fert, P. A. Schroeder, W. P. Pratt Jr. and R. Laloe: *J. Magn. Magn. Mater.* 94, L1, 1991.
- 9) S. Parkin, R. Bhadra and K. P. Roche: *Phys. Rev. Lett.*, 66, 2152, 1991.
- 10) A. Fert, Barthelémy, J. Chiriac, V. Cross, O. Durand, J. L. Duvail, P. Etienne, J. M. George, R. Loloee, R. Morel, D. H. Mosca, L. G. Pereira, F. Petroff, A. Schuhl, P. A. Schroeder and L. B. Sten: *J. Phys.* 466, 1996.
- 11) 高梨弘毅, 藤森政安: 固体物理 Vol. 28, 10, 637, 1995.
- 12) T. L. Hytton, K. R. Coffey, M. A. Parker, and J. K. Howard: *Science* 261, 1021, 1993.
- 13) J. Mitchell and A. Berkowits: *J. Appl. Phys.* 75, No. 12, 1994.
- 14) J. C. Mallinson: *Magneto-Resistive Heads-Fundamentals and Applications*, Academic Press, New York, 1996.
- 15) J. Daughton: *IEEE Trans. Magn.* 30, No. 2, 1994.
- 16) W. Schwarzscher, K. Attenborough, A. Michel, G. Nabyoumi, and J. P. Meier: *J. Mag. Mag. Materials* 165, 23-29, 1993.
- 17) A. Tsoukatos, S. Gupta, and Y. K. Kim: *J. Appl. Phys.* 79, 8, 5446-5448, 1996.
- 18) D. E. Hein and S. Parkin: US Patent 5,465,185 (1995).
- 19) H. Fujiwara, Chun-Hong, and Koichi Nishioka: *IEEE Trans. Magn.* 32, No. 5, 4603, 1996.
- 20) Philips Technical Publication 268 on Magnetoresistive Sensors.
- 21) J. Fraden: *Handbook of Modern Sensors*, Springer-Verlag, New York, 253, 1996.
- 22) J. Daughton and Y. Chen: *IEEE Trans. Mag.*, 29, No. 6, 2705-2710, 1993.
- 23) J. Daughton: *IEEE Trans. Mag.* 30, No. 2, 354-368, 1994.
- 24) J. Daughton, J. Brown, R. Beech, A. Polm and W. Kude: *IEEE Trans. Mag.*, 30, No. 6, 1994.
- 25) H. Zhang, R. Cochran, Y. Hui, M. Mao, X. Bian and W. Muir: *J. Appl. Phys.* 75, No. 10, 1994.
- 26) D. M. Donnet, K. Tsutsumi, P. de Haan, and J. C. Lodder: *J. Appl. Phys.* 79, (8) 6243-6244, 1996.
- 27) K. Tsutsumi, P. de Haan, M. Eisenberg, D. Monsma, J. C. Lodder: *J. Magn. Magn. Materials*, 156, 327-328, 1996.
- 28) L. Tang, D. E. Laughlin, S. Gangopadhyay: *J. Appl. Phys.*, 81, (8) 4906-4908, 1997.
- 29) S. X. Wang, W. E. Bailey, and C. Stingers: *IEEE Trans. Mag.* 33, No. 3, 2359-2374, 1997.
- 30) W. F. Egelhoff, P. J. Chen, R. D. K. Miera, T. Ha, Y. Kadmon, C. J. Powell, M. D. Stiles, R. D. McMichael, C. Lin, M. Sivertsen and J. H. Judy: *J. Appl. Phys.*, 79, (1), 282-210, 1996.
- 31) W. F. Egelhoff, P. J. Chen, C. J. Powell, M. D. Stiles, R. D. McMichael, J. H. Judy, K. Takano and A. E. Berkowits: *J. Appl. Phys.*, 82, 12, 6142-6151, 1997.
- 32) 電子材料ハンドブック・朝倉海彦, 2005.
- 33) J. Lenz: *Proceeding of the IEEE*, Vol. 78, No. 6, 973-989 (1970) 2643 (2004).
- 34) J. Brown: *Sensors Magazine*, Sept., 1994.
- 35) D. Wang, M. Tondra, C. Nordin, J. M. Daughton, E. Lange, D. Brown, L. Tran, and J. Schuetz: *J. Appl. Phys.*, 91, 8405, 2002.
- 36) Z. Qian, D. Wang, J. M. Daughton, M. Tondra, C. Nordin, and A. Pople: *IEEE Trans. Mag.* 40, 2643 (2004).
- 37) S. K. Burke, J. Non-Destruct. Eval., vol. 7, 35-41 (1988).
- 38) T. Dogaru and T. Smith: *Non-Destruct. Test. Eval.*, vol. 16, 31-53, 2000.
- 39) C. H. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru, and S. T. Smith:

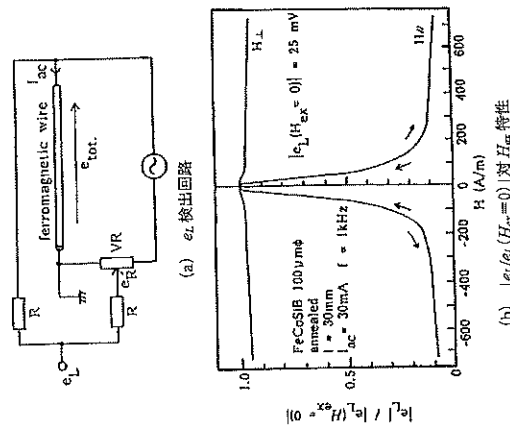


図 5.78 アモルファスワイヤの磁気インダクタンス効果型高感度磁気センサの原理図

り、外部磁界に対して反磁界が発生するためである。また、この Magneto-Inductive effect は磁気センサの技術的画期的改良であった原理的には飛躍したものでなく、かつ調整が必要なブリッジ回路が必要となる面も大量生産に不利であった、研究の質の面でも不十分である。

## (2) 磁気インピーダンス効果高感度マイクロ磁気センサ

磁気インダクタンス効果の限界を超えて高感度マイクロ磁気センサを実現するためには、研究の一段の飛躍が必要である。そこで研究室において、30 μm 径アモルファスワイヤの通電電流の周波数を上げてみることにしたところ、1993年5月になって、図5.79に示すインピーダンスの周波数特性が出現した。すなわち、通電電流の振幅を一定にして周波数を増加させると、100 kHz 以上でワイヤ両端電圧の振幅が上昇していき、しかもワイヤ長方向に直流磁界(10 G)を印加すると、1~10 MHz の領域で最大約50%の驚くべき減少率を示した。そこで、筆者らはこの現象を「磁気インピーダンス効果」と命名することにした<sup>9a,13)</sup>。

そこで通電電流の周波数をパラメータとし、印加磁界  $H_{ex}$  の大きさを変数として、インピーダンスの大きさの変化を測定したところ、図5.80に示す磁気インピーダンス特性を示した。

図5.80より、磁気インピーダンス特性は、比較的低下周波の1 MHz ではインピーダンスの大きさが  $H_{ex}$  の増加に対して単調に減少し、比較的高周波では  $H_{ex}$

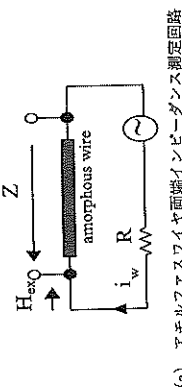


図 5.79 アモルファスワイヤのインピーダンスの周波数特性

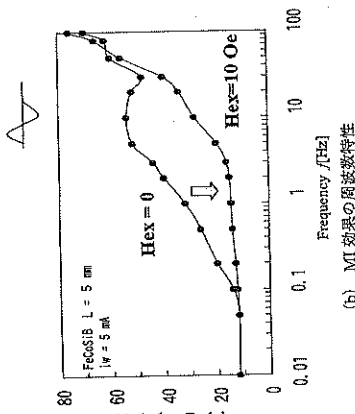


図 5.80 通電電流の周波数をパラメータとした磁気インピーダンス特性

の増加に対して最大値を示した後単調に減少している。ワイヤ電圧が最大値を示す  $H_{ex}$  の大きさは、ワイヤの異方性磁界  $H_A$  に一致する。なお、図5.80では磁界の大きさをエルステッド Oe で表しているが、真空中(空气中)では1 Oe=1 G であるので、磁界の大きさをどちらかで表現してもよい。

図5.79、図5.80の磁気インピーダンス効果(Magneto-Impedance effect: MI effect)は、アモルファスワイヤを1 mm(半田電極間隔)に減少しても劣化しないことを確認し、目標であった高感度マイクロ磁気センサの実現の目処が立った。これらの結果を、同年8月の RQ-8 国際会議(仙台)で公表し、聴講したボストン大学のハンフリー教授によって高く評価され、翌年(1994)のセントルイスにおける INTERMAG94 で Magneto-Impedance のセミナーセッションが開催さ

## 5.6 MI センサ

れた。これを機に磁気インピーダンスの研究が欧米を中心に世界的に拡がり、1995 年から多数の論文が発表されることになった。筆者が著者である MI 効果磁気センサに関する4論文のSCI論文引用回数調査では、2007 年までに計900 回であり、国際的関心の高さを表している。

### (3) MI 効果の理論解析

この MI 効果磁気センサの研究の拡がりは、MI 効果の新規性と高感度マイクロ磁気センサの実現という技術的独創性のインパクトと同時に、MI 効果の理論式の美しさが貢献している。図5.79のインピーダンスの周波数特性から、50 kHz 以上においてアモルファスワイヤの表皮効果が現れていることがわかる。したがって、磁気インピーダンス効果の技術的価値は、表皮効果によって、ワイヤ長方向の反磁界が発生するワイヤコア部の磁束変化を利用しないため、高感度マイクロ磁気センサの実現の道を切り開いたものであり、さらに、磁気インダクタンス効果で必要な抵抗ブリッジ回路などが不要であり、基本的に励磁コイルや検出コイルなどが不要な MR 素子と同様、最も単純な回路で高感度の磁気センサを構成できるものである。

半径が  $a$ 、抵抗率が  $\rho$  の合金(導電性)ワイヤのインピーダンス  $Z$  の表現式は、Landau 電磁気学によって既に与えられているが、cgs 単位系であるための光速や真空透磁率によるインダクタンス分を含む式であって、やや複雑である。そこで筆者は、電気・電子回路との整合のよい MKS 系のマクスウェル方程式とポインティングベクトルによるエネルギー変換式から、式(1)のように0次および1次のベッセル関数を用いた美しい表現式で表した。

$$Z = \frac{1}{2} R \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)}, \quad k = \frac{1-j}{\delta}, \quad \delta = \left( \frac{2\rho}{\omega\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここに、 $R$  はワイヤの抵抗、 $\delta$  は表皮深さ、 $\omega$  は通電電流の角周波数、 $\mu$  は円周方向の最大微分透磁率である。

表皮効果が顕著な場合は、 $\delta \ll a$  として式(1)から  $Z$  の近似式(2)が得られ、磁気インピーダンスの基礎式となる<sup>10)</sup>。

$$Z \approx \frac{a}{2\sqrt{2}\rho} R(1+j)(\omega\mu)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)より、磁気インピーダンス効果は、外部印加磁界  $H_{ex}$  で  $\mu$  が変化し、その実部と虚部が同じ大きさで変化する。ワイヤ両端の電圧が高感度に変化することがわかる。表皮効果が低い低周波では、 $Z$  は  $Z = R + j\omega L$  となるためほぼ  $R$  に等しく、 $H_{ex}$  による変化はほとんどない( $R$  をブリッジ回路で相殺すれば、Magneto-Inductive の場合になる)。表皮効果が顕著な周波数領域でさらに数百 MHz 以上の高周波

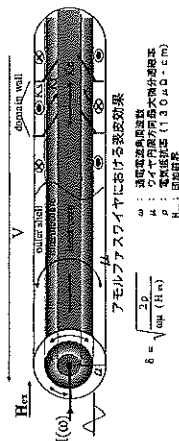


図 5.81 零磁歪アモルファスワイヤの磁気構造モデル

通電を行うと、ワイヤの磁壁の共振現象が現れ、 $\mu$  は複素数となる<sup>11)</sup>。

図5.81は、線引き後張力アニールされた零磁歪アモルファスワイヤの磁気構造モデルである。

磁性薄膜では、厚さ  $d(=2a)$ 、幅  $w$ 、長さ  $l$  とすると、インピーダンス  $Z$  は

$$Z = (2aR\mu/(1+j)\delta) \coth((1-j)a/\delta) \quad (3)$$

$$\approx (a/(2\rho)) R_{ac}(1+j)(\omega\mu)^{\frac{1}{2}} \quad \delta \ll a \quad (4)$$

で表される<sup>12)</sup>。

表皮効果が顕著な場合は、ワイヤのインピーダンスの式(2)と導線のインピーダンスの式(4)はほぼ同一の式で表現されるが、薄膜では断面が円形ではないため磁界が現れ、周方向最大微分透磁率  $\mu$  が減少する。したがって、高感度マイクロ磁気センサを構成する場合はアモルファスワイヤを用いる。

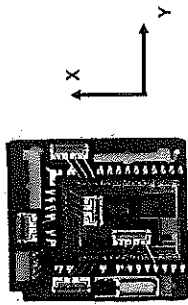
式(4)で、 $\mu$  を磁界で変化される場合は「磁気インピーダンス効果(Magneto-Impedance effect: MI 効果)」であり、高感度マイクロ磁気センサ(MI センサ)の実現に利用される。また、アモルファス磁歪ワイヤを用いて  $\mu$  を応力磁気効果によって変化させる「応力インピーダンス効果(Stress-Impedance effect: SI 効果)」となり、高感度マイクロ磁気センサ(SI センサ)の実現に利用される。したがって、MI センサおよび SI センサによって、高感度の電磁気量および力学量のセンシングが行われ、多種多様なモニタリングが可能になる。

## 5.6.3 パルス MI 効果とデジタル形磁気センサ回路

高感度マイクロ磁気センサは、多数個使用されることを考慮すべきである。これは、生体の感覚器の存在から類推される。例えば、人体の皮膚には体性マイクロ磁気センサーが膨大な数で何層にも高密度に分布し、温・熱覚、冷覚、圧・痛覚、触覚、気流覚、気配覚などの第二、第三の脳といわれる超高感度の感覚情報処理を



# ◆ Construction of AM1601



5.2×6.0×1.5mm

|                        | 6-axis sensor (AM1601)     | 6-axis sensor (AM1601)                 |
|------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| Attitude detection     | yaw<br>pitch<br>roll       | 360°<br>± 180°<br>± 90°                |
| Acceleration detection | X-axis<br>Y-axis<br>Z-axis | ± 2,000 mg<br>± 2,000 mg<br>± 2,000 mg |
| Direction resolution   |                            | 0.5°                                   |
| Sphere element         |                            | 0.3 million                            |
| Chip size              |                            | 5.2×6.0×1.5 mm                         |
| A/D converter          |                            | 12 bit                                 |
| Microcomputer          |                            | 12 bit                                 |
| Temperature sensor     |                            | one                                    |

図 5.84 携帯電話用磁気利用方位・モーションセンサチップ(愛知製鋼(株)製)

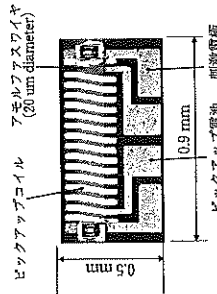
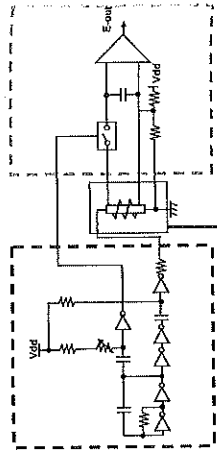


図 5.85 アモルファスワイヤにコイルを巻いた MI センサ素子(愛知製鋼(株)製)

を 3 軸に配置した CMOS 形磁界ベクトルセンサの磁界検出特性である。MI センサ回路は、図 5.83 のセンサ回路の片側回路である。磁界検出特性は、地磁気(±0.5 G)利用電子コンパス用の磁界センサとして外乱磁界最大±4 G 程度を想定し、フルスケールを±4 G としている。磁界検出特性の直線性は非直線性が 0.03%/FS であり、ヒステリシスは認められない。直線磁界検出分解能は約 0.1 mG、温度安定性は、-40°C~80°C の範囲で変動率は 0.2% 以内である。

図 5.87 は、加速度センサのヘッド構成図および厚力の加速度検出特性である。加速度検出素子は、厚



(a) MI センサ CMOS 回路

Dynamic Range : ± 4 G Sensitivity : 500 mV/G

Non linearity : 0.03 % FS Resolution : 0.1 mG

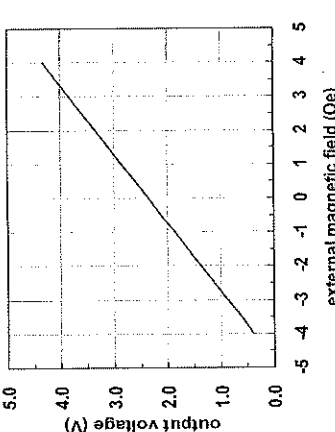


図 5.86 アモルファスワイヤ CMOS 形マイクロ磁界センサ

さ 4 μm、長さ 1.5 mm の非磁性インバーカンチレバ一の先端に 0.4×0.4×0.1 mm<sup>3</sup> の微小磁石を慣性質量として固定した素子と、その磁石に対向して MI 素子を設置したものである。携帯電話機が傾斜するとカンチレバのたわみ角度が変化して慣性質量磁石の MI 素子に対する相対変位が生じ、携帯電話機の傾斜角が MI センサ出力電圧として得られる。X、Y 平面からの傾斜角の検出特性は±90°(重力の加速度±1 G に対応)フルスケールで直線特性が得られる。

携帯電話機を手で動的に振ると、加速度センサは動的加速度センサとして動作する。

ユーザーが携帯電話機を水平面から任意に角度で保持して画面を見ると、傾斜角センサが携帯電話機の傾斜角を検出して 3 軸磁界センサの動作座標軸し、磁界ベクトルセンサが地磁界を検出してユーザーの水平面内での方位を検出する。この方位検出により、ユーザーの向いた方向に画面の地図が回転して(heading)、歩行者ナビゲーション機能を発揮する。

また、ユーザーが携帯電話機を振ると、ボタンを押さ

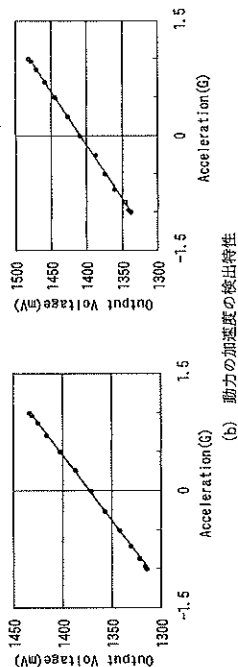
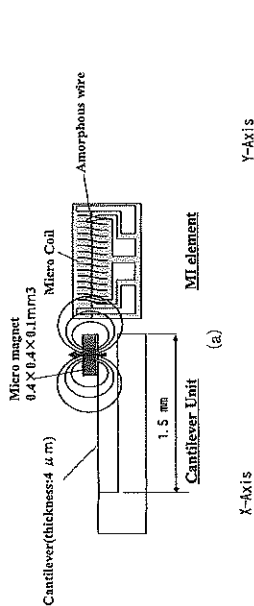


図 5.87 微小磁石慣性質量カンチレバと MI 素子の組み合わせによる加速度センサ

なくともメーカ画面のような見えない画面にスイッチしたり、テレビ画面を見ていて横長画面で見たいときに画面をスイッチしたりできる。

## 5.6.5 MI センサ応用センシング例

高感度マイクロ磁気センサは、一般磁界検出の分解能はフラックスゲートセンサと同程度であるが、記録媒体の磁極磁界や微小磁石の磁界を検出する場合、きわめて高感度になる。医用応用では、脳の正常細胞と視覚的に識別が困難な脳腫瘍(脳のがん細胞組織)にモノクローナル抗体で固定した磁石粉(ゲル)を、脳腫瘍手術時にベン型差動動作 MI センサで検知して、脳腫瘍組織部位のみ抽出する応用を試みている<sup>10)</sup>。また、カテーテルの先端に MI センサを固定して、心臓左心室筋肉の拍動異常検出や再生状態の検出なども試みる予定である。さらに、食品(小麦粉等)中の危険磁性微小異物の検出も試みている。

## 5.6.6 おわりに

MI センサは、今後さらに小型化されて携帯電話、自動車、医用などに広く実用化されていくと思われる。MI センサの更なる小型化には、センサヘッドの小型化が必要であり、現在アモルファスワイヤは線引き法で約 10 μm 径、さらにガラス被覆法で 1 μm 径まで試作されている。1 μm 径以下ではアモルファスワイヤ内には理論的に磁区磁壁が存在せず、いわゆる micromagnetism の世界が現れる。このとき Giant

Magneto-Impedance と呼ぶべき新現象の発生が期待され、携帯電話機のハードディスク用の高感度磁気ヘッドへの応用が進むと思われる。

また、MI センサの回路方式として、センサ出力電圧をマイクロプロセッサで信号処理する場合の A/D コンバータを省略できるパルス周波数変調回路<sup>11)</sup>や、アナログ磁気信号をデジタル信号に変換する正帰還形センサ回路<sup>12)</sup>も既に考案されており、アナログセンサ出力パターンからデジタル記録磁気パターンを推定する PRML 信号処理技術<sup>13)</sup>などの組み合わせで、MI センサの応用範囲が拡大していくものと思われる。

紙面の制約で、SI センサの説明を割愛したが、20 μm 径 CoSiB 負磁歪アモルファスワイヤの SI 効果による歪ゲージは、従来の高感度半導体歪ゲージのゲージ率約 140 に対してゲージ率が 4,000 以上という超高感度力センサである。この SI センサの応用では、従来困難であった微風の検出 20 や指先毛細血管の脈波形による血管年齢の評価<sup>14)</sup>などが簡単にできるようになる<sup>15)</sup>。また人の記憶回想の意欲を刺激する計測ができるようになる<sup>16)</sup>。今後の MI センサや SI センサによる知能化センシング技術の発展が期待される。

## 謝 辞

高感度磁気センサが、マイクロ磁気センサとしてはじめて情報機器に搭載されるという画期的技術が出現したことは、愛知製鋼(株)の本廠経営者取締役を担任者とする技術陣の活躍があったためである。本廠で

はその成果の携帯電話用方位・モーションセンサの技術公開として、多数の写真および図面を使わせていただいた。ここに厚く感謝申し上げます。また、(独)科学技術振興機構(JST)に種々の強力な支援をいただき、産学官連携が威力を発揮して、大学案の MI センサが事業化に至ったことを改めて感謝致します。

#### 参考文献

- 1) K. Mohri, Y. Honkura: *SENSOR LETTERS*, Vol. 5, pp. 267-270, 2007.
- 2) 毛利佳年雄, 本蔵義信: 平成 19 年電気学会 A 部門全国大会シンポジウム S4-1, 2007.
- 3) 毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌 Vol. 29, No. 7, pp. 702-707, 2006.
- 4) K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina, Y. Honkura, M. Yamamoto: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 38, No. 5, pp. 3063-3068, 2002.
- 5) K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina: *J. Mag. Mag. Mat.*, Vol. 249, pp. 351-356, 2002.
- 6) K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina: *Sensors and Actuators A* 91, pp. 85-90, 2001.
- 7) D. I. Gordon, R. E. Brown: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-8, No. 1, pp. 76-82, 1972.
- 8) K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashima: T. Uchiyama, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No. 5, pp. 3150-3152, 1992.
- 9) K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa, T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 29, No. 2, pp. 1245-1248, 1993.
- 10) K. Mohri: *Materials Science and Engineering A—Structural Materials Properties Microstructure and Processing* Vol. 185, No. 1-2, pp. 141-146, 1994.
- 11) L. V. Panina, K. Mohri: *Applied Physics Letters*, Vol. 65, No. 9, pp. 1189-1191, 1994.
- 12) 毛利佳年雄著「磁気センサ工学」コロナ社 p 37
- 13) L. P. Shen, T. Uchiyama, K. Mohri: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3355-3357, 1997.
- 14) T. Kanno, K. Mohri, T. Yagi, T. Uchiyama, L. P. Shen: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3353-3360, 1997.
- 15) N. Kawajiri, M. Nakabayashi, C. M. Cai, K. Mohri, T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 35, No. 5, pp. 3667-3669, 1999.
- 16) T. Uchiyama, K. Mohri, M. Shinkai, A. Ohshima, H. Honda, T. Kobayashi, T. Wakabayashi, J. Yoshida: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 4266-4268 (1997).
- 17) C. M. Cai, K. Usami, M. Hayashi, K. Mohri: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 40, No. 1, pp. 161-163, 2004.
- 18) 藤正雄, 中村好宏, 毛利佳年雄, 本蔵義信, 藤正雄: 日本応用磁気学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 551-554, 2002.
- 19) 三田誠一, 日本応用磁気学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 816-825, 1999.
- 20) アリエン・アブドカリム, 沈麗平, 毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, pp. 979-982, 2001.
- 21) D. Kusumoto, L. P. Shen, Y. Naruse, K. Mohri, T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 35, No. 5, pp. 4115-4117, 1999.
- 22) 沈麗平, アリエン・アブドカリム, 毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, pp. 1139-1142, 2001.

シヤル,  $J$  は電流密度,  $m$  と  $e$  は, 電子の質量と電荷,  $\rho$  は超伝導電子対の密度,  $n$  は量子数である。  $\phi_0$  は, 磁束量子で  $2.07 \times 10^{-15}$  wb である。

超伝導体内ではマイスナー効果により電流密度  $J=0$  であるので, 超伝導体内の磁束は, 式(1)より,

$$\phi = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l} = n \phi_0 \left( = \frac{nh}{2e} \right) \quad (2)$$

となる。式(2)に示されるように, 超伝導リング内の磁束  $\phi$  は, 磁束量子  $\phi_0$  を単位としてのみ存在することになる。 $h$  はプランクの定数である。これが磁束の量子化である。

次に, SQUID の動作において重要なのはジョセフソン効果である。これは, 2 個の超伝導体 (Nb, Pb など) を薄い酸化膜などの絶縁層を介して接合させると, この接合層を電子対のトンネル電流が流れる現象であり, 接合部の電圧がゼロであっても接合部の電流位相差  $\theta$  に基づいて流れる dc ジョセフソン効果,

$$I_f = I_0 \sin \theta \quad (3)$$

と接合部に直流電圧  $V$  が加わって交流が発生する ac ジョセフソン効果,

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi V}{\phi_0} \quad (4)$$

の 2 つである。ここで,  $I_f$  はジョセフソン電流,  $I_0$  は電圧がゼロで流れる臨界電流である。

このように, SQUID の動作は, 式(1)~(4)に示されるジョセフソン効果が基礎となっており, SQUID 磁気センサとしての特徴を生じさせている。

### 5.7.3 dc SQUID

図 5.89 のように 2 個のジョセフソン接合  $J_1, J_2$  がある超伝導リングを考える。この超伝導リングにおいて, 外部から磁束  $\phi_e$  を加えたとき, 磁束量子化条件は, リング内に入る磁束  $\phi$  とジョセフソン接合  $J_1, J_2$  の電流位相差から式(1)より,

$$\phi + \frac{\phi_0}{2\pi} \theta_0 = n \phi_0 \quad (5)$$

と表せる。また, dc ジョセフソン効果より全電流  $I = I_1 + I_2$  は,

$$I = 2I_0 \cos \frac{\pi \phi}{\phi_0} \sin \frac{\theta_0}{2} \quad (6)$$

となる。したがって, 電圧ゼロで流れる最大電流  $I_{\max}$  は, 臨界電流  $I_0$  の和とはならず磁束量子  $\phi_0$  を周期として,

$$I_{\max} = 2I_0 \left| \cos \frac{\pi \phi}{\phi_0} \right| \quad (7)$$

となり, 図 5.90 の実線のように示される。この様子は光の干渉効果と似ており, 「干渉計 (interference device)」の名称の由来となっている。しかしながら, 外部磁束  $\phi_e$  を加えた場合, 超伝導リングには自己イ

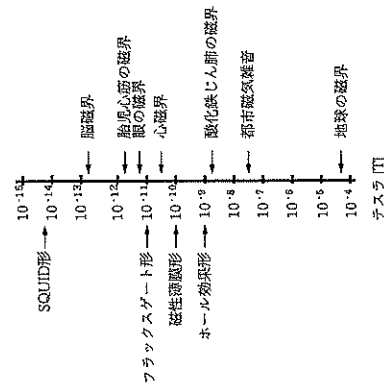


図 5.88 磁気センサ感度と測定対象磁界

(MEG) や心磁図 (MCG) などの微弱な生体磁気信号計測には不可欠な磁気センサである。これらの分野では, 主として低温超伝導 SQUID が用いられ, 超伝導現象が起きるには高価な液体ヘリウム温度環境が必要であり, クライオスタット等の周辺技術も必要となる。今日では安定したジョセフソン素子や FRP デュワー製作技術, 高価な液体ヘリウムの再利用を目指したヘリウム循環装置の開発研究<sup>23)</sup>も進んでおり超伝導応用エレクトロニクスの応用は, 物理計測のみならず医用計測分野への応用にも広がってきている。図 5.88 に高感度磁気センサと測定対象磁界との関係を示す。図に示されるように磁気センサの中でも SQUID は,  $1\text{T} (10^{-15})$  オーダーの微弱磁界が測定できる唯一のデバイスであり, 他のセンサに比べて超高温であることがわかる。

本節では, この超伝導エレクトロニクス応用分野の一つである SQUID 磁気センサの動作原理を示し, SQUID 磁束計および生体磁気計測への応用例を示すことにする。

### 5.7.2 磁束量子化とジョセフソン効果<sup>4)</sup>

SQUID は, 超伝導リングとジョセフソン接合の組み合わせからなっている。そこで, SQUID が磁気センサとして動作することを理解するためには, 超伝導やジョセフソン効果についての基本事項が関わってくる。超伝導の性質には, (1) 直流抵抗がなくなる (完全導電性), (2) 永久電流の存在, (3) 磁束の量子化がある。特に, SQUID においては, 磁束量子化の性質が重要である。超伝導リングにおける量子化の関係は,

$$\oint \left( \mathbf{A} + \frac{m}{2e\hbar} \mathbf{v} \right) d\mathbf{l} = n \phi_0 \quad (1)$$

で示される。式(1)において,  $A$  は, ベクトルポテン

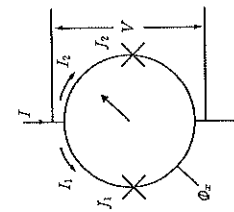


図 5.89 dc SQUID

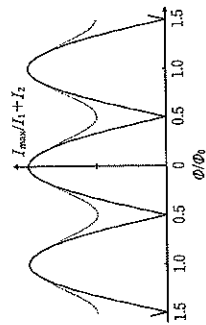


図 5.90 dc SQUID に流れる最大電流の変化

ンダクタンス  $L$  が存在するので、 $\Phi_x$  を打ち消すように遮へい電流  $I_s$  が流れる。その結果、リング内を貫く  $\Phi$  は、

$$\Phi = \Phi_x - LI_s \quad (8)$$

となり、図 5.90 に示す点線のようになる。したがって、この  $I_{max}$  を測定すれば磁束計となるが、実際には直流バイアス定電流  $I$  は  $I_{max}$  より大きくする。このため、ジョセフソン接合には直流電圧  $V$  が発生し、式(4)に示した ac 効果により  $J_1$ ,  $J_2$  での電流位相差が時間的に変化する。さらに、定電流源は  $I$  を一定に保持しようとするので、リング内の電圧  $V$  が変化する。この電圧変化は  $I_{max}$  と同じく周期  $\Phi_0$  であり、これを測定すれば外部磁束  $\Phi_x$  の変化が測定できる。このように、直流バイアス電流によって動作させる SQUID が dc SQUID である。この電圧変化を超伝導リングに磁束として帰還させ、その帰還電圧を外部磁束に換算して磁界を読み取る dc SQUID 磁束計の基

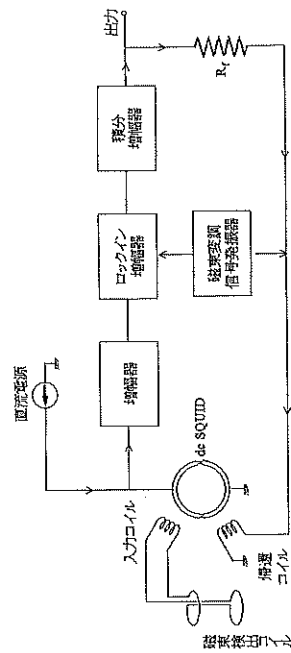
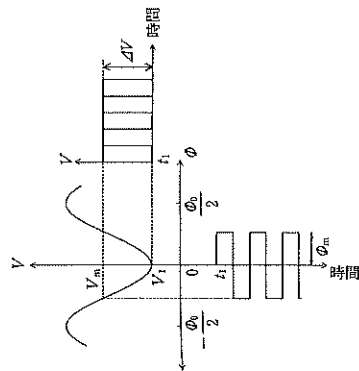
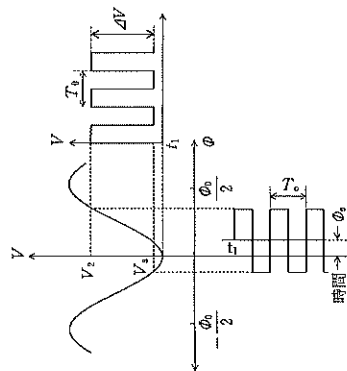


図 5.91 dc SQUID 磁束計の基本構成

本構成<sup>9)</sup>を図 5.91 に示す。

図 5.92 には、超伝導リングにおける外部磁束と帰還コイルを通して印加される変調用方形波磁束の関係を示す。図 5.92(a) に示すように、外部磁束がなく ( $\Phi_x=0$ )、超伝導リングへのバイアス電流  $I_0$  とリング間電圧  $V$  から得られる負荷線に基づくバイアス電圧  $V_1$  にあり、リングには、変調信号発生器 ( $f_0$  Hz) から帰還コイルを通して伝達される変調用方形波磁束  $\Phi_m$  が印加されている。このとき超伝導リングには dc 電圧、 $\Delta V = V_m - V_1$  が発生している。次に、磁束帰還コイルにより外部磁束が検出され、入力コイルを通して超伝導リングに磁束  $\Phi_s$  が印加されると、図 5.92(b) に示すように超伝導リング内を貫く磁束  $\Phi$  は、この方形波磁束と外部磁束に基づき磁束との和 ( $\Phi = \Phi_m + \Phi_s$ ) になり、超伝導リング間には、基本周波数  $f_0$  Hz を有する方形波状の電圧変化  $\Delta V = V_2 - V_1$  が発生する。

図 5.91 の回路において、超伝導リング間に発生した電圧変化を増幅器により増幅し、ロックイン増幅器によって変調周波数と同じである基本波成分を取り出し、積分増幅器を通して出力電圧となる。また、図 5.92 において、外部磁束が  $\Phi_0/2$  を超えると超伝導リングは動作領域外となり測定ができなくなることが推察される。そこで、常に、大きな外部磁束の変化に対してもバイアス磁束 (バイアス電圧) としての動作点を固定できることが望まれる。すなわち、図 5.91 において、前述したように、外部磁束変化に対応した出力電圧変化を超伝導リングに結合して超伝導リングによって打ち消すような磁束変化として超伝導リングに帰還すると図 5.92(a) に示す初期状態に戻るもので、常に、動作点が固定されることになる。この方式は FLL (Flux-locked loop) と呼ばれる回路方式で、動作点付近の小信号の線形化、ゲインミックスレンジの拡大に利用される。ここに示した例はアナログ方式であるが、磁束変調をせずに、前述した超伝導リングの電圧変化を直接増幅して入力に戻す直接帰還方式<sup>9)</sup>で磁束変調に伴う発振器やロックイン増幅器がないので回

(a) 外部磁束がない場合 ( $\Phi_x=0$ )(b) 外部磁束がある場合 ( $\Phi_x \neq 0$ )図 5.92 方形波磁束変調方式における外部磁束  $\Phi_x$  と dc SQUID リングの電圧変化  $\Delta V$  の関係

路構成が簡単になる。また、図 5.91 の SQUID 出力以後をアップダウンカウンタ (UDC) 回路や D/A 変換器を通してアナログ電圧にし、抵抗を通して電流として帰還コイルにより磁束変化として帰還させるデジタル FLL 回路方式<sup>9)</sup>がある。また、UDC を 2 個用いてデジタル FLL 制御回路<sup>9)</sup>を構成し、磁気シールドのない磁気雑音環境下でも動作可能な SQUID 駆動なども検討されている。

## 5.7.4 rf SQUID

図 5.93 に示すように、1 個のジョセフソン接合 J からなる超伝導リングを考える。この超伝導リングにおいて、外部から磁束  $\Phi_x$  を加えたとき、この時、リング内に入り込む磁束  $\Phi$  のために遮へい電流  $I_s$  が流れる。dc SQUID の場合と同様、リング内にトラップされる磁束の量子化条件は、ジョセフソン接合 J の電流位相差  $\theta$  と  $\Phi$  の関係より、

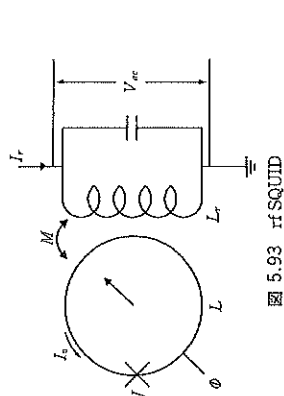


図 5.93 rf SQUID

$$\theta = 2\pi \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} + n \right) \quad (9)$$

となり、遮へい電流  $I_s$  は、dc ジョセフソン効果との関係より、

$$I_s = I_0 \sin \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \quad (10)$$

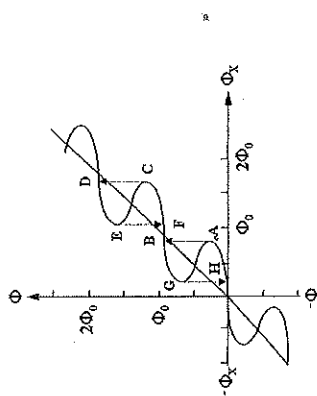
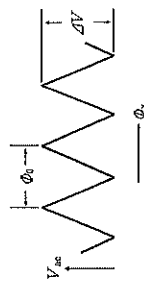
となる。また、 $\Phi$  と  $\Phi_x$  の関係は、リングの自己インダクタンス  $L$  と  $I_s$  によって、

$$\Phi_x = \Phi + LI_0 \sin \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \quad (11)$$

となり、一方、 $\Phi_x$  と  $I_s$  との関係は、

$$I_s = I_0 \sin \left( 2\pi \frac{\Phi_x - LI_0}{\Phi_0} \right) \quad (12)$$

となる。これが rf SQUID の動作原理を示す基本式となる。式(11)で示される外部磁束  $\Phi_x$  とリング内を貫く磁束  $\Phi$  との関係である  $\Phi - \Phi_x$  特性を図 5.94 に示

図 5.94 外部磁束  $\Phi_x$  と SQUID リング内磁束  $\Phi$  の関係図 5.95 外部磁束  $\Phi_x$  に対する rf SQUID 出力の三角波電圧変化  $\Delta V$  の関係

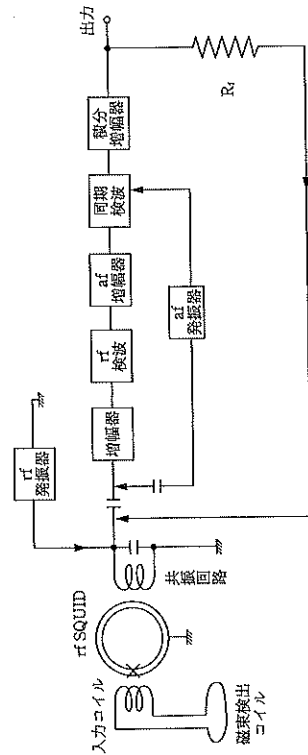


図 5.96 rf SQUID 磁束計の基本構成

す。図において、外部磁束  $\Phi_z$  が増加し、A 点に達するとリング内の磁束  $\Phi$  は、不連続的に B 点にジャンプし、 $I_c$  は減少する。これは量子数  $n$  が 1 つ大きい状態に移ったことを意味する。さらに  $\Phi_z$  が増加すると C 点から D 点にジャンプし、この場合、 $\Phi_z$  が 2 個取り込んだことに対応する。反対に  $\Phi_z$  が減少すると E 点から F 点、G 点から H 点へと不連続的に変化し、 $n$  が一つずつ小さい状態へと移っていく。

このように、リング内では、 $\Phi_z$  の大きさに応じて  $\Phi$  を単位として  $\Phi$  の出し入れが行われることになる。また、 $\Phi$  の不連続なジャンプにはある時間  $\tau$  ( $10^{-10} \sim 10^{-12}$  s) がかり、SQUID には電圧  $V = \Delta\Phi/\tau$  が発生してエネルギー損失が起きる。

そこで図 5.93 のように rf SQUID を高周波共振回路に相互インダクタンス  $M$  で結合させるとエネルギー損失を補うように共振回路からエネルギーが補給されるので回路の交流出力電圧  $V_{ac}$  は変化する。このとき、適当なバイアス電流を設定し、 $\Phi_z$  の変化に対する  $V_{ac}$  の検波出力を見ると、図 5.95 のように  $\Phi_z$  を周期とする三角波状の電圧変化  $\Delta V$  が得られる。この変化は、

$$\Delta V = \frac{\Phi_0 L}{2M} \quad \Phi_0 = \frac{\pi \Phi_L}{M} \quad (13)$$

で与えられ、 $\Phi_0$  に比例した値となる。この  $\Delta V$  を測定すれば  $\Phi_z$  の変化が測定できる。このように交流バイアス電流によって動作させる SQUID を rf SQUID

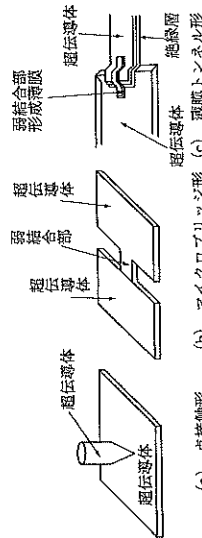


図 5.97 SQUID の種類

である。図 5.96 に rf SQUID 磁束計<sup>(a)(b)</sup>の基本構成<sup>(a)</sup>を示す。

### 5.7.5 SQUID と磁束トランス回路

前節において、dc および rf SQUID の動作原理について基本式を示しながら概説した。要約すると、SQUID とは、ジョセフソン接合を含む超伝導リングに外部から磁束を加えると、この外部磁束を打ち消すように超伝導リング内には逆へい電流が流れ、この接合が超伝導から常伝導へのゲートになり、磁束量子  $\Phi_0$  を単位として外部磁束の強さに応じた磁束を出し入れする磁束計として働くデバイスであるといえる。図 5.97 に各種 SQUID の基本構成<sup>(a)</sup>を示す。SQUID はジョセフソン接合の形式によって、

- (1) 点接触形 (図 5.97(a))：針状の超伝導体を導い絶縁膜を通して押し込んだもの、
- (2) プリッジ形 (図 5.97(b))：超伝導薄膜の一部に狭い通路を設けたもの、
- (3) 薄膜トランジスタ形 (図 5.97(c))：基板の上に超伝導体を蒸着して表面に薄い酸化膜を成長させた後に超伝導体で挟んだもので、準平面型<sup>(b)</sup>とも呼んでいる。いずれも 2 個の超伝導体が第三の物質との間で電気的に弱結合した構造となっている。

特徴としては、点接触形は、感度が高く接触の調整は容易であるが、振動等に対する機械的安定性に欠け

プリッジ形は、全体が一つの超伝導体でつくられ、弱結合部を  $1 \mu\text{m}$  以下にすることにより形成される。また、薄膜トランジスタ形は接合の際には高精度な技術を要するが、機械的に安定で長時間使用でき、特性をそろえて製作ができる利点がある。特に、近年、生体磁気計測の分野においては、心臓や脳の電気的活動に伴って発生する超微弱磁界を体表面や頭表面上で多数点にわたって同時に測定するための多入力 SQUID 磁束計の開発が進められている。このためには、同一特性を有する SQUID 素子が多数必要となるので、この点、薄膜形 SQUID 素子は有用となっている。最近では、弱結合形成用薄膜に酸化膜などの絶縁体を用いた SIS (超伝導体/絶縁体/超伝導体) ジョセフソン接合や常伝導金属などを用いて弱結合 (weak-link) を実現した SNS (超伝導体/常伝導金属/超伝導体) 構造からなる準平面型 SQUID 素子<sup>(a)</sup>が開発され、高温超伝導体磁気シールドと一体化した全頭型 64 チャンネル SQUID 磁束計装置<sup>(b)</sup>も開発されている。図 5.98 は準平面型 SQUID の弱結合部を示すもので、図中の白い部分は、Nb 弱結合部厚 (幅:  $0.17 \mu\text{m}$ , 高さ:  $0.4 \mu\text{m}$ , 厚さ:  $0.013 \mu\text{m}$ ) である。

SQUID を磁気センサとしてそのまま使用することは可能であるが、雑音対策や目的に応じた入力磁界信号を SQUID に伝達するために、磁束検出コイルや磁束トランス回路が用いられる。図 5.99 に磁束トランス回路例を示す。同図において外部磁束  $\Phi_z$  を磁束検出コイル  $C_0$  で拾うとこの磁束を打ち消すように導い電流  $I_0$  がコイルに流れ、相互インダクタンス  $M$  で SQUID に結合している磁束トランス  $T$  から SQUID に磁束  $\Phi_s = MI_0$  が伝達され、SQUID は動作する。

このような磁束検出コイル  $C_0$  の例を図 5.100 に示す。これらのコイルは主に生体磁気計測分野で用いられている例である。図 (a) は、マグネットメータと呼ばれるもので単一コイルからなり、シールドルーム内で使われる。図 (b) や (c) は互いに巻き方向を反対にし

図 5.98 準平面型ジョセフソン接合 SQUID<sup>(a)</sup> (NICT 太田浩氏提供)

図 5.99 磁束トランス回路

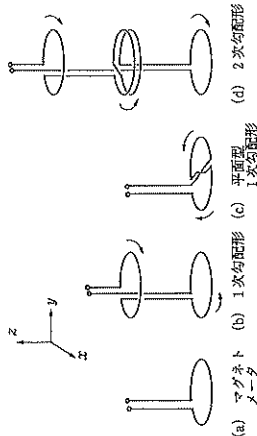


図 5.100 各種磁束検出コイル

たもので差動形を形成し、1 次勾配形でグラジオメータ (gradiometer) と呼ばれるもので均一な磁界は打ち消し合う。図 (b) は、法線磁界成分の同軸上での 1 次勾配であるが、図 (c) は、法線磁界成分に対する水平方向の 1 次勾配を求めるコイル構造である。これを平面型グラジオメータ (planar gradiometer) と呼び、このコイルを直交するように組み合わせると近似的に  $x-y$  平面での磁界勾配 ( $dH_z/dx$ ,  $dH_z/dy$ ) ベクトルが得られるので合成するとアローマップ (arrow map)<sup>(a)</sup> を描くのに有用であり、主に MEG 用 SQUID 磁束計に導入されてきた<sup>(b)</sup>。図 (d) は、2 次勾配形グラジオメータで、中絶のコイルが上下段のものと巻き方向が互いに逆になっている。この 2 次勾配形は同軸上の均一磁界や 1 次勾配を有する磁界を打ち消すのでシールドルームのない通常環境での磁界計測に汎用されている。ここに示した磁束検出コイルは基本的なものであるが、対象とする磁界の解析目的に応じて形状や配置が変わり得るもので、この他に、三軸方向の同時検出可能なウェーブクトル計測用<sup>(a)(b)(c)</sup>のものもある。これらの磁束検出コイルは、人間の脳や心臓からの磁界、すなわち MEG や MCG の計測と解析を対象としている。MEG や MCG の計測と解析は、 $15 \sim 25 \text{ mm}$  程度、勾配形におけるコイル間隔 (ベースライン) は通常、数十 mm 内で使用している。また、多点同時計測として薄い基板に直接プリントした磁束検出コイル例もある<sup>(d)</sup>。さらに、頭表面を覆うように磁束検出コイルを配置する全頭型 (whole-head) SQUID 磁束計<sup>(a)(b)</sup>

など測定対象の形状および解析目的によってこれらのコイルの形状やコイル径および配置には任意性があり各機関において検討<sup>20)</sup>されているので、国際的な標準化には至っていないのが現状である。

### 5.7.6 高分解能 SQUID と高温超伝導 SQUID

SQUID 磁気センサの応用<sup>21)</sup>は、生体磁気計測、金属材料の劣化等を磁気的に調べる非破壊検査(NDT: nondestructive testing)、あるいは、超微小な入力コイルからなる SQUID 磁束計により測定される高分解能な磁界分布の磁気的画像化から測定対象を見る SQUID 顕微鏡の開発への応用など広範囲に及んでいる。磁気センサによって測定される部分の空間分解能は基本的には前述した磁束検出コイルのサイズが小さいほど向上するがコイルを置く磁束の本数が少なくないため磁束強度は弱くなり磁気雑音の中に埋もれるので SQUID 磁束計への信号伝達が困難となる。

通常、人間の脳や心臓を対象とした SQUID 磁束計の磁束検出コイルは、その径が数 mm オーダーであるが、小動物や NDT、顕微鏡などへの応用には数 mm~ $\mu\text{m}$  の範囲にある。小動物や生体組織切片などの生体磁界用としては、磁束検出コイル径 3~5 mm の高分解能・低温超伝導 SQUID 磁束計<sup>22-25)</sup>や Y-Ba-Cu-O (YBCO) 系の高温超伝導 SQUID 磁束計<sup>26)</sup>により神経や筋組織の活動磁界およびラットの心臓図や脳磁図が測定されている。

生体磁気計測を目的とした検出コイル径が 1 mm 以下のマイクロ SQUID 磁束計の開発例として、検出コイル(200  $\mu\text{m}$  径)が基板上で弱接合部と連結した高分解能低温超伝導 SQUID 磁束計によりカエルの心臓図測定<sup>20)</sup>を行ったものもある。

図 5.101 に本 SQUID と連結した磁束検出コイル(円形リング: 200  $\mu\text{m}$  径, 4 分割並列で約 25 pH, 9.1  $\mu\text{Oe}/\text{Hz}$ )例<sup>20)</sup>を示す。例えば、NDT や SQUID 顕微鏡は、測定対象物(材料)の磁気的微小性質・挙動を可視化する目的があるので必然的に検出コイルサイズが小さく、 $\mu\text{Oe}$  となる。また、汎用性や経済性を考慮すると SQUID は高価な液体ヘリウムよりは安価な液体窒素で動作する高温超伝導 SQUID が利用され製作されている<sup>27)</sup>。

現在、高温超伝導 SQUID 材料には、いくつかの高温酸化物超伝導体<sup>28)</sup>があるが YBCO 系が使用されている。これは、Y(イットリウム)系の材料では超伝導への転移温度が約 90 K であり、良質の薄膜形成が可能であるといわれている。しかしながら、低温超伝導 SQUID のように 100  $\mu\text{V}$  程度の微弱磁界形成が可能な SQUID の実現には、多量に均一な特性が得られる安定した集積技術の開発が望まれている。これらの高温超

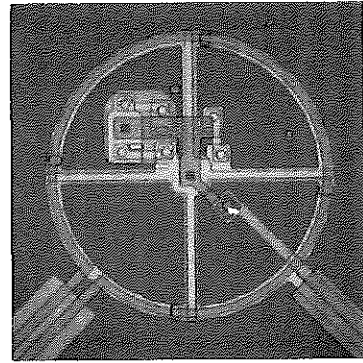


図 5.101 高分解能 SQUID 用磁束検出コイル例<sup>20)</sup>  
(円形リング径: 200  $\mu\text{m}$ )

伝導 SQUID(液体窒素 77 K 動作)は、低温超伝導 SQUID(液体ヘリウム 4.2 K 動作)に比べて、熱雑音が大きくなり、検出感度が低くなることが知られている。

SQUID の固有な磁束雑音<sup>29)</sup>は、SQUID リングのインダクタンス、伝導抵抗などに関係するが、これらの値が決まり、使用温度を  $T$  とすると  $1/T$  に比例することが知られている。例えば、高温超伝導 SQUID の磁束雑音は、低温超伝導 SQUID に比べて約 4.3 倍、感度大さくなり、感度低下の要因となる。このため、高温超伝導 SQUID 磁束計への応用には、いかにこの磁束雑音を小さく抑えた低雑音で高感度な SQUID を実現するために、材料や接合製造技術、磁束検出コイルの形式、制御・駆動用電子回路、環境磁気雑音の低減など周辺技術も含めた研究・開発が世界中で精力的に行われている。

磁束雑音の例として低温超伝導 dc SQUID では、 $1/f$  以上では数  $fT/\text{Hz}$  程度あるいはそれ以下の例<sup>11)</sup>もあるが、高温超伝導 dc SQUID では、数  $fT/\text{Hz}$  程度<sup>30)</sup>であり、SQUID 接合部やコイルの形式にも依存するのでこれらのパラメータを考慮した雑音特性<sup>31,32)</sup>が検討されている。NDT<sup>33,34)</sup>などでは、磁界強度も  $\mu\text{T}$  オーダーと大きく高温超伝導 SQUID が使用されている。また、YBCO 系のほかに水銀系高温超伝導 SQUID の開発<sup>35)</sup>も行われ今後の進展が期待されている。

### 5.7.7 SQUID 磁束計システムの実例と生体磁気計測への応用

人間の心臓、脳などからは、図 5.88 に示したように  $10^{-12} \sim 10^{-15}$  T 程度の極めて微弱な磁界なので、超高感度磁気センサである SQUID 磁束計によって測定され

表 5.15 主な生体磁気信号

| 生体磁気信号               | 大きさ [pT] | 周波数 [Hz] |
|----------------------|----------|----------|
| 脳磁図 (MEG)            | 5000     | DC       |
| 心磁図 (MCG)            | 50       | 0.05~200 |
| 高分解能心磁図 (HRMCG)      | 0.2      | 0.05~200 |
| 脳磁図 (MEG)            | 1        | 0.5~30   |
| 誘導磁界 (SEF, VEF, AEF) | 0.1      | DC~60    |
| 脳磁図 (MEG)            | 10       | DC~2000  |
| 脳磁図 (MEG)            | 10       | DC       |
| 細胞磁図 (MRG)           | 0.1      | 0.1~30   |

る。表 5.15 に SQUID 磁束計にて測定される主な生体磁気信号を示した。今日では、これらの生体磁界を測定し、病気の診断および脳や心臓の機能解析に應用しようという研究が各国で盛んに行われている。生体磁気計測の始まりは、1963 年、Baule と McFee によって 200 万回も巻いたコイルを用いて世界で最初に心臓図 (MCG) の測定<sup>36)</sup>からである。また、SQUID 磁束計を用いた生体磁気計測の始まりは、1970 年、MIT の Cohen が本格的な磁気シールドルームを建設し、Zimmerman らによって開発された 1 チャンネル点検磁気 SQUID 磁束計を用いて MCG の測定を行な

っている。図 5.102 は、本システムの構成である。SQUID 磁束計、信号処理回路、記録装置、磁気シールドルーム、磁束計と被検者との位置関係を計測する 3 次元位置検取装置などから構成される。本例の SQUID 磁束計は、Nb 薄膜直接帰還方式差動型 dc SQUID<sup>37)</sup>を用いている。

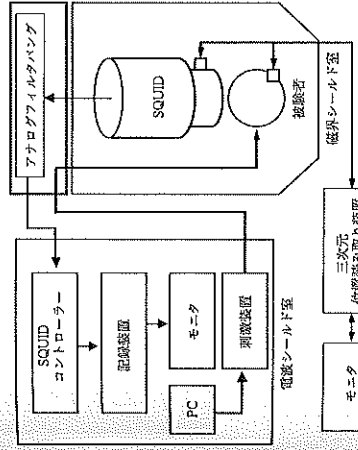


図 5.102 生体磁気計測用 SQUID 磁束計システムの構成例<sup>38)</sup>

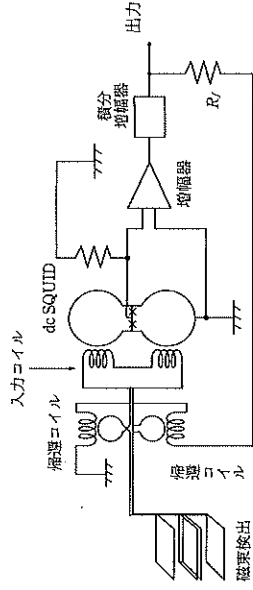


図 5.103 直接帰還方式差動型 dc SQUID の回路構成

ったのが最初である<sup>38)</sup>。今日では、特性がそろえられる SQUID 製造技術の進展もあり前述した 100  $\mu\text{V}$  チャンネルを超える全頭型 SQUID 磁束計を製作するに至っている。

生体から発生する磁界は、電流によるものと磁性体によるものと 2 つに大別できる。電流によるものとしては、脳の神経細胞や心臓の筋細胞などの電気的興奮に基づいて発生する磁界がある。また、磁性体による生体磁界は、空気中に溶遊している磁性物質や食物中に含まれに蓄積し、地球磁界やその他の外部磁界により磁化されて小さな磁石となり体外に磁界を発生させるものである。表 5.15 に SQUID 磁束計にて測定される主な生体磁気信号を示した。なお、生体磁気計測の基本については文獻<sup>39,40)</sup>を参照されたい。以下に、筆者らが生体磁気計測用に開発した 3 次元 39 ch SQUID 磁束計システムの例を示す。

図 5.102 は、本システムの構成である。SQUID 磁束計、信号処理回路、記録装置、磁気シールドルーム、磁束計と被検者との位置関係を計測する 3 次元位置検取装置などから構成される。本例の SQUID 磁束計は、Nb 薄膜直接帰還方式差動型 dc SQUID<sup>37)</sup>を用いている。

SQUID 磁束計の回路構成を図 5.103 に示す。図において、信号磁界検出用コイル、出力からの帰還電流を磁束として磁界検出用コイルに戻すための帰還コイル、SQUID に磁束を伝達するための入力コイル、dc SQUID、バイアス用直流電源、増幅器、積分増幅器から構成される直接帰還方式差動型 dc SQUID 回路である。回路の主な特徴は、図 5.91 の磁束差動方式とは異なり、変調部がないのでロッキング増幅器や変調用発振回路がなく簡易になっている。特に、出力からの帰還電流を帰還コイルに通じて磁束検出コイルに直接フィードバックさせる構成なので信号磁界によって誘起された逆へい電流が打ち消され、チャンネル間の干渉が除去できるので多チャンネル SQUID 磁束計に有用である。また、SQUID リング、帰還コイルを差動構成にしているのも、超伝導シールドが不要なセン

サの実装が可能である。素子パラメータは、SQUID インダクタンス: 140 pH, 入力コイルインダクタンス: 200 nH, 相互インダクタンス: 5.1 nH, 結合係数: 0.96, 固有磁束雑音:  $2 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$  である。

図 5.104 に本システムに組み込まれている 1 つの測定点で磁界の 3 成分が測定できる 3 次元磁界検出コイルを示す。本磁界検出コイルは、熱可塑性ポリミッド製のボビン (3×3×6 cm) に超伝導線 NbTi-Cu が 2 次勾配型を構成するように巻かれている。ベースラインは、法線成分が 2.9 cm, 接線成分が 1.4 cm である。SQUID 磁束計は、図 5.92 に示す 2 次勾配型 3 次元磁界検出コイルを用いた 39 チャンネルの構成となっている。本磁界検出コイルは、熱可塑性ポリミッド製のボビン (3×3×6 cm) に超伝導線 NbTi-Cu が 2 次勾配型を構成するように巻かれている。ベースラインは、法線成分が 2.9 cm, 接線成分が 1.4 cm である。本コイルは、MEG 計測用として曲率  $R=16$  cm の球面配型と MCG 計測用の平面型配置の SQUID とコイルを 1 つのモジュールとして、取り外し可能な冷却保持部 (プロローブ) とした。

図 5.105 に検出コイルモジュールを示す。このモジュールは、生体磁界計測用 12 点の 3 次元磁界検出コイルとノイズ計測用 1 点のコイルからつくられている。デューワーは、この 2 つのモジュールの形状にあわせ、球面型と平面型の 2 種類を製作した。

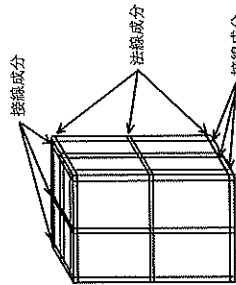
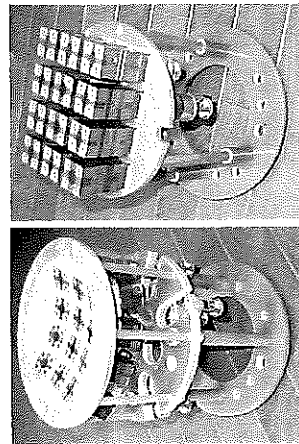


図 5.104 2次勾配型3次元磁界検出コイル



(a) MEG用 (b) MCG用  
図 5.105 3次元磁界検出コイルアレイ

dc SQUID 駆動は、パーソナルコンピュータより光ファイバーを介して dc の自動調節、増幅器やフィルタの調整を行う構成とした。フィードバック回路は、シールドルームに隣接した電磁波シールドボックス内に設置し、直流バッチリ駆動により商用周波数ノイズの侵入を防いでいる。図 5.106 にヘキサゴナル型簡易磁気シールドルーム (バレーマロイ 1 mm 厚 4 層、銅 70  $\mu\text{m}$  で構成) とガントリを示す。本シールドルームの雑音特性は、約  $17 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (1 Hz 以上) であり MEG や MCG などと測定できる。

図 5.107 (a) に 1 個の信号源 (電流源)、同図 (b) に 3 個の信号源から発生する磁界を 3 次元磁界検出コイル (図 5.100) によって測定される等磁界分布図例 (計算値) を示す。信号源モデルは、人間の頭部を半径 10 cm の均質導体球とし、信号源を球表面から深さ 2 cm, 強度 30 nAm の電流及極子と仮定した。等磁界分布図において、法線成分 ( $B_z$ ) で実線 (法線成分) が磁界の湧き出しを示し、点線が吸い込みを示す。



図 5.106 磁気シールドルームとガントリの例

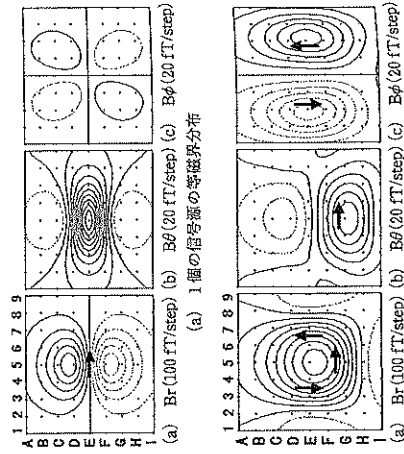


図 5.107 3次元磁界検出コイルの検出特性

## 5.7 SQUID 磁気センサ

矢印は設定信号源を示す。図 (a) より法線成分では、信号源を採ることで磁界分布、接線磁界成分 ( $B_z$ ) では、信号源面上で極値を示す。一方、信号源の向きと検出コイル面が直交する接線成分 ( $B_\theta$ ) 方向ではほとんど検出されないことがわかる。一方、図 (b) のように極値の信号源が近接して活動する場合、法線成分コイルで計測される磁界は双極子分布と異なった複雑な分布となり、信号源の分離が困難となるが、接線成分の



図 5.108 信号源推定結果例 (○: 体性感覚, □: 聴覚)

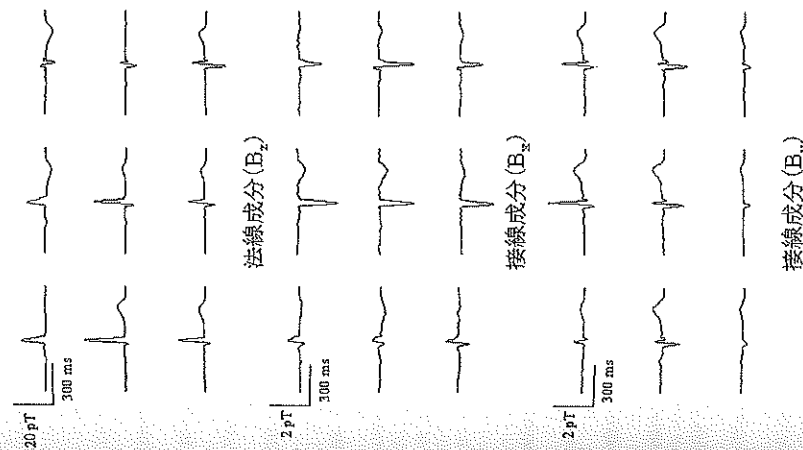


図 5.109 3次元磁界検出コイルにて測定された MCG 波形例

$B_z$  成分を見ると、G5 に 1 つの極値が得られ、1 個の信号源が存在することがわかる。また、 $B_z$  成分を見ると、それぞれ異なる位置 (B3, E7) に、2 個の極値が現れ、2 個の逆向き信号源の存在が予測される。このように、旧来の法線磁界成分に加え、接線磁界成分 ( $B_\theta$ ,  $B_z$ ) をも含む 3 次元磁界分布を用いることによって複数信号源の推定に有用な事前情報が実測分布から提供することが可能であることがわかる。これらは、計測信号の時空間解析法との組み合わせによって MEG<sup>(44-49)</sup> や MCG<sup>(50,51)</sup> の信号源解析) に応用されている。

図 5.108 に右耳に音刺激 (1 kHz トーンバースト、刺激時間 20 ms) とこれより 80 ms 遅れて右手正中神経への電気刺激 (約 5 mA 矩形パルス、刺激時間 0.2 ms) により生成された聴覚・正中神経混在誘発 MEG の 3 次元計測<sup>(52)</sup> より求められた信号源推定結果例 (加算平均 300 回) を頭部 MRI 画像に重ねたものを示す。これは、脳内に特徴的な 2 つの信号源 (聴覚刺激による N100, 正中神経刺激による N20) が同時に活動する潜時であり、聴覚刺激後 105 ms の反応と正中神経刺激後 25 ms の反応が重畳している。四角印 (□) が聴覚刺激に起因する等価信号源で、シルピウス線上に推定され、また、丸印 (○) が正中神経刺激に起因する等価信号源であり、中心線上に推定されている。

図 5.109 に健康者の胸部上で測定された 3 次元 MCG 波形例を示す。さらに今日では、母体内の胎児の状態を診断するために胎児 MCG<sup>(53,54)</sup> や胎児 MEG<sup>(54,55)</sup> の計測が検討されてきており専用の SQUID 磁束計の開発が進んできている。

## 5.7.8 おわりに

本節では、SQUID および SQUID 磁束計の動作原理とその応用について述べた。SQUID 磁気センサとしての応用は広範囲にあるが、本稿では主として生体磁気計測への応用について紹介した。この理由の一つとして、現在、脳機能の解明を目指す脳科学や医学分野においては、SQUID 磁気センサの役割は大きく、臨床現場には高価な多チャンネル低温超伝導 SQUID 磁束計が導入され脳や心臓の病気の診断に利用されており、現場の要求に答えるためには工学技術の改良・開発は継続的なものとなっている。特に、経済性の面からも安価な液体窒素温度で動作する高温超伝導 SQUID による磁束計の開発が望まれている。前述してきたように SQUID デバイス技術に関する材料・微細加工技術、電子回路技術、冷凍機や冷却用デューワーの製作に伴う低温工学技術、さらには生体計測や画像処理を含む信号処理技術など複合領域の研究の分野であり、21 世紀にさらなる発展をするには理学・工学および医学との協調とともに産業界との共同作業が望

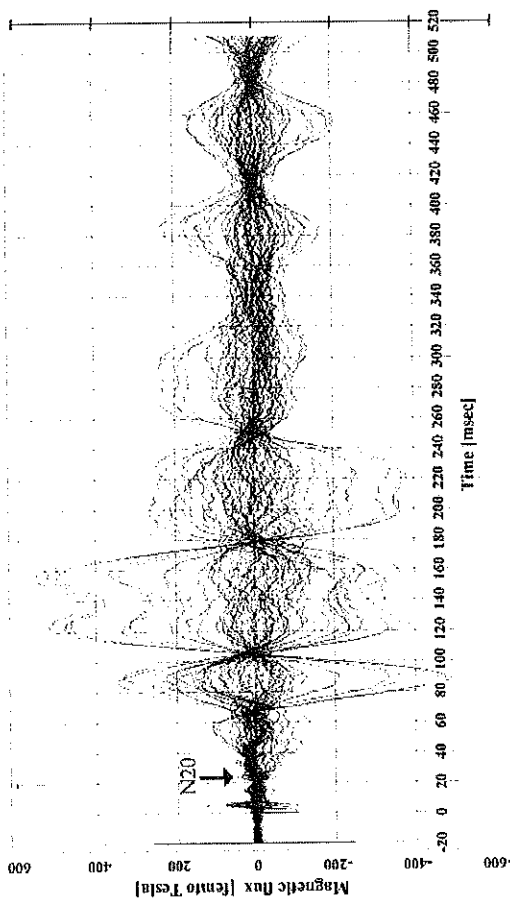


図 5.110 高温超伝導体内で測定された体性感覚誘発 MEG 波形例<sup>1)</sup> (右手首正中神経刺激)

まれるところである。

本節の終わりにあたり、図 5.110 に微弱磁気雑音空間 (1 Hz 以下) が実現された高温超伝導体磁気シールド体と一体化した全頭型 64 チャンネル SQUID 磁気計装置<sup>1)</sup>によって測定された体性感覚誘発 MEG 波形例を示す。ベースラインの揺らぎが見られない安定した波形が得られ、今後、脳の高次機能の高精度で緻密な長時間分解能を有する MEG 解析装置としての期待があり、低温および高温超伝導技術が融合した代表的な応用例でもある。

#### 参考文献

- 1) 電気学会通信教育会, 超電導工学, 電気学会, p. 3-44, 1988.
- 2) 川崎真幸, 小林玄一, 内川義則, 斎藤正男, 小谷誠, 藤平誠一, 尾形久直: 電気学会論文誌 C, 122, pp. 66-70, 2002.
- 3) T. Takeda: in Biomag 2002, H. Nowak et al. (Eds.), Vde Verlag Gmbh, Berlin Offenbach, pp. 958-960, 2002.
- 4) 電気学会クワイオエレクトロニクス常置専門委員会編: ショーテン効果と応用, pp. 52-61, 電気学会, 1978.
- 5) 原宏: 量子電磁気計測, pp. 59-60, 電気情報通信学会, 1978.
- 6) M. Hamalainen, R. Hari, R. Ilmoniemi, J. Knuutila, O. Louasmaa: *Rev. Mod. Phys.*, 65, pp. 413-497, 1993.
- 7) 例 5.12, D. Oyama, K. Kobayashi, M. Yoshizawa, Y. Uchikawa: *IEEE Trans. Magn.*, 42, pp. 3530-3541, 2006.
- 8) H. Ohta, et al.: *IEEE Trans. Magnetics*, 25, pp. 1018-1021, 1989.
- 9) K. Shirae, H. Furukawa, M. Katayama: in

#### 5.8 次世代磁気センサ

- 23) H. Kado, M. Higuchi, M. Shimogawara, Y. Haruta, Y. Adachi, J. Kawai, H. Ogata, G. Uehara: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9, pp. 4057-4062, 1999.
- 24) A. A. File, J. Verba, S. E. Robinson et al.: in Biomag 2002, H. Nowak et al. (Eds.), Vde Verlag Gmbh, Berlin Offenbach, pp. 912-915, 2002.
- 25) A. Pasquarelli, R. Rossi, M. De Melis, L. Marzetti, A. Trebesch, S. N. Erne: in BIONMAG 2004, E. Halgren et al. (Eds.), Biomag 2004 Ltd., Boston, Massachusetts, USA, pp. 34-35, 2004.
- 26) 例 5.13, A. File, J. Verba, S. Robinson, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9, pp. 4063-4068, 1999.
- 27) J. P. Wikswo: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 5, pp. 74-120, 1995.
- 28) D. Buchanan, D. Crum, D. Cox, J. P. Wikswo: in *Advances in Biomagnetism*, S. J. Williamson et al. (Eds.), Plenum Press, New York, pp. 677-679, 1989.
- 29) J. P. Wikswo, R. Friedman, A. Kirov, J. Eggera, D. Buchanan, D. Buchanan: in *Advances in Biomagnetism*, S. J. Williamson et al. (Eds.), Plenum Press, New York, pp. 681-684, 1989.
- 30) D. Buchanan, D. Crum, D. Cox, J. P. Wikswo: in *Advances in Biomagnetism*, S. J. Williamson et al. (Eds.), Plenum Press, New York, pp. 677-679, 1989.
- 31) Y. Okada, S. Kyuho, A. Lahteenmaki, C. Xu: in *Biomagnetism: Clinical aspects*, M. Hoke et al. (Eds.), Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, pp. 375-383, 1992.
- 32) K. Iramina, B. Hong, S. Uchida, K. Goto, S. Ueno: *J. Appl. Phys.*, 83, pp. 6465-6467.
- 33) 藤田孝, 小山洋, 栗城真也, 内川義, 河原一: 電気学会論文誌 A, 121, pp. 1104-1109, 2001.
- 34) K. Kobayashi, Y. Uchikawa: *IEEE Trans. Magn.*, 39, pp. 3378-3380, 2003.
- 35) 野野雄雄監製, 太田雄, 山下秀共訳: ショーテン効果の物理と応用, 近代科学社, pp. 385-386, 1988.
- 36) F. Ludwig, E. Dansker, D. Koeller, R. Kleiner, A. Miklich, D. Nenech, J. Clarke, D. Drung, S. Knappe, H. Koch: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, pp. 2919-2922, 1999.
- 37) T. Shaw, K. Echler, R. McDermott, J. Clarke, S. Kang, J. Morris: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, pp. 4107-4110, 1999.
- 38) A. File et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 5, pp. 3112-3118, 1995.
- 39) 高木一正, 藤本晃: 日本応用超伝導学会誌, 23, pp. 893-897.
- 40) G. M. Baule, R. McFee: *Am. Heart J.*, 55, pp. 95-96, 1983.
- 41) D. Cohen, E. A. Edelsack, J. E. Zimmerman: *Appl. Phys. Lett.*, 16, pp. 278-280, 1970.
- 42) 小谷誠, 内川義則, 中屋, 森博愛, 栗城真也: 生体磁気計測, コロナ社, 1995.
- 43) 原宏, 栗城真也, 共編: 超伝導科学—SQUID 計測と医学応用, オーム社, 1997.
- 44) 小林玄一, 内川義則, 山崎大, 山田康晴: 電気学会論文誌 E, 118-E, pp. 524-531, 1998.
- 45) K. Shinada, T. Muraoka, M. Ueda, Y. Fujiyama, S. Nagamachi, Y. Ynada: *ISF98*, pp. 364-365, 1995.
- 46) K. Kobayashi, Y. Uchikawa: *IEEE Trans. Magn.*, 37, pp. 2915-2917, 2001.
- 47) B. S. Kim, Y. Uchikawa: *IEEE Trans. Magn.*, 42, pp. 3344-3346, 2002.
- 48) B. S. Kim, Y. Uchikawa: *Trans. Magn. Soc. Japan*, 5, pp. 131-135, 2005.
- 49) B. S. Kim, Y. Uchikawa: *IEEE Trans. Magn.*, 42, pp. 3587-3589, 2006.

#### 5.8 次世代磁気センサ

次世代磁気センサを考えると、どうしても避けられないこととしてこれからのセンサ材料がある。本章で解説された磁気センサはすべて、その磁気センサ部はそれぞれ特種的な材料技術によって製作されている。特に、5.5 節の GMR 技術による磁気センサ、さらに、5.6 節で述べられている MI 効果による磁気センサ等はいずれも最近の超伝導材料の機能を利用した磁気センサである。5.7 節の超伝導磁気センサは、当然であるが、超伝導材料の技術進歩によって実現されている。5.3 節のホール IC 技術は、材料技術で離れた磁気センサ技術のようにも見え、しかし、電子移動度は化合物半導体に及ばないが、Si 単結晶という材料のもつ特性を 100% 引き出すことで製作できる回路技術が材料の欠点を補うという組み合わせで実現した磁気センサである。他の材料と違って Si はセンサ信号の増幅回路が製作できる材料という機能まで含めて考えると Si はきわめて優れた高感度磁気センサ材料である。このように磁気センサをつくるという目的と必ず対応する材料があり、それぞれ対応する材料技術の開発や関連する技術の進歩が重要である。

本章, 5.2 節, 5.4 節で述べた化合物半導体薄膜の磁気センサであるホール素子や磁気抵抗素子は、薄膜の材料特性とセンサ特性が最も顕著に結びつく例である。現在使われているホール素子や磁気抵抗素子よりも、超高感度化、低雑音化、超微細境界の研究開発に、センサ部の超微細化等さまざまな材料技術が深く関係している。これらの課題は薄膜の材料技術が深く関係している。これまでホール素子や磁気抵抗素子として使われてきた、狭ギャップ化合物半導体薄膜材料には、次世代の超微細磁気センサとして、新規のホール素子や磁気抵抗素子の実現に向けたさらなる期待が

図 5.111 には、 $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  絶縁層により  $\text{InSb}$  または、 $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  動作層をサンドイッチした断面構成を示した。ここで、 $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  絶縁層と  $\text{InSb}$  層は  $0.5\%$  の格子ミスマッチがある。 $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  動作層と  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層の格子ミスマッチはゼロである。

図 5.111 に示したように、実際にホール素子などの磁気センサを製作する場合の最速構成としては、最上部に、薄い絶縁性の高い  $\text{GaAs}$  絶縁層をキャップ層として挿入する積層構造がとられる。この上部の  $\text{GaAs}$  層は、 $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層とともに、 $\text{SiO}_2$  や  $\text{Si}_3\text{N}_4$  を形成するときのダメージから動作層を保護する層である。

図 5.112 には、図 5.111 で、動作層の  $\text{InSb}$  および  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  の膜厚を変えて MBE 法により製作した

|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| $\text{GaAs}$ 6nm                                                      |
| $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ 50nm                         |
| $\text{InSb}$ or $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$ as 15-500nm |
| $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ 700nm                        |
| $\text{GaAs}(100)$ substrate                                           |

図 5.111  $\text{InSb}$  または、 $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  を動作層を  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチした構造の断面

—△—  $\text{InSb}$  on  $\text{GaAs}$   
—□—  $\text{InSb}$  sandwiched by  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$   
—●—  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  sandwiched by  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$

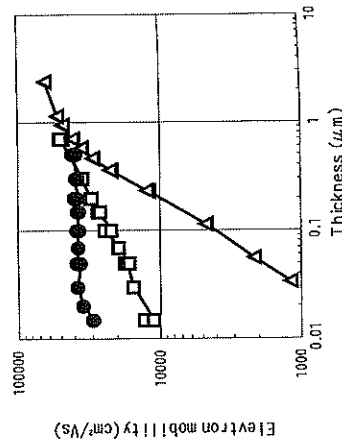


図 5.112  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチした構造の  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  層、および  $\text{InSb}$  層と、 $\text{GaAs}$  上に直接形成した  $\text{InSb}$  層の電子移動度の膜厚依存性の比較<sup>20)</sup>

ある。すなわち、より薄く、電子移動度の大きな薄膜材料の開発が期待されている。本節では、薄くて高い電子移動度を実現する  $\text{InSb}$  系の格子整合技術と量子井戸構造をベースにした薄膜材料技術の最近の進歩を述べる<sup>1-4)</sup>。

## 5.8.1 次世代 $\text{InSb}$ 系ホール素子材料とその特性

$\text{InSb}$  系の薄膜の古くからの大きな問題は、温度依存性が大きかったことと単結晶の薄膜を量産することである。これらの歴史的な課題については、MBE 法による  $\text{GaAs}$  基板へのエピタキシャル成長による単結晶薄膜の製作とドナー不純物のドーピングにより解決した。しかし、この過程で、大きな問題が浮上した。MBE 法で、 $\text{GaAs}$  基板上に直接エピタキシャル成長した  $\text{InSb}$  単結晶薄膜の厚さが  $1.0\mu\text{m}$  以下では、厚さを薄くしていくと、膜厚の減少に伴い急激に電子移動度が低下する。このため、 $\text{InSb}$  の単結晶薄膜で実用的な高感度のホール素子や磁気抵抗素子を製作するには、 $0.7\mu\text{m}$  程度の厚さが実用的には下限であった。このような大きな電子移動度の低下は、 $\text{InSb}$  と  $\text{GaAs}$  基板との間のおよそ  $14\%$  の格子ミスマッチを解原因である。このように大きな格子ミスマッチを解消するためには、少なからず  $\text{InSb}$  の厚さが  $1\mu\text{m}$  以下でも大きな電子移動度が得られる。 $\text{InSb}$  に格子定数の近い絶縁層を基板の  $\text{GaAs}$  と  $\text{InSb}$  の間にバッファ層として挿入することで、この格子ミスマッチを小さくすることができ。

$\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  三元混晶薄膜は、 $\text{InSb}$  との格子ミスマッチが  $0.5\%$  である。また、絶縁性もある。

$\text{InSb}$  と  $\text{GaAs}$  との間を格子ミスマッチを少なくできるバッファ層として使うことができる。

一方、 $\text{InSb}$  の膜厚が薄くなると、空気とのヘテロ界面である表面の影響が無視できなくなる。また、実際に磁気センサをつくらうとすると膜厚が薄いときには無視できた製作プロセス上の問題も生じる。例えば、磁気センサ部の  $\text{InSb}$  の薄膜を保護するパッシベーションの目的で、ホール素子を製作するプロセスでは、アラズマ CVD やスバタリングなどの方法では、 $\text{SiO}_2$  や  $\text{Si}_3\text{N}_4$  などの絶縁層が  $\text{InSb}$  の表面に形成され、 $\text{SiO}_2$  や  $\text{Si}_3\text{N}_4$  は、常に動作層である  $\text{InSb}$  薄膜の表面にダメージを与える。すなわち、動作層を保護するための保護層が必要である。このように保護層として、上述の  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  三元混晶を使うことができる。薄い動作層を使う場合は、 $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ /動作層/ $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ (GaAs Substrate) のような、動作層を絶縁層の  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  でサンドイッチする構造が必要となる。

場合、得られた電子移動度の膜厚依存性を比較して示した。動作層と上下の絶縁層を格子整合をさせることで高い電子移動度が得られることがわかる。図 5.112 で、 $\text{InSb}$  の動作層の場合は、膜厚依存性がまだ残る。しかし、絶縁層と格子整合した動作層の  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$   $\text{Sb}$  層では、 $20\text{nm}$  程度の厚さまで、 $30,000\text{cm}^2/\text{Vs}$  以上の大きな電子移動度を得られている。膜厚依存性はほとんどない。

図 5.113 には、 $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチした各種膜厚の  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  の電子移動度の温度依存性を示した。GaAs 基板上に直接成長した場合と同じく、室温付近の温度にピークのある  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  の特徴的な温度依存性を示している。ところで、図 5.111 に示した  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチする積層構成の動作層の  $\text{InSb}$  や  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  に  $\text{Sn}$  や  $\text{Si}$  等ドナー不純物をドーピングすると電子移動度やシート抵抗値の温度依存性を低減できる。図 5.114 に示したのは、 $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  の動作層に、ドナー不純物として  $\text{Sn}$  をドーピングした場合の電子移動度の温度依存性である。 $\text{Sn}$  をドーピングしたときのピークが消失し、温度依存性が少なくなっている。また、図 5.115 にはシート抵抗値の温度依存性である。ここでも温度依存性が少なくなっている。このように、ドナ

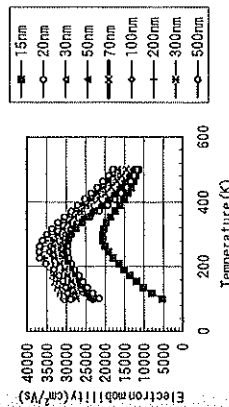


図 5.113  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチした各種膜厚の  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  層の電子移動度の温度依存性<sup>25)</sup>

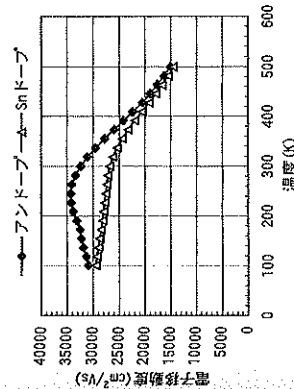


図 5.114  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチした  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  層の電子移動度の温度依存性と  $\text{Sn}$  ドープ効果

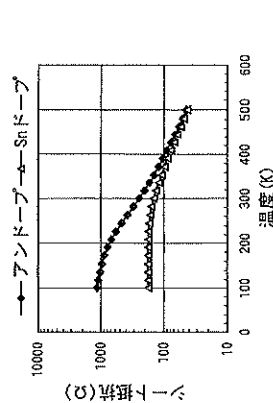


図 5.115  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  層によりサンドイッチした  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  層のシート抵抗値の温度依存性と  $\text{Sn}$  ドープ効果

一不純物のドーピングにより、図 5.111 の構造においても動作層の抵抗値や電子移動度の温度依存性の低減をすることができ。

以上述べた基本特性から、図 5.111 の構造においては、 $\text{InSb}$  や  $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  動作層の厚さを薄くすること、シート抵抗も高く、ドーピングによる温度依存性が少ない高電子移動度の動作層の形成が可能である。このような動作層のホール効果をホール素子に使うと、高感度の磁界検出、高い信頼性、動作温度範囲も低温から  $100^\circ\text{C}$  を超える高温まで使うことのできる次世代高感度ホール素子の製作が可能である。ここでは、詳細は述べないが、図 5.111 の積層構成は、動作層の厚さが薄い場合は、 $\text{InSb}$  または、 $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  の量子井戸となる。ホール素子を製作した場合は、量子井戸動作層のホール素子となる。

## 5.8.2 次世代 $\text{InSb}$ 系ホール素子材料の可能性

$\text{InSb}$  単結晶薄膜のホール素子は、磁気センサ部が単結晶の薄膜であり、入力抵抗やホール電圧の温度依存性が少ないので耐環境性能など実用上強く要請される信頼性も高く、既に、一部は地磁気検出などで実用化されている。また、この  $\text{Si}$  や  $\text{Sn}$  をドーピングした高感度の  $\text{InSb}$  単結晶薄膜ホール素子は、抵抗値や境界感度の温度依存性が小さく、使用温度範囲も広くとれる。今までの  $\text{InSb}$  薄膜では難しく、または、不可能であった自動車用途や、産業機械のセンサ等への応用やハイブリッドホール IC の高感度センサとしても期待できるホール素子である。

次世代ホール素子材料として取り上げた  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  の絶縁層によって  $\text{InSb}$ 、または、 $\text{In}_{0.9}\text{As}_{0.1}\text{Sb}$  の動作層を上下からサンドイッチした構造(量子井戸構造)は、次世代ホール素子材料として高いポテンシャルがある。製作できるホール素子や量子井戸型ホール素子は、高感度、温度依存性の少ない磁気センサであり、

row Gap Semiconductors, Springer Proceedings in Physics  
199, p. 89-92, 2007.

- 3) 外賀寛然, 柴崎一郎: 電気学会E部門総合研究会資料, PHS-07-18, 2007.
- 4) Ichiro Shibasaki, Hirotsuka Geka, Satoshi Yamada, Atsusi Okamoto and Hiromasa Goto: 6<sup>th</sup> International conference on Sensors, IEEE, Sensors p.467, 2007.

4) Ichiro Shibasaki, Hirotaka Geka, Satoshi Yamada, Atsusi

- 1) H. Gaka, A. Okamoto, Satoshi Yamada, Hiromasa Goto, Kazuo Yoshida, and Ichiro Shibasaki: *J. of Crystal Growth*, 301-302, 2007.
- 2) Ichiro Shibasaki, Hirotsuka Geka and Atsusi Okamoto, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Nar-

卷之七 題

6.1 はじめに<sup>(1)</sup>

温度計測は近代社会の発展とともに益々その重要性を増している。防災、医療、公害、農漁業、コールドチェーン流通網、宇宙・海洋開発、交通機関、民生電子機器応用など、その応用分野は広がっている。

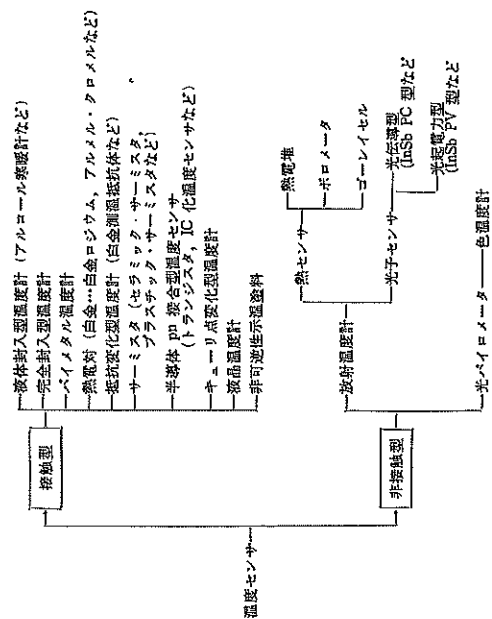
特に、近年のマイクログコンピュータの著しい進歩は、高性能で安い温度センサのニーズを拡大している。

温度センサには、温度を測ろうとする物体、環境に温度センサを直接接触させて測温する接触型温度センサと温度を測ろうとする物体、環境に温度センサを直に接触せず、離れた位置から被測定物体から放射される輻射を利用する非接触型温度センサがある。

図 6.1.1 に示す温度の種類分類の図に示す温度は多い。

図 6.2 は最も基本的な温度センサ計測系の構成である。温度センサの選別、使用に際しては測定系の構成について考え、最も適したセンサを利用するよう留意することが大切である。

本章では、まず温度センサについて述べる。温度セ



### 図 6.1 温度センサの種類と分類