

科

学

技

術

高感度InSbホール素子と その実用化

柴崎 一郎*

科

学

技

術

高感度InSbホール素子とその実用化

柴崎 一郎*

1. 序 論

ホール素子は、固体内を走行する荷電粒子（電子または正電荷の空孔）が、磁界の存在により、その運動方向に直角な力をうけることによって生ずるホール効果を利用した半導体磁電変換素子である。

ホール素子は、半導体のホール効果により素子に加えられた磁界の磁束密度に比例した電圧信号、すなわち、ホール出力電圧またはホール電圧を取出すよう構成された素子である。

さて、現在まで開発され、市販されているホール素子は、 μ 型半導体（InSb, InAs, GaAs, Si, Ge など）のホール効果を利用したものである。

写真は、旭化成で開発した InSb ホール素子 HW-300A, HW-300B, HW-101A である。InSb ホール素子は、この写真でわかるように、4本の

リードをもち、樹脂パッケージされている。

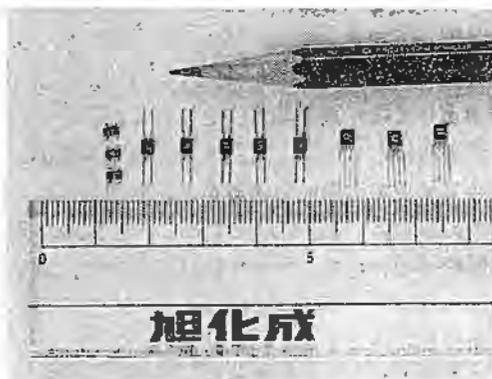
ホール素子は、上記の如く、小型でシンプルな磁界検出素子（いわゆる磁気センサ）である。

このようなホール素子の市場であるが、ここ数年、生産量の伸びは著しい。昭和62年度には、推定ではあるが、ホール素子の生産量は年間で3億個を優に超える勢いである。

このように、ホール素子の市場が拡大した——理由は、ホール素子を用いた小型モーター、すなわち、直流ブラシレスモーター（いわゆるホールモーター）の技術が、高性能のホール素子の出現によって急速に進歩したことであり、かつ、ホールモーターが、発展の著しい VTR や CD、8ミリ VTR、フロッピーディスクドライブ、あるいはハードディスクドライブなどの機器に必要な欠くべからざるものとなっているためと考えられる。従ってホール素子の需要の拡大は、上述の機器の生産量の拡大、普及にリンクしている。

さて、旭化成では、早くから真空蒸着法により、InSb ホール素子の開発を手がけてきたが、その結果として、現在市場でもっとも多量に使われている「高感度 InSb ホール素子」を開発した。すなわち、真空蒸着法により、 $1.0\mu\text{m}$ 以下に InSb を薄膜化し、かつ高い電子移動度と高いシート抵抗を得る技術を工業的に完成するとともに、フェライトによって、薄膜を上下からサンドイッチする磁気増幅構造を持つ、高感度 InSb ホール素子を開発した。

このホール素子は、それまでの InSb ホール素子の常識を変えるきっかけとなったものである。高くて、入手しにくい磁気センサ、使いにくい磁



高感度 InSb ホール素子

* しばさき いちろう 旭化成工業株式会社電子部品開発室 副参事

気センサ、etc…のホール素子のイメージを全面的に改め、また、ホール素子の駆動法としてそれまで定着していた一定電流による駆動方式から、現在は広汎に行なわれている定電圧駆動方式へ、使用法を変えるきっかけとなった。その時以来、DCブラシレスモーター用の磁気センサとして大量に使われ、今日をむかえている。

このように旭化成のホール素子が、今日大量に使われる原因を考えてみると、その背景は次のように考えられる。第一は、少ない入力電圧、たとえば1V入力で、かつ通常のフェライトマグネットでは簡単につくれる0.5KG程度の磁束密度の磁界中で、100~270mVという大きな出力の得られる高感度であったこと、第二は、それまでのInSbホール素子は、ホール出力電圧の温度変化が-2%/deg.と非常に大きく、使いにくい最大の原因であったのに対して、本開発のホール素子は、入力抵抗が350Ω程度、従来のホール素子と比較して非常に大きな値をもっていた。このためホール素子の入力端子間に、1~2Vの定電圧をかけた状態で駆動できることとなり、いわゆる定電圧駆動法が可能となり、これによって、室温付近でのホール出力電圧の温度変化はほとんどなくなった。そしてモーターなどへ応用する場合、ホール出力電圧の温度補正などの必要性がなくなり、大幅に使用条件を改善することができた。さらに原因の第三は、低価格で、かつ大量に性能のそろったものを供給できるようになったことである。

また、これら性能、コスト、供給上の問題が解決したことに加えて、ホール素子の信頼性を、Si系の半導体素子並みに向上したことも大量に使用する上で重要な要素となった。すなわち、安心して大量に使用できる高信頼性のホール素子の出現である。この他に、オイルショック後のLSI技術の大幅な進展の結果、ディスクリットで製作すると非常に高価なホールモーターの駆動回路が、IC化されることにより、大量かつ低価格で作られるようになる状況に至ったこともあげられよう。また、日本の電気メーカーが、カラーテレビの次の大型商品として、VTR開発という大きな方向に動いていたことと、それには、小型でノイズの少ない、DCブラシレスモーターの開発が必須であるという大きなニーズがあったこともあげられよ

う。そうした客観情勢の中で要求に十分応えられる資格をそなえた磁気センサとして、本開発の高感度InSbホール素子は好感をもって迎えられたといえよう。

2. 技術開発の概要

昭和48~49年当時、旭化成工業株式会社では、自動車安全システムとしてのエアバックの起動用の各種センサの開発を手掛けていたが、この開発は、その一つとして磁気センサをとりあげた際、InSb薄膜ホール素子の磁気センサとしての将来性に着目したことに始まる。

当時、ホール素子としては、単結晶をスライスし、薄く研磨し、厚さを5~20μm程度としたものに電極を付けたものが出回っているのみで、計測用などの特殊な目的で使われていた。そして、1個のホール素子の価格も高く、数百円~数千円、またはそれ以上という状況であり、現在のように低価格で、汎用性の高い、高感度の磁気センサとしてのホール素子の入手は困難な状況にあった。

この頃、オーディオプレーヤーの性能アップ、とくに低ノイズ化とワウフラッターの改善のため、プレーヤー用のモーターのDD(ダイレクトドライブ)化の研究が始まっており、低価格で、かつ高感度ホール素子に対するニーズは非常に強いものがあつた。さらに、ホール素子は、DCモーター用センサとして、将来大きな市場が見込まれるとの予測があり、この分野を狙った高感度ホール素子を開発する計画がスタートした。

ホール素子の感度は、使用する半導体の厚みに逆比例して大きくなり、また、電子移動度の大きい材料が良いことから、材料はInSb、薄膜化の技術としては、真空蒸着法を検討した。

蒸着基板としては、天然マイカのへき開面がきわめて平坦で耐熱性もあることを利用し、この上に多結晶InSb薄膜を形成することを試み、厚さが0.8~1.0μmで、シート抵抗も大きく、電子移動度も20,000~30,000cm²/V.secの特性が得られる条件を見いだすことに成功した。そして、フェライトにより、この薄膜を上、下からサンドイッチする磁気増幅構造を採用することにより、従来にはない高感度のInSbホール素子の設計、試作に成功した。この技術によって製作した高感度

InSb ホール素子は、ただちにオーディオプレーヤー用 DD モーターに最適ことがわかり、開発を本格化するきっかけとなった。

その後、さらに研究を続け、蒸着法の検討、工業的なウェーブプロセス技術、信頼性技術などの確立を行い、ユーザー評価を実施し、昭和55年8月、延岡に高感度ホール素子の量産工場をスタートさせた。

開発当初から、高感度ホール素子に対するニーズは非常に強いものがあり、オーディオプレーヤーにホール素子を用いたホールモーターが採用され、まずオーディオプレーヤーの主流を占めた。次に、VTR 用として、ノイズが原理的に発生せず、制御精度がよく、小型化できる電子制御の高性能ホールモーターの開発が要求に応えることとなり、まず VTR のシリンダモーターがホールモーター化されるに至り、急速にホール素子の需要が伸びた。さらに、この技術は、マイクロカセットや、CD のドライバーへも波及するとともに、O A 分野のモーターにも急速に取入れられている。

このため、高感度ホール素子の生産技術も、大量、低コストで効率よく製作することが要求され、大量生産対応の素子設計、ワイヤーボンディ

ングの取入れなどの技術開発を行ない、現在のホール素子を完成させた。

表一は、高感度 InSb ホール素子の開発の経緯をかたんにまとめたものである。

また、表二は、開発された高感度 InSb ホール素子の特徴をまとめた。これらの特徴は小型で、高性能の直流ブラシレスモーター用の磁気センサとしてふさわしいものである。

3. ホール素子動作原理、駆動法、不平衡電圧

次にこのホール素子の動作原理、不平衡電圧などについて述べる。

図一に、幅 w 、長さ l 、厚さ d の n 型半導体のホール素子のホール効果による原理図を模式的に示した。図一で 1, 3 は入力制御電流端子（入力電極）で、2, 4 はホール出力電圧端子（出力電極）である。

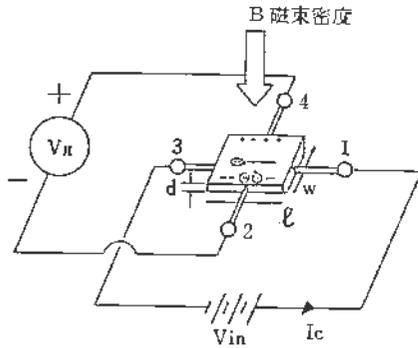
入力電極 1, 3 に入力制御電流 I_c を流し、半導体片に垂直に磁束密度 B の磁界を加えたとき、出力電極 2, 4 間に発生するホール出力電圧 V_H は^{1,2)}

表一 高感度 InSb ホール素子の開発の経緯

S. 48年	InSb ホール素子開発の企画、検討
S. 49年	InSb 年ホール素子の基本構造の検討、蒸着条件検討
S. 50年~51年	オーディオプレーヤー用として市場評価、プレーヤーへの採用決まる
S. 52年~53年	本格的な量産工場の企画と量産技術開発
S. 55年8月	高感度 InSb ホール素子の量産工場スタート
S. 56年4月	100万個/月の生産目標達成、ビデオ用の量産スタート
S. 57年	VTR の落込みにともないホール素子生産量減少
S. 58年	VTR の急速な伸びに伴い、500万個/月の生産量達成
S. 60年	1.0 億個/年の生産量を達成
S. 61年	1.7 億個/年の生産達成、フロッピーディスクドライブ用ホール素子が拡大

表二 高感度 InSb ホール素子の特徴

特 徴	効 果
① 高感度素子	低磁界で動作できる
② 定電圧駆動素子	従来の InSb ホール素子にない、良好な温度特性を持つ
③ 低消費電力	バッテリー、電池駆動に最適
④ 高信頼性素子	安心して大量に使用できる
⑤ 小型素子	機器の小型化に有利



素子の形状因子
 d : 半導体の厚さ
 w : ホール素子の幅
 l : ホール素子の長さ
 入力端子: 1, 3
 出力端子: 2, 4

図-1 ホール素子駆動図

$$V_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} \quad (1)$$

で与えられる。ここで R_H はホール係数である。簡単な電子のみがキャリアとして存在するモデルでは、 $R_H = 1/e \cdot n$ (e = 電子の電荷, n = 電子濃度) で与えられる。

また、実際のホール素子では、半導体の形状 l/w に依存する形状効果があるが、小さいとして無視した。

$K_H \equiv R_H/d$ は定電流積感度とよばれる量で、ホール素子の磁界に対する感度特性を示す。一般にこの値が大きい方が、ホール電圧が大きく、磁気検出特性が良い。

この値を大きくするためには、ホール係数を大きくするか、または、半導体の厚さをうすくすること、すなわち d を小さくすることが必要である。InSb を使用してホール素子を作る場合、ホール係数の値は、半導体を製作するプロセスで定ってしまう場合が多く、また、室温で真性領域にあるため制御しにくい。一般には、使用する InSb の純度や結晶性などで定まってしまう。しかし、半導体の厚さ d は、製作工程でかなり自由に換えられる。従って、現在は、半導体の厚さを薄くすることによって、ホール素子の積感度を高くする方法がとられている。真空蒸着でホール素子をつくる場合、InSb の厚さは、 $1 \mu\text{m}$ 程度が理想的である。

次に、ホール素子の入力電極に一定の入力電圧

V_{in} を加えた場合のホール電圧 V_H は、磁界が小さく、磁気抵抗効果によるホール素子の抵抗変化が小さい場合には、次式で与えられる³⁾。

$$V_H = \mu_H \cdot \frac{w}{l} \cdot V_{in} \cdot B \quad (2)$$

ここで、 μ_H は、半導体の電子移動度(ホール移動度)である。 $K_H \equiv \mu_H \cdot \frac{w}{l}$ は、定電圧積感度と呼ばれ、定電圧入力時のホール素子の磁界に対する感度特性を示す。ホール素子の磁界検出機能は K_H が大きい方がよい。

K_H を大きくするためには、半導体の電子移動度は大きくする必要があり。さて、磁密に言えば電子移動度 μ_H が大きいと、ホール電圧の磁束密度に対する比例特性が磁気抵抗効果により、低下する。従って高い磁界まで、磁束密度に対するホール出力電圧の比例性を得るのは難しい。しかし、それほど大きくない、すなわち低磁界では磁気抵抗効果が無視でき、(2)式に従って良好なホール出力電圧の磁界比例性が得られる。さらに、(2)式で表わされるホール素子の定電圧駆動では、ホール出力電圧 V_H の温度変化がきわめて小さいという勝れた特徴があり、室温付近の温度範囲で InSb ホール素子を使用する場合、実用上から、定電圧入力による駆動はきわめて重要である。真空蒸着により製作した厚さ $1.0 \mu\text{m}$ 以下の InSb 薄膜を用いる高抵抗の蒸着ホール素子により、この定電圧駆動がはじめて実際に実用化した。

さて、実際に製作されるホール素子では、必ず入力電極の対称性のずれや、薄膜にした半導体で

表-3 ホール素子の動作モード

1) 定電圧駆動 ($V_{in} = \text{一定}$)

$$V_H = \mu_H \cdot \frac{w}{l} \cdot V_{in} \cdot B$$

V_H : ホール出力電圧

μ_H : 電子移動度

B : 印加磁場の磁束密度

V_{in} : 入力電圧 (駆動電圧)

2) 定電流駆動 ($I_c = \text{一定}$)

$$V_H = R_H \cdot \frac{I_c \cdot B}{d}$$

R_H : ホール係数

I_c : 入力制御電流

は、特性の不均一分布があり、半導体内に電界の不均一分布が生じ、磁界が印加されない状態でも、ホール素子の出力電極にオフセット電圧が生ずる。

これは、通常不平衡電圧 V_u と呼ばれており、磁界が存在しない状態で、入力電極 1, 3 間に一定の電流または電圧を入力したときの、出力電極 2, 4 間の電位差で表わされる。従って、ホール素子のホール出力電圧 V_H は、実際の出力電極間の電位差から、不平衡電圧 V_u を差し引いて得られる。

不平衡電圧は、使用上好ましくないものであり、ホール素子の入力電極に加えられた電圧に比例し、また、正負いずれの場合もある。

使用上は、このように好ましくないものであるが、ホール素子の製造上不平衡電圧はやむを得ず発生する。従って、ホール素子を実際に使用するときのホール電圧に対して、不平衡電圧がどれだけ小さく抑えられているかは、積感度とともに実用的なホール素子の良否を決める重要なポイントである。一般には、 V_u の一定入力条件での値、または V_u/V_H の値で表示される。とくに、弱い磁界の検出センサとしてホール素子を使用する場合、不平衡電圧は極力小さく抑えられたものでなければならない。

製作上、ホール素子の不平衡電圧の値を小さくするためには、ホール素子のパターン形成精度を良くすること、薄膜化された InSb の膜内特性のバラツキを小さく抑えること、とくに、シート抵抗値分布のバラツキを小さくすること、また、膜厚分布を均一にすることが必要である。こうした点から、真空蒸着で作られた InSb ホール素子は、膜厚分布、シート抵抗値の分布を均一にすることにより不平衡電圧が小さく、また、高感度のものが得やすい。

図-2 には、実用されているホール素子のパターン例を示した。図-2 からわかるように実際のホール素子では、入力電極、出力電極は、対称に形成される。

図-3 には、ホール出力電圧 V_H と不平衡電圧 V_u 、出力端子間電圧 V_{out} の関係を示した。 V_u は、正負いずれの場合もあり、この回は、 $V_u > 0$ の場合を示した。破線で示したのは、 $V_u = 0$ の理想的

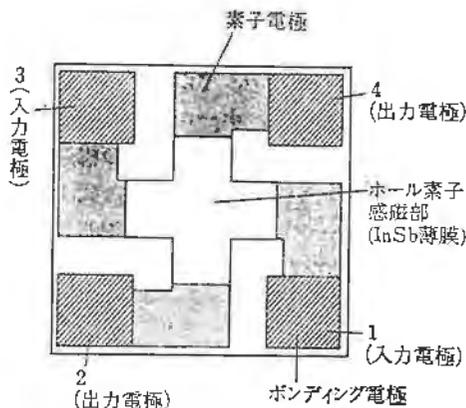


図-2 ホール素子感磁部パターン例 (平面図)

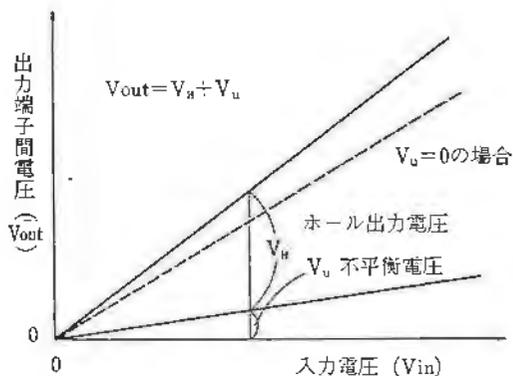


図-3 ホール素子の入力電圧と不平衡電圧、ホール出力電圧の関係 (磁束密度=一定)

なホール素子の場合を示している。このときは、ホール出力電圧と、ホール素子の出力端子間電圧は一致する。一般に、 $V_H \gg V_u$ が、ホール素子を使用する場合に要求されるが、このためには、ホール素子に印加する磁界を大きくとるか、または、 V_u を小さくするか、さらに、ホール素子の感度を大きくとるかいずれの条件が要求される。しかし、印加磁界の大きさは、使用目的で定まるのがふつうであり、また、 V_u は製造プロセスで定まってしまうため、実用ホール素子では、工程上 V_u を小さくすることとホール素子の高感度化が要求される。使用磁界が大きい場合は、不平衡電圧に対する条件は比較的穏やかであるが、弱い磁界で使用する場合に厳しい条件となり素子の高感度化が要求される。

4. InSb ホール素子の構造と高感度化

ホール素子には、2つの異なる構造のものがあ

る⁹⁾。第1のタイプは、基本的には、セラミックなどの非磁性基板上に形成されたInSbの薄膜ホール素子パターン部分があり、そのままパッケージされた構造のものであり、ホール素子に強磁性材料が使用されていないものである。この構造のホール素子では、図-4(A)に示すように、式(1)または(2)に従って、ホール電圧 V_H が磁束密度 B に比例する V_H-B 特性を有する。

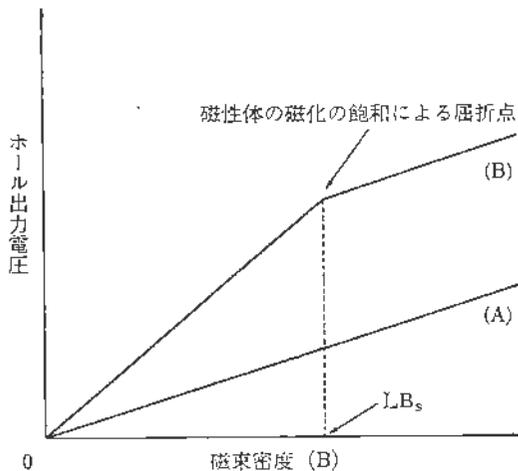


図-4 ホール素子の基本構造の違いと V_H-B 特性

一方、第2タイプの構造を有するものは、ソフトフェライトの強磁性体で、上下から、InSbの薄膜から成るホール素子部をサンドイッチした構造によって高感度化したものである。この場合は、磁性材料の磁化の飽和により、ホール素子の V_H-B 特性に折れ曲り点があり、 V_H-B 特性に比例限界が生ずる特徴を有する。

このような構造は、ホール素子の低磁界での高感度化の目的でとられるもので、不平衡電圧 V_u を増大させることなくホール電圧 V_H を大きくできるという利点を有する。これをホール素子の磁気増幅または磁気集束効果とよんでおり、実用上きわめて有用で、本開発のInSbホール素子の高感度化でとり入れ、実用化している。

さて、図-5に示されているように、ホール素子の感磁部を上下から強磁性体でサンドイッチした状態で、全体が一樣な外部磁界中に置かれた場合を考える。こうすると、ホール素子が実際に受ける磁束密度 B' は、外部の一樣な磁界の磁束密度を B としたとき、上下の強磁性体の磁化によ

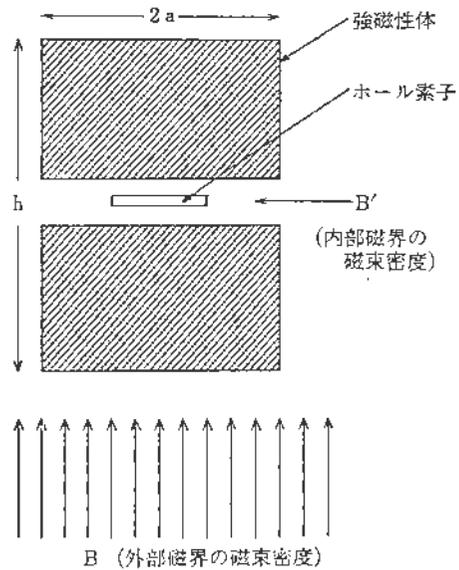


図-5 強磁性体サンドイッチによるホール素子の高感度化の原理 ($B' = B/L > B$)

り、 $B' > B$ となって、ホール出力電圧は、強磁性体がないときよりも大きくなる(印加磁界のみかけ上の増幅効果)。たとえば、計算を簡単にするため、上下の強磁性体は、円柱形で、直径 $2a$ 、厚さ $\frac{h}{2}$ を有するとし、ホール素子の挿入されているギャップは、強磁性体の厚さ $\frac{h}{2}$ に比して十分小さく無視できるとする。さらに、強磁性体の透磁率は通常より十分大きいので、ホール素子に加わる磁束密度は、高さ h 、径 $2a$ の円柱状磁性体の反磁場係数を L として、

$$B' = \frac{1}{L} B \quad (3)$$

で与えられる。

従って、ホール素子の出力電圧 V_H は、 $B/L \leq B_s$ のとき、 $1/L$ 倍になり、

$$V_H = R_H \cdot \frac{I}{d} \frac{B}{L} \quad (4)$$

で与えられる。ただし、 B_s は強磁性体の飽和磁束密度である。

一般に、反磁場係数は、強磁性体の形状のみで定まり、この例では、

$$L = 1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + 4a^2}} < 1 \quad (5)$$

で与えられる。この例からもわかるように、一般に $L < 1$ であり、 L の値を適当に設計することに

より、ホール素子に加えられる磁束密度を(3)式に従って、外部磁界の磁束密度 B の何倍かにすることができる。しかも、この場合は、当然のことながら不平衡電圧の増加はない。

こうして磁気増幅したホール素子の外部磁束密度に対するホール出力の比例限界は、

$$B = LB, \quad (6)$$

で与えられる。図-4(B)でこの点を示してある。

この比例限界をこえた場合のホール出力電圧の増加は、当然のことながら外部磁束密度の増加に対応する部分のみであり、 $B \geq LB$ では、

$$V_H = R_H \cdot \frac{I}{d} \cdot [(1-L) \cdot B_s + B] \quad (7)$$

で与えられる。この式で、 $L=1$ の場合は、強磁性体が存在しない場合に対応する。

さて、一般にホール素子の基板として使われる強磁性体は、正方形であり、対抗して用いられる強磁性体は円柱、または角柱の場合が多く、また、その大きさも、上側は下側すなわちホール素子の基板として用いられるものに比して一般に小さい。この場合の反磁場は、式(5)より若干複雑である。飽和磁束密度は、フェライト、パーマロイなどの材料によって異なるので、強磁性材料でサンドイッチされたホール素子の V_H-B 特性は、いろいろなものが可能である。しかし、一般に実用に供されているフェライトを使用したホール素子の場合には、1KG 程度が比例限界である。特別に高感度化したものでは、比例限界が500G 以下のものもある。

さて、InSb 蒸着ホール素子は、感磁部半導体の薄膜の厚さは、 $1.0 \mu\text{m}$ 以内であり、磁性材料間のギャップは十分小さくでき、従って上記磁気

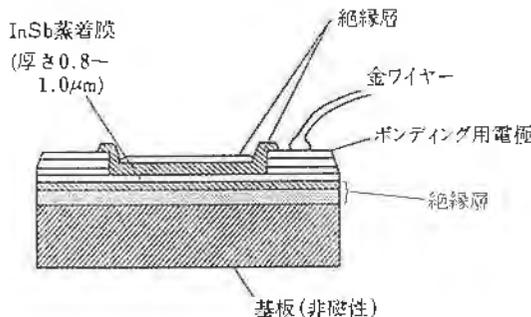


図-6 ホール素子断面図

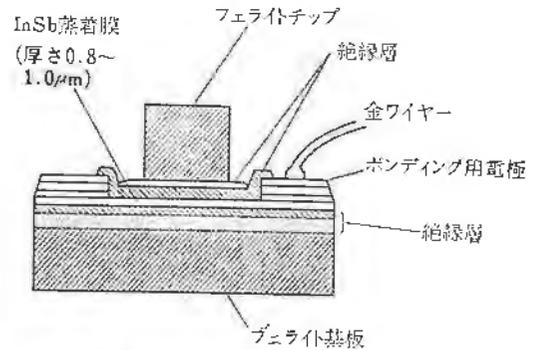


図-7 ホール素子断面図(磁気増幅型)

増幅は容易に実現される。図-6 および図-7 には、こうした InSb 蒸着ホール素子の構造を断面図で示した。図-6 は第 I のタイプで、すなわち、磁気増幅のないタイプで V_H-B 特性に比例限界がなく、図-7 は、フェライトでサンドイッチして磁気増幅した構造のホール素子である。図-6 の例は、一般にホール素子基板としてセラミックなどが用いられる。図-7 の例では、ソフトフェライトをホール素子基板として用い、もう一方の強磁性体として、基板材料と同様のソフトフェライトの立方体片(磁気増幅チップと呼んでいる。)を用いている。

また、図-8 には、このようなホール素子が樹脂によりパッケージされている様子を断面図で示した。

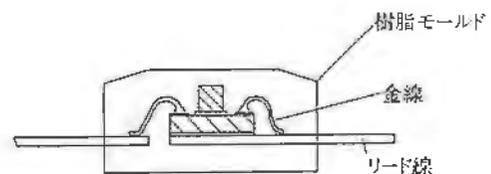


図-8 樹脂パッケージされたホール素子の断面図(HW-300A)

5. 高感度 InSb ホール素子の製作プロセス

ここでは、InSb の蒸着ホール素子の基本プロセスと真空蒸着について述べてみたい。

真空蒸着法でホール素子を製作する場合、前述したように、高い電子移動度をもつ InSb 蒸着薄膜の製作が問題となる。次に、この薄膜をフォトリソグラフィングして微小なホール素子パターンを形成

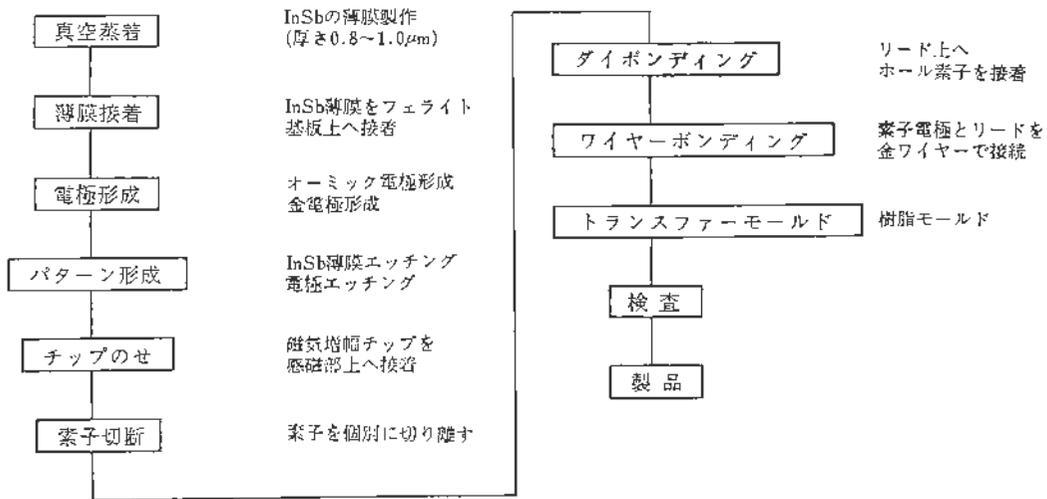


図-9 高感度 InSb ホール素子の製造工程

し、さらに、電極付け、磁気増幅用のフェライトチップのせ、リード線のボンディング、樹脂モールドなどの工程を経てホール素子は製作される。図-9にこのようなホール素子製作のプロセスのフローチャートを示した。

真空蒸着工程では、ホール素子の基本特性を定める InSb の薄膜特性が定まり、エッチング工程では、ホール素子の入出力抵抗値、定格特性などが設計値にそって定まり、以降の工程で、ホール素子のリード線付けや、パッケージ、検査などを行う。真空蒸着の工程を除くと、一般の半導体素子の製作工程に準じた製作工程であり、高感度 InSb ホール素子特有のプロセスとしては、磁気増幅用のフェライトチップ (0.3~0.5mm角の立方体) をのせる工程がある⁵⁻⁸⁾。

さて、InSb のホール素子を、真空蒸着によって製作するときの最大の問題点は²⁾、いかにして電子移動度の高い薄膜を得るかである。膜厚が $1\mu\text{m}$ 以下で、電子移動度 μ_H が $10,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 以上の InSb 蒸着膜を工業的に得る真空蒸着法として、いくつかの若干異なる考え方に基く方法が提案されている。それぞれの方法で、いくつかの条件を適当に選ぶことにより、電子移動度 μ_H が、 $10,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 以上のものを製作することが可能である。また、実験室的には、この限りではないことはもちろんである。

さて、InSb の蒸着をとくに難しくしている原因としては、In と Sb の蒸気圧の大きなちがいが

ある。このため、通常真空中で InSb の蒸着を行うと、基板上に被着した InSb の薄膜内で、In と Sb の原子比率が 1:1 すなわち、いわゆる化学量論的組成にならず、そのため形成された薄膜の半導体特性が極端に低下してしまうという問題がある。また、もう一つの問題は、蒸着によって作られる薄膜は多結晶であり、この結晶粒子の大きさが半導体特性を大きく左右するが、この結晶粒子の状態が蒸着条件によって大きくかわる点である。従って、これら半導体特性を左右する因子を適切に制御しないと良特性の InSb の蒸着膜は得られない。

一般に InSb の蒸着の条件は、 10^{-6} Torr 台で InSb を加熱蒸発させると同時に、対向して上部にセットされ、加熱されている蒸着基板上に InSb の薄膜を被着形成する。しかし、このようにして蒸着を行なった場合、蒸発源より蒸着の初期は、蒸気圧の高い Sb 原子が多く蒸発し、後期には、残留した In が主として蒸発する。一方基板上では、圧倒的に蒸気圧の高い Sb 原子の再蒸発が大きい (Sb 原子の被着確率が In 原子に比較して小さい)。

この結果、形成された蒸着膜は、In 原子が Sb 原子より多くなり、化学量論比よりずれることになる。さらに、In と Sb 原子の比率は膜厚方向でもかわってくる。基板近くは 1:1 に近く、表面では In が多い組成となる。このため高い電子移動度の薄膜を得ることは難しい。

このように、InSb 薄膜を真空蒸着によって形成するには、困難な問題が多く、高感度 InSb ホール素子の用の薄膜を大量に、かつ低コストで生産する工業的技術の新規開発が必要であった。このため、大型の真空装置の検討、真空中での薄膜形成条件の検討、基板の選択、などの数多くの条件を検討した結果、高感度 InSb ホール素子に独自の工業的真空蒸着法を確立し、それまで、不可能であった、厚さ $1.0\ \mu\text{m}$ 以下で、電子移動度 $20,000\sim 30,000\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ の InSb 薄膜の製造が可能となった。

すなわち、InSb の高電子移動度薄膜をうる方法として、旭化成では薄いマイカを基板として用い蒸発源としていくつかのポートを使用、かつ、基板温度を被着する InSb 薄膜の厚さに応じて最適制御することによって、化学量論的組成に近い高電子移動度の InSb 薄膜を得る方法を開発した。

この方法は、工業的に多結晶の薄膜で、かつ、厚さ $1.0\ \mu\text{m}$ 以下という薄さにもかかわらず電子移動度 $20,000\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 以上のものが比較的容易に、安定して生産できる特徴をもっている。さらに、InSb 蒸着において重要なことは、蒸発源に用いる InSb の純度と基板の表面状態である。

蒸発源に用いる InSb はできる限り高純度がよく、高純度の Non-Dope のものが望ましい。

蒸着の基板としては、高温下で安定で、加熱による不純物の放出や分解のおそれがなく、かつ、表面がなめらかで、絶縁性のあることが必要である。また、表面の粗さについても、なめらかな鏡面であることが薄膜特性の向上にとって好ましい。このような観点より、マイカが選択されている。

次に、この方法で作られた InSb 薄膜の特性をみる。図-10に、厚さ $1.0\ \mu\text{m}$ の InSb 蒸着膜の抵抗率の温度依存性を示した。横軸は、絶対温度の逆数である。図-11には、同じ蒸着膜の電子移動度の温度依存性を示した。この図からわかるように電子移動度は、室温付近であまり変化しない。低温度で、電子移動度は少し下がる傾向がある。

この電子移動度の室温付近での温度特性によって、蒸着ホール素子は定電圧入力を行って駆動する場合、第2式より、ホール電圧の良好な温度特

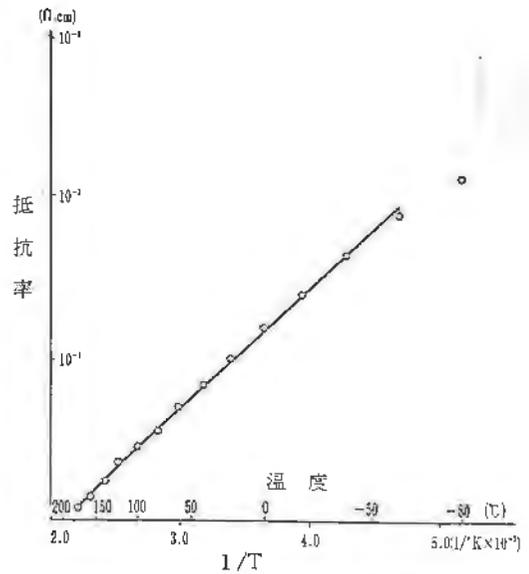


図-10 InSb 蒸着膜の抵抗率の温度依存性

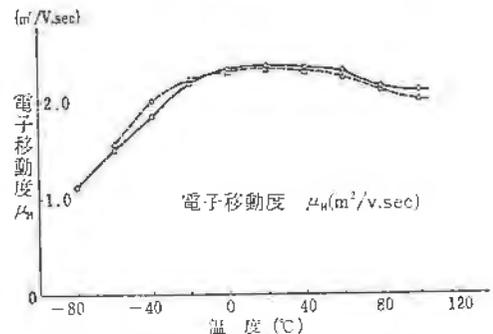


図-11 InSb 蒸着膜の電子移動度の温度依存性

性を示すことが予想される。一方、定電流駆動する場合には、第1式からわかるように、ホール出力はホール係数に比例するので、上記のような少い温度依存性を示さない。

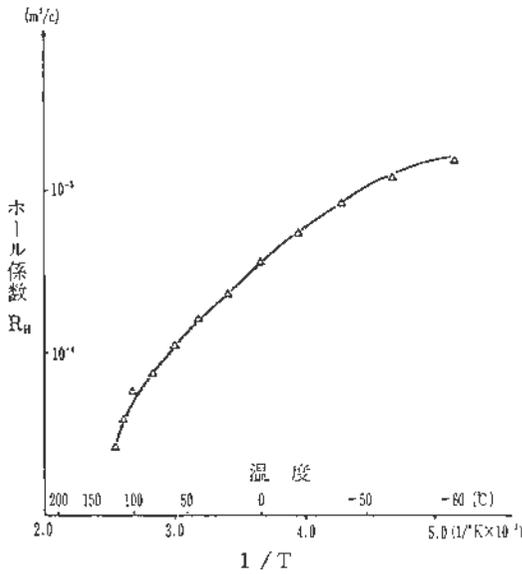
図-12は、ホール係数の温度依存性を示した。ホール係数 R_H 、電気伝導度 σ との間には、電子移動度 μ_H を介して

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma$$

で示される関係があり、 R_H の大きな温度依存性は、電気伝導度 ($1/\sigma$ は抵抗率) の大きな温度依存性の故であることを示している。

この温度依存性は、温度上昇に伴う伝導帯の電子濃度増加に帰因する。

ここに述べた、 μ_H と R_H の温度特性の差は、ホ



図一12 InSb 蒸着膜のホール係数の温度依存性

ール素子を製作したとき、式(1)と(2)のホール出力電圧の温度依存性の差として現われる。

上述の方法で製作した InSb 薄膜を用いると、ホール素子の入力抵抗値を数百オームに設計でき、定電圧駆動ができるホール素子が簡単につくられる。また、このように、素子抵抗値が大きいと、

駆動電流も少なく済み、ホール素子の消費する電力も少ないホール素子製作が可能である。この点は、他の材料や単結晶を用いてはできない性質であり、高感度 InSb ホール素子の大きな特徴の一つとなっている。

6. 蒸着ホール素子の基本特性

InSb ホール素子は、第4項で述べた2つのタイプがある。もっとも基本的なものは、セラミックの非磁性基板上に製作された構造を有するものである。旭化成では、HW-300C ホール素子として実用化している。さらに実用上のホール素子としてもっとも重要なものは、磁性体による磁気増幅により高感度化したもので、HW-300A として実用化している。表一4および表一5にこれら代表的な蒸着ホール素子の基本仕様を示した⁹⁾。また、図一13には外型図を示した。

ここで、HW-300C は図一6の基本構造を有するホール素子であり、HW-300A は図一7の構造を有する磁気増幅型のホール素子である。さて、ホール素子の感度は、入力電圧1V、磁束密度500Gのときのホール電圧 V_H の値で示されている。また、不平衡電圧 V_u の値は、入力が1Vで磁束

表一4 高感度 InSb ホール素子の仕様 (HW-300C)

(a) 最大定格						
項目	記号	測定条件	定 格		単 位	
最大入力電流	I_c	40°C 定電流駆動	20		mA	
最大入力電圧	V_{in}	40°C 定電圧駆動	2.0		V	
動作温度			-20~100		°C	
保存温度			-40~110		°C	
(b) 電気的特性 (測定温度25°C)						
項目	記号	測定条件	最小値	標 準	最大値	単 位
ホール出力電圧	V_H^*	定電圧駆動 $B=500G, V_{in}=1V$	31		74	mV
入力抵抗	R_{in}	$B=0G, I_c=0.1mA$	240		550	Ω
出力抵抗	R_{out}	$B=0G, I_c=0.1mA$	240		550	Ω
不平衡電圧	V_u	$B=0G, V_{in}=1V$	-7		7	mV
出力電圧の温度係数	α_{HI}	20°C 基準 0~40°C 間の平均 $B=500G, I_c=5.0mA$			-2	%/°C
入力抵抗の温度係数	α_R	25°C 基準 0~40°C 間の平均 $B=0G, I_c=0.1mA$			-2	%/°C
直 線 性	β_L	$I_c=10mA$ 不平衡分を除き $B=0, 500, 9KG$ の3点測定			5	%
絶 縁 抵 抗		100V D. C.	1.0			M Ω

* V_H は、実測の出力端子間電圧から不平衡電圧 V_u を差し引いた値。

表-5 高感度 InSb ホール素子の仕様 (HW-300A, 磁気増幅型)

(a) 最大定格

項目	記号	測定条件	定格	単位
最大入力電流	I_c	40°C 定電流駆動	20	mA
最大入力電圧	V_{in}	40°C 定電圧駆動	2.0	V
動作温度			-20~100	°C
保存温度			-40~110	°C

(b) 電気的特性 (測定温度25°C)

項目	記号	測定条件	最小値	標準	最大値	単位
ホール出力電圧	V_H^*	定電圧駆動 $B=500G, V_{in}=1V$	122		274	mV
入力抵抗	R_{in}	$B=0G, I_c=0.1mA$	240		550	Ω
出力抵抗	R_{out}	$B=0G, I_c=0.1mA$	240		550	Ω
不平衡電圧	V_u	$B=0G, V_{in}=1V$	-7		7	mV
出力電圧の温度係数	α_{HI}	20°C基準 0~40°C間の平均 $B=500G, I_c=5.0mA$			-2	%/°C
入力抵抗の温度係数	α_R	20°C基準 0~40°C間の平均 $B=0G, I_c=0.1mA$			-2	%/°C
絶縁抵抗		100V D.C.	1.0			M Ω

* V_H は、実測の出力端子間電圧から不平衡電圧 V_u を差し引いた値。

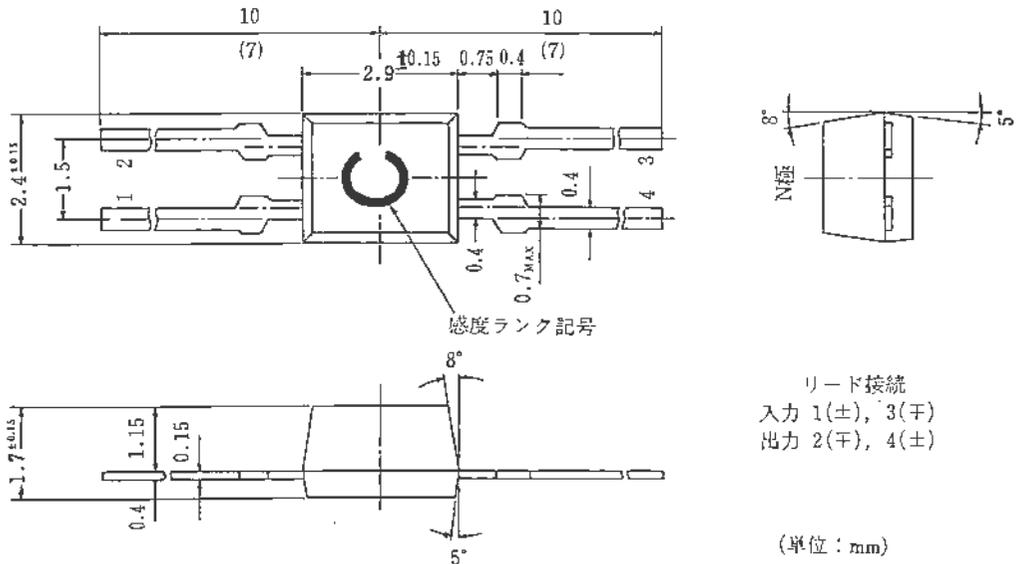


図-13 高感度 InSb ホール素子の外形図 (HW-300A)

密度 $B=0$ のときの出力端子間の電圧であらわされている。不平衡電圧はホール電圧 V_H と比較して、きわめて小さく抑えられており、 V_u/V_H ($B=500G$) の値は、表 5 では $\pm 5\%$ 以内である。HW-300A, すなわち、図-7 のような構造の

実用蒸着ホール素子は、フェライトによる磁気増幅幅により、ホール電圧 V_H の値が、磁気増幅のない場合と比較すると約 3~5 倍大きくなっている。一方、磁束密度に対するホール電圧の比例域が限定される。

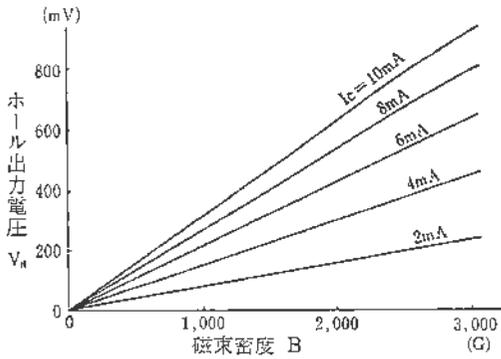


図-14 HW-300C ホール素子の V_H - B 特性
(定電流駆動)

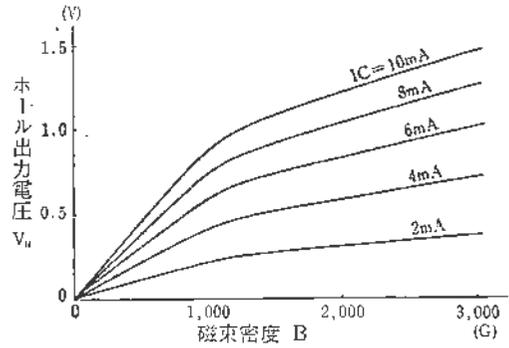


図-16 HW-300A ホール素子の V_H - B 特性
(定電流駆動)

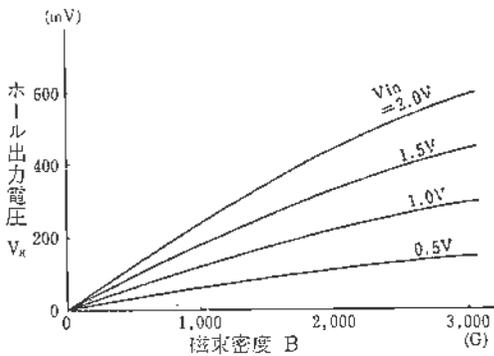


図-15 HW-300C ホール素子の V_H - B 特性
(定電圧駆動)

次に、これらの素子の特性をみてみよう。

図-14は、基本となる HW-300C タイプの蒸着ホール素子のホール出力電圧 V_H と磁束密度の関係すなわち、 V_H - B 特性を定電流入力駆動の場合につき示した。

図-15では、定電圧駆動の場合の V_H - B 特性である。いずれの場合も磁束密度に対する比例性は良い。図-15の定電圧駆動の場合に高磁界側で磁束密度比例性が定電流駆動の場合とくらべてちがっているのは、磁界により InSb 薄膜が磁気抵抗効果を生ずることに帰因する。すなわち、入力抵抗値が、磁束密度の自乗に比例してごくわずかに増加する磁気抵抗効果による。この効果は、電子移動度の大きい材料ほど大きい。電子移動度が大きい InSb 薄膜を使い限り、磁気抵抗効果の影響が現われるが使用上は無視できる。

次に、図-16に HW-300A すなわち、フェライトサンドイッチによる磁気増幅型の実用蒸着ホール素子の V_H - B 特性を示す。図-16は、定電

流駆動の場合である。ホール出力電圧の磁束密度比例性がフェライトの磁化の飽和により、第4項で述べたように、1K.G 付近で折れまがるのが特徴である。この比例域の大きさは、一般には、磁気増幅率でちがってくる。通常は若干の余裕をみて500~800Gの範囲でこの比例域の上限を決めている。

次に、実際によく使われる駆動条件である定電圧入力駆動の場合の V_H - B 特性を図-17に示した。この場合も、定電流の場合と比較してホール素子の入力抵抗の磁気抵抗効果による若干のホール電圧の低下が高磁界側で若干みられる。DC モータなどにホール素子を使用する場合の磁界の磁束密度は、ほとんどの場合このホール素子の比例域内である。

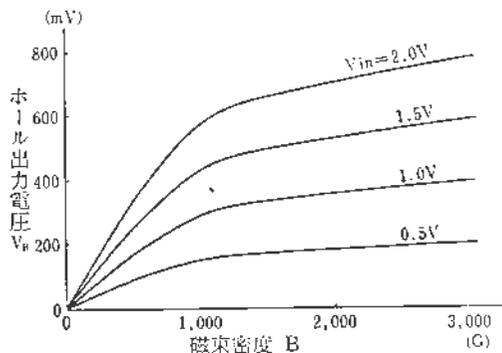


図-17 HW-300A ホール素子の V_H - B 特性
(定電圧駆動)

小型モータでは、ホール素子を十分磁束密度の大きい場所に置くことが設計上むずかしい場合も多く、低磁界で高出力電圧が要求される。このような使用上の問題に対しては、 V_H - B 特性の比

例域は、低磁界でよく、その代り、磁気増幅による高感度化が必要となる。HW-300A ホール素子は、このような使用上の要求に対して十分に成えるようその基本性能が設計されており、図-16, 17は、代表的な V_H-B 特性の例であり、通常は比例域または、感度ランクによっていくつかの種類がある。

次に、実用上非常に重要なホール素子の温度特性について述べる。

ホール素子のホール出力電圧の温度依存性と入、出力抵抗値の温度依存性があり、どちらも使用上重要である。従って、InSb 蒸着ホール素子の温度特性は、InSb 蒸着膜の温度特性、すなわち、電子移動度、ホール係数、抵抗率によって定まる。

ホール出力電圧の温度特性を考える場合、磁気増幅構造を有するものは、使用されている磁性材料の温度特性を考慮しなければならない場合がある。これは、とくに温度依存性の大きなフェライト材料を使用した場合や、キューリー点付近でのホール出力電圧の温度特性を考える場合に相当し、実用的なホール素子の磁気増幅材料であるフェライトは、ホール素子の使用温度範囲で温度変化の少ないものが使われており、かつ、キューリー点は、使用温度範囲より、かなり高い材料が選ばれている。このため、ホール素子のホール出力の温度依存性を考えるに当り、とくに磁気増幅による影響を考える必要はない。

InSb 蒸着ホール素子は、従って、図-6, 図-

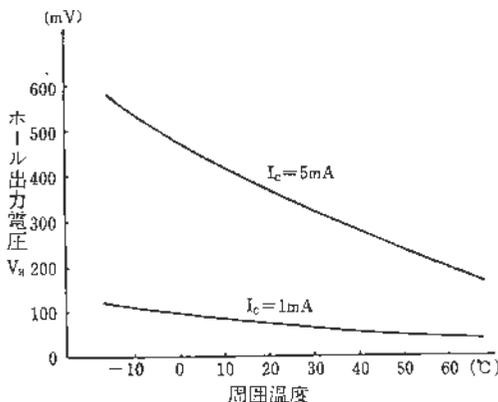


図-18 ホール出力電圧の温度依存性 (定電流駆動, HW-300A) 磁束密度一定

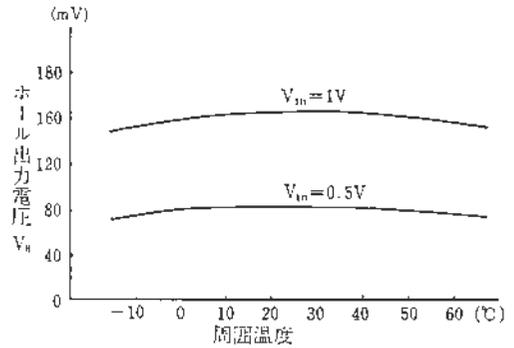


図-19 ホール出力電圧の温度依存性 (定電圧駆動, HW-300A) 磁束密度一定

7の両タイプとも同一のホール電圧の温度依存性を示し、さらに、抵抗値の温度特性も両者共通である。

さて、図-18, 図-19は、フェライトサンドイッチによる磁気増幅型ホール素子のホール出力電圧の温度依存性を示したものである。

図-18には、ホール出力電圧の定電流入力駆動時の温度特性を示し、図-19には、応用上重要な定電圧入力駆動におけるホール出力電圧の温度特性を示した。

ここで明らかなように、定電流入力の場合は、大きなホール電圧の温度依存性があるが、これは、ホール係数の温度依存性と対応するものであり、通常、 $\frac{1}{V_H} \cdot \left(\frac{dV_H}{dT} \right)_{I_C = \text{一定}} \approx -1.9\%/deg.$ である。

一方、図-19に示された定電圧入力駆動の場合の温度依存性は室温付近でフラットであり、温度がかわってもあまり変化しない。

これは、第5項図-11に示されている電子移動度の温度依存性に対応している。実際、温度係数は、 $\frac{1}{V_H} \cdot \left(\frac{dV_H}{dT} \right)_{V_m = \text{一定}} = +0.18\%/deg$ (低温部) および、 $-0.17\%/deg$ (高温部) であり、きわめて良好な温度特性である。

このような、ホール出力電圧の温度依存性は第4項、図-6の基本的なホール素子も、図-7のタイプのホール素子にも全く共通の特性であることは、上述した通りである。

蒸着ホール素子では、このような良好なホール出力電圧の温度依存性を実用素子特性として利用するため、技術的に重要な考慮がなされており、ホール素子の実用性を高める大きな特徴となって

いる。すなわち、蒸着 InSb ホール素子では、ホール素子の入力抵抗値が、定電圧駆動を行ないやすう高抵抗値（数百Ω以上）で設計されていることである。

この条件は、InSb の蒸着膜厚を $1\mu\text{m}$ 以下とし、高いシート抵抗値を得るとともに、ホール素子の感磁部パターンで、 $\frac{l}{w}$ の最適設計がなされることで初めて、実用素子として実現できた。ホール素子の高感度性を実現しようとするとき、電子移動度は、大きくする必要がある。そうすると、ホール素子の入力抵抗値は、薄膜のシート抵抗が下るため必然的に下がる。これをカバーするため、InSb 蒸着膜をうすくすることが必須となる。従って、定電圧駆動の高感度 InSb ホール素子の実現のためにそれまでなかった蒸着技術の向上と膜特性として、厚さ $1.0\mu\text{m}$ 以下で、かつ、 $20,000\sim 30,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ の電子移動度の InSb 蒸着膜が要求された。

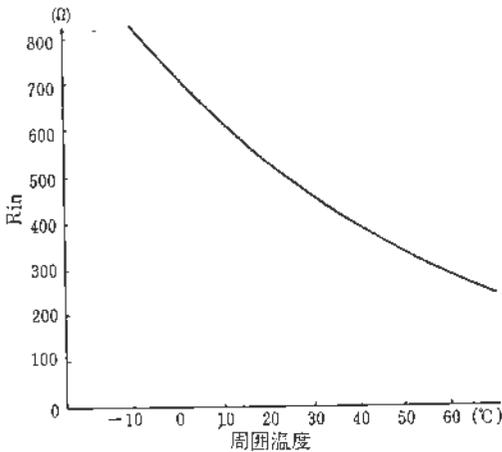


図-20 HW-300A ホール素子の入力抵抗値の温度依存性

次に、図-20にホール素子の入力抵抗の温度依存性を示した。これは、

$$\frac{1}{R_{in}} \cdot \left(\frac{dR_{in}}{dT} \right) = -2.0\%/\text{deg}$$

である。

ホール素子の出力抵抗値も全く同様の温度依存性を示す。

図-21は、ホール素子のホール出力電圧がホール素子を駆動する電流にどう依存するかを示す $V_H - I_c$ 特性である。入力制御電流による発熱で、

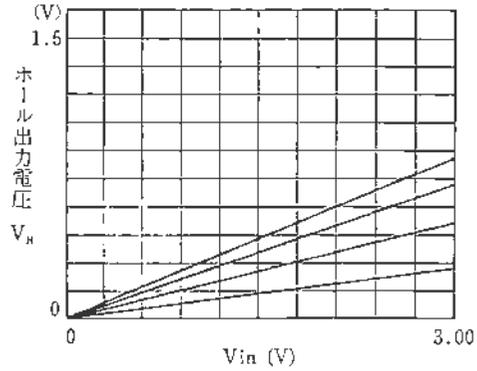


図 22 HW-300A ホール素子の $V_H - V_{in}$ 特性

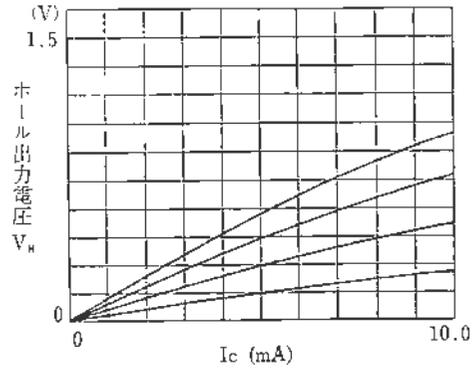


図 21 HW-300A ホール素子の $V_H - I_c$ 特性

ホール電圧の電流比例性すなわち(1)式からのごとくわずかのずれがみられる。さらに、図-22は、 $V_H - V_{in}$ 特性である。この場合式(2)からのずれはほとんどみられず、直線的に変わるのみである。

以上述べたように、 $V_H - I_c$ または、 $V_H - V_{in}$ 特性で、実用上のホール素子では、ごくわずかではあるが、上記のような素子温度の上昇による現象が特性上にあられる。しかし、ホール素子使用時は、入力電圧、または、入力制御電流を一定にして使用するので使用上は全く問題にはならない。

最後に、高感度 InSb 蒸着ホール素子のもう一つの特徴は、低消費電力で高いホール出力電圧が得られることである。これは駆動電流が少いという特徴でもあり、使用上、きわめて有利であることは言うまでもない。とくに電源が小さい状況でのホール素子の駆動で有利であり、薄膜を使用す

る蒸着ホール素子の高感度、高出力特性が生かされる。

7. 結 論

ホール素子は、半導体素子の中ではごく最近その応用が拡大した素子であり、とくに、オーディオ用のモーターや VTR のモーターの駆動用センサとしての用途が多い。

旭化成において開発された高感度蒸着 InSb ホール素子は、低電力消費、高感度などのいくつかの有利な特徴を有しており、当初問題視された InSb の温度特性の問題は、定電圧駆動素子の設計により解消した。このことにより、精密モーターなどを中心として、応用が拡大しつつあるが、上記の如き特徴を生かして、新規な応用や新しいデバイス設計などにより、一層の進歩が期待される。そのためには、製作する側からも、使う側からも新しい考え方、アイデアなどを積み重ねていくことが、これからも必要である。

さらにホール素子そのものについても、今後ま

ずます用途の拡大に伴い、改良、性能アップなどが要求されており、将来が期待されている状況である。

最後に、旭化成において、本開発のホール素子は、多くの人々の協力の上で実現したことを記したい。

本稿を書くに当り、情報機材技術開発総部酒井次長には、終始協力していただいた。心から感謝したい。

【参考文献】

- 1) 「磁電変換素子」片岡照栄著 日刊工業新聞社 (1972年)
- 2) 「磁電変換素子の構造と応用」 H. Weiss 著 (片岡照栄訳) コロナ社
- 3) 「蒸着ホール素子とその特性 (半導体素子の先端技術集成) 経営システム研究所 (1959年)
- 4) 特公 昭51-45234
- 5) 特公 昭53-46675
- 6) 特公 昭54-33115
- 7) 特公 昭53-46676
- 8) 特開 昭58-153384
- 9) 旭化成電子㈱ ホール素子カタログ