

高感度 InSb ホール素子

High Sensitive Hall-effect Device

難波 正治* 河本 信彦**
Masaharu Nanba Nobuhiko Kawamoto

I. ま え が き

最近のエレクトロニクスめざましい発展によって、電子機器の小形化、高信頼性などの高性能化が実現し、Si 素子はすでに IC の形にまで固体化されているが、一方信号入力を電気信号に変換するトランスジューサは半導体化の最もおこなわれている部門であり、逆に1970年代最も期待されてよい部門である。磁電変換に関しても10年以上も前からすぐれたホール素子が存在していたが、従来これらが計測用センサとして考えられ使用されることが多かったこと、および素子自身が量産に不適当な形態をもっているため高価格であったなどの理由から、大量の需要はまったくなかったといってもよい。最近DCブラシレスマイクロモータにホール素子が使用されるようになり、われわれもこれに呼応して量産形式のホール素子製造態勢をととのえた。当社のホール素子は計測用素子と異なり、直線性、温度依存性などをあまり問題とせず、信号変換の機能に関する高効率化、小形化を目的としたものである。ここではこのタイプの素子の動作原理および当社製ホール素子の特性についてのべる。

II. ホール効果

古典的取扱いにしたがって、結晶中の等方性の有効質量 m^* をもつ自由電子のガスを考えると、電界 \vec{E} 、磁界 \vec{H} の下でその運動方程式は定常状態において

$$m^* \frac{v}{\tau} = -e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{H} \right)$$

と書ける。ここで τ は電子の平均寿命である。いま磁界方向を Z 方向に選べば、電子の運動速度に対して

$$v_x = -\frac{\mu}{1+\xi^2} (E_x + \xi E_y) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$v_y = -\frac{\mu}{1+\xi^2} (E_y - \xi E_x) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{ただし } \mu = \frac{e}{m^*} \tau, \quad \xi = -\frac{\mu}{c} H$$

をうる。いま $j_y = j_z = 0$ 、すなわち外部電界を x 方向に与えれば、 y 方向にホール起電力

$$E_y = \xi E_x = -\frac{\mu}{c} H E_x \quad \dots\dots\dots(3)$$

が発生し、なんらかの方法でこの起電力を短絡してしまえば式(1)から

$$j_x = \frac{ne\mu}{1+\xi^2} E_x$$

の形で磁気抵抗効果が現われる。ここに n は電子濃度である。今、結晶の厚みを d 、電流を I として式(3)を書き直せば、ホール電圧 V_H はよく知られた形

$$V_H = -\frac{1}{nec} \frac{I \cdot H}{d} = R_H \frac{I \cdot H}{d} \quad \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。ここに $R_H = -1/nec$ はホール係数とよばれる量である。

式(4)はホール素子の積感度 ($V_H/I \cdot H = \text{mV/mA} \cdot \text{kGauss}$) が結晶のホール係数に比例し厚みに逆比例することを表わしているが、実際の素子、特に位置検出に使用するものでは、強磁性体に結晶をサンドイッチして外部磁束を集束し、素子に働く有効磁界を外部にくらべ数倍高める構造がとられている。

したがってホール素子においては材料の選択、薄膜化技術(蒸着技術あるいは機械的研磨、化学研磨技術)および集束構造が特性の良否を決定する。

III. 高感度 InSb ホール素子

従来ホール素子材料にはゲルマニウム系と III-V 化合物系のものがある。前者は後者にくらべ一般にバンド幅が広いため、高純度のものが広い温度領域で使用できるため積感度が大きく、かつ容易に手に入る材料であるためわが国では計測用には後者より広く使用されていた。III-V 化合物結晶特に InSb, InAs の特長は後述するように電子易動度がほかの材料に比し極端に高いことである。したがって結晶を極端に薄くしても適当な抵抗値を保つからほかの材料にくらべ大きい制御電流を流して高い起電力をうるということが可能であると同時に集束効果を有効に活用できる。このためングナルプローブ用ホール素子としては集束構造をもった InSb 系に限られている。主としてブラシレスDCマイクロモータ用(回転子の位置検出)に当社が発表しているホール素子(後出)もすべてこのタイプである。ホール素子の出力は、式(4)からわかるようにキャリア濃度に直接関係する。この点

* 中央研究所 ** 松本工場

InSb の場合には下記の理由から ホール係数に関し高い再現性が期待できる。

ここでは InSb 素子の出力限界を結晶特性, 集束効果を考慮して求めてみよう。

1) InSb 結晶の電気特性 (易動度, ホール係数)

InSb 結晶の特長は第一にバンド幅が極端に狭く ($0.27 - 3 \times 10^{-4} \text{ T e.v.}$), 第二に電子易動度が大きくかつ電子易動度 μ_n と正孔易動度 μ_p の比 $b = \mu_n / \mu_p$ が大きい ($b \cong 100$) ことである。したがって n 形結晶では常に $n > n_i > p$ (ただし n_i は固有キャリア濃度, p は正孔濃度) であるから, ホール係数は純粋な結晶のホール係数 $R_H(n_i)$ より小さいが, P形 $p > n_i > n$ ではあるが比較的低温で $p = b^2 n$ が成立するためそれ以上の温度では見かけ上 n 形となり, ホール係数は $R_H(n_i)$ より大きい, そして少し純度のよい結晶では室温で固有領域にはいり R_H は $R_H(n_i)$ に収斂する。積感度からいえば適当にドーパされた P 形結晶の方が大きい, アクセプタ不純物には偏析係数が 1 に近い物質がなく均一性をもった結晶がえ難く, かつ易動度が低くて制御電流がとれない。すなわち純粋結晶が最適な素子材料であり, その場合, $n_i = 6.0 \times 10^{14} \text{ T}^{3/2} e^{-0.13/kT}$ といわれている⁽¹⁾。したがって $R_H = 376 \text{ cm}^2/\text{coulomb}$ (25°Cにおいて), 一方ホール易動度としては

$$\mu_H = \frac{\mu_n (nb^2 - p)}{b(nb + p)}$$

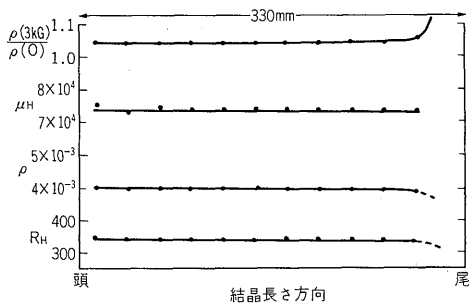
において $n = p = n_i, b = 100, \mu_n = 77,000 (T/300)^{-1.66} \text{ cm}^2/\text{volt} \cdot \text{sec}$

とおいた時の値

$$\mu_H \sim 0.99 \mu_n = 76,000 \text{ (} T = 300 \text{ °K において)}$$

をもつ。われわれもこれらの値にできるだけ近いホール係数, 易動度をもつ結晶, 具体的にはドナー濃度とアクセプタ濃度の差が $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以下になるようホール用結晶を作成している。

われわれの結晶は 5 nine のインジューム, アンチモンを出発物質とし, グラファイトポートをを用いたポート生成法ではぼ $28 \times 28 \times 330 \text{ mm}$ の結晶を作成している。



第 1 図 InSb 結晶の長さ方向における特性のばらつき

Fig. 1. Galvanomagnetic characteristics along the length of InSb ingot at room temperature

結晶性の目安をかねて R_H, μ_H および磁気抵抗を測定しているが, たとえば結晶の長さ方向のばらつきは, 第 1 図のように, 75~90%の範囲で 25°Cにおける $R_H = 345 \pm 10 \text{ cm}^2/\text{coulomb}, \mu_H = 74,500 \pm 1,500 \text{ cm}^2/\text{volt} \cdot \text{sec}$ に収まっている。

2) 強磁性体柱による磁束の集束効果

結晶は適当な厚みのウエハに切断する。このウエハを基板に接着し, さらに所要特性に応じて 5~20 μm まで機械的もしくは化学研磨した後ウエハプロセスによりパターンエッチングして各パターンごとに基板ごと切断すれば 1 枚のウエハから数十~100個の素子とれる。

当社のホール素子ではさらに高感度化を目的として透磁率の大きい強磁性体で外部磁束を集め, この実効磁界を結晶に与える手段がとられている。具体的にはフェライト基板に結晶が接着され, リード端子部をのぞく結晶の有効面にフェライト柱が立っている。いま外部平等磁界の強さを H_0 (Ampere-turn/m), フェライト内部の磁界の強さを H (Ampere-turn/m), フェライトの磁化の強さを J (weber/m²), 真空の透磁率を μ_0 (Henry/m), フェライトの比磁化率を χ^* とする。 H_0 の作用のもとに磁化されたフェライト内部の磁界の強さ H は, 自己減磁作用のため

$$H = H_0 - \nu J \tag{5}$$

小さくなっている。ここに ν は自己減磁率である J は

$$J = \chi^* \mu_0 H$$

であるから, 式(5)より

$$H = \frac{H_0}{1 + \chi^* \nu \mu_0}$$

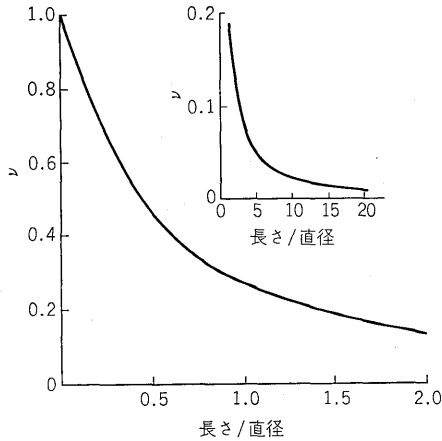
したがってフェライト内部の磁束密度 B は外部磁束密度 B_0 に対し χ^*, ν の関数としてつぎのように変化する。

$$B = \frac{1 + \chi^*}{1 + \chi^* \nu \mu_0} B_0 \tag{6}$$

一般には χ^* が 1 より充分大きい状態で使用されて集束効果が発揮されるものであるから, その時式(6)は

$$B \cong \frac{1}{\nu \mu_0} B_0 \tag{7}$$

となる。フェライト柱に厚み 10 μm 程度の結晶が接着されている状態では, 磁束連続の条件から柱内部とほぼ同じ磁束密度下に結晶がおかれていることになるから, 結局, 式(7)にしたがって集束率は $1/\nu \mu_0$ すなわち結晶を貫く磁束密度は集束柱の比透磁率に無関係に柱の形状のみによって決まる定数 ν に逆比例することになる。第 2 図は円筒の自己減磁率を示すものである。磁化の飽和点以上については, 簡単のために $J = J_s$ (const) になると仮定すると



第 2 図 強磁性集束円柱の形状と自己減磁効果

Fig. 2. The self-demagnetizing factor as a function of magnitude of height/diameter ratio in ferromagnetic cylinder

第 1 表 集束柱による出力感度 (式(7), (8)による)

Table 1. Open-circuit sensitivity of InSb Hall device with ferromagnetic jacket (according to eqs (7) and (8))

長さ/直径	ν	B (kGauss)		V_H (mV)	
		$J_S=4.5$ kG	$J_S=10$ kG	$J_S=4.5$	$J_S=10$
0	1	1	1	151	151
0.25	0.67	1.50	1.50	226	226
0.50	0.47	2.13	2.13	321	321
0.75	0.37	2.94	2.94	444	444
1.00	0.27	3.70	3.70	559	559
1.25	0.22	4.50	4.50	680	680
1.50	0.19	4.66	5.40	704	812
2.00	0.14	4.87	7.14	735	1,074

($B_0=1$ kGauss, $I=20$ mA, $t=5 \mu\text{m}$)

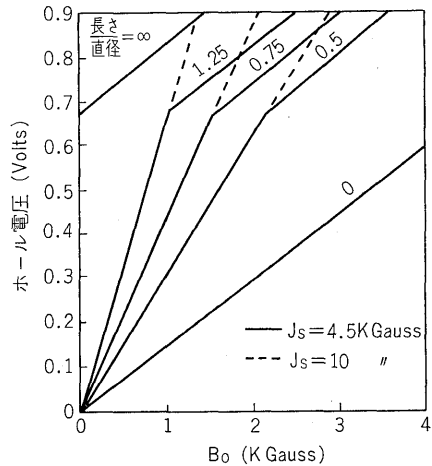
$$B = B_0 + (1 - \nu) J_S \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。すなわち $B_0 = \nu J_S$ に相当する外部磁束密度で飽和磁化に達し $B_0 < \nu J_S$ では式(7)が成立し $B_0 > \nu J_S$ では式(8)が成立する。したがって集束柱材料としては比透磁率よりむしろその材料の飽和磁束密度によって選択されるべきであり、かつ形状としては ν を小さくする方向、すなわち長さ/直径を大きくするほど高効率である。

第 3 図は純粋 InSb 結晶を用いた高感度ホール素子の外部磁界と出力関係を ν をパラメータとして計算したものであり、第 1 表は $B_0=1$ kGauss における起電力の ν による変化を式(7), (8)および第 2 図を用いて求めたものである。なお素子の抵抗は比抵抗 $\rho(\Omega\text{cm}) = R_H/\mu = 370/76,000 \sim 5 \times 10^{-3}$ であるから、長さ/幅=(制御電流方向)/(ホール端子方向の長さ)=2 の結晶層の場合には $R=10^{-2}/d$ したがって結晶層の厚み $d=5 \mu\text{m}$ では $R=20 \Omega$ 程度の抵抗をもつ。

IV. 富士ホール素子の特性と使用方法

現在当社で製造しているホール素子は 3. 2) で述べ

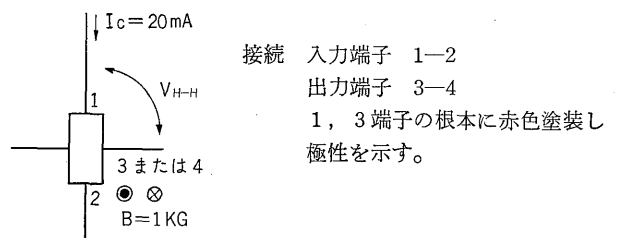
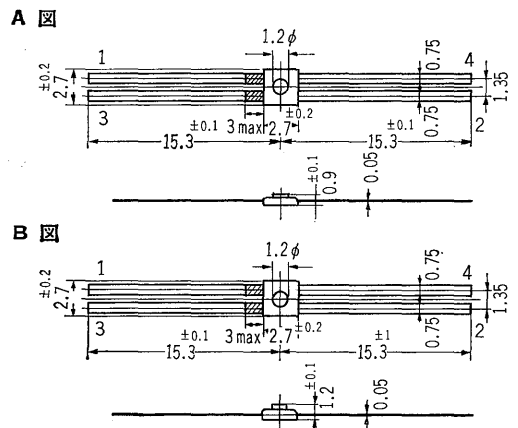


第 3 図 集束柱をもつ InSb ホール素子の出力特性 (計算値)
Fig. 3. Theoretical Hall output of InSb device sandwiched between ferromagnetic material

た感度向上および機械的強度、耐環境性、磁気回路中での損失の減少といった見地から、フェライトなどの強磁性体中に結晶層を挟んだ構造をとっている。その外形ならびに接続関係は第 4 図に示す。第 2 表はその特性である。

制御電流は図中の 1-2 端子間に流し、出力は用途により 3-4 端子、または 1 (または 2) と 3 (または 4) 端子間よりとり出し使いわける。素子の系列も第 2 表に示すように 4 端子使用と 3 端子使用の 2 系列が用意してある。

主な特性項目について説明すれば



第 4 図 ホール素子外形図および接続関係

Fig. 4. Dimension of Fuji Hall devices and connection diagram

第2表 富士ホール素子特性
Table 2. Characteristics of Fuji Hall device

1. 最大定格 (各タイプ共通)
 最大許容電流 (静止空气中 $T_a=60^\circ\text{C}$) I_{Cmax} 70 mA
 保存温度 T_{stg} $-20\sim+100^\circ\text{C}$
 半導体層温度 T_{max} $-20\sim+100^\circ\text{C}$
2. 4端子使用 (特に指定ない限り $T_a=25^\circ\text{C}$ とする)

	ENH 20H-07	ENH 20H-10	ENH 21H-10	ENH 21H-20	ENH 21H-30
無負荷ホール電圧 V_{H0} (mV)* ¹	150	250	250	400	600
無負荷不平衡電圧 V_0 (mV)* ²	± 7	± 13	± 13	± 20	± 30
制御電流 I_C (mA)	20	20	20	20	20
入力抵抗 R_i (Ω)	10~50	10~50	10~50	10~50	10~50
出力抵抗 R_o (Ω)	"	"	"	"	"
V_{H0} の温度係数 α (%/°C)* ³	約-2	約-2	約-2	約-2	約-2
R_i, R_o の温度係数 β (%/°C)* ³	"	"	"	"	"
外形	A	A	B	B	B

*¹ $I_C=20$ mA $B=1$ kG における値
 *² $I_C=20$ mA $B=0$ kG における値
 *³ $0\sim50^\circ\text{C}$

3. 3端子使用 (特に指定ない限り $T_a=25^\circ\text{C}$ とする)

	ENH 20S-07	ENH 20S-10	ENH 21S-10	ENH 21S-20	ENH 21S-30
無負荷出力電圧 V_{H-H} (mV)* ¹	150	250	250	400	600
制御電流 I_C (mA)	20	20	20	20	20
入力抵抗 R_i (Ω)	10~50	10~50	10~50	10~50	10~50
出力抵抗 R_o (Ω)	"	"	"	"	"
温度係数 (%/°C)* ²	約-2	約-2	約-2	約-2	約-2
外形	A	A	B	B	B

*¹ $I_C=20$ mA, $B=1$ kG において, 磁束を反転させた時の端子 1-3, または端子 1-4 間の電圧の差
 *² $0\sim50^\circ\text{C}$

1) 最大許容電流 I_{Cmax} (mA)

ホール素子に流しうる最大電流でいかなる場合でもこの値を越えてはならない。

2) 半導体層温度 T_{max} (°C)

InSb 結晶層の温度. いかなる場合もこの値も越えてはならない. ホール素子が磁界中におかれた場合, 2. で示した磁気抵抗効果によって抵抗が増加し温度上昇が起こるので注意を要する。

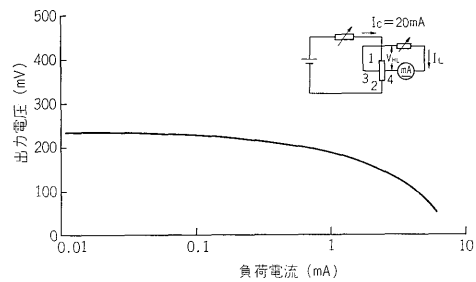
3) 無負荷ホール電圧 V_{H0} (mV)

出力端子間に負荷を接続しないで磁界を加えた時に現われる電圧, すなわち 2, 3 で取扱ったホール起電力である. 制御電流20mA, 磁界 1 kGauss の時を基準として最少値を示してある. 負荷をとった場合, 負荷電流と出力電圧の関係は第5図のようになる。

4) 無負荷不平衡電圧 V_0 (mV)

制御電流を流した時, 磁界を加えない状態で出力端子間に現われる電圧で, 出力端子の相互の位置の非対称, あるいは半導体層の抵抗の局部的不均一などの原因で生ずるものであるから, 少ないほど良く, 第2表に最大値で示してある。

5) 入出力抵抗



第5図 ホール素子の負荷特性

Fig. 5. Short-circuit output voltage vs. load current

入力抵抗(R_i) 1-2 端子間の抵抗値 (Ω)

出力抵抗(R_o) 3-4 "

によって示す。

6) 温度係数 α, β (%/°C)

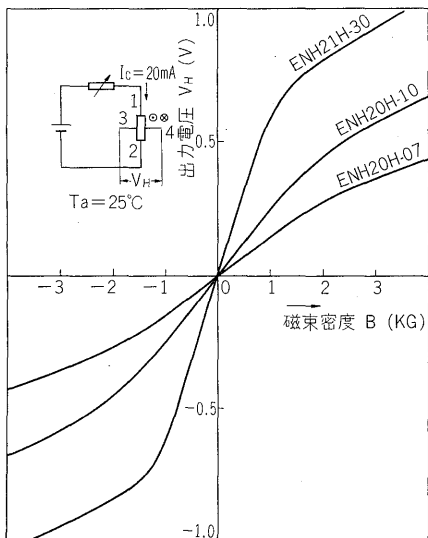
無負荷 ホール電圧 V_{H0} の温度係数 α , 入出力抵抗 R_i, R_o の温度係数 β について示す. 具体的な算出法は

$$\alpha = \frac{1}{x} \frac{dx}{dT} = \frac{\ln(x_2/x_1)}{T_2 - T_1} \times 100(\%/^\circ\text{C})$$

によって示す。

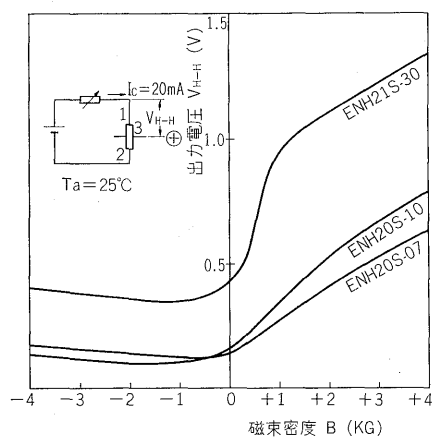
7) 無負荷出力電圧 V_{H-H}

磁界を加えた場合の 1-3 端子間の出力電圧で示す。



第 6 図 磁束密度—出力電圧関係 (4 端子使用)

Fig. 6. Open-circuit output voltage-magnetic field relations at $I_c=20$ mA of Hall devices when four terminals are used



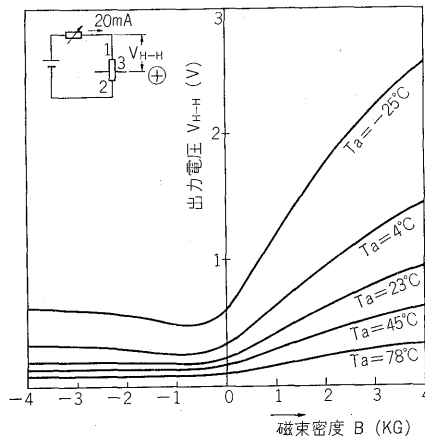
第 7 図 磁束密度—出力電圧関係 (3 端子使用)

Fig. 7. Open-circuit output voltage-magnetic field relations at $I_c=20$ mA when three terminals are used

$I_c=20$ mA, $B_0=1$ kGauss を基準として最少値を示してある。

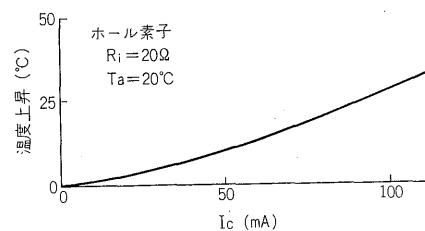
第 6, 第 7 図は, 4 端子使用形のホール素子 ENH20 H-07, 20H-10, 21H-30 のホール出力特性およびこれらに等価な 3 端子使用形素子の出力電圧 V_{H-H} を示したものである。また後者の温度変化は ENH20 S-10 につき第 8 図に示す。ホール素子を用いる場合, 制御電流としては半導体層温度を約 10°C の温度上昇以内に選ぶ。第 9 図は I_c によるホール素子の温度上昇, 第 10 図はホール素子の磁気抵抗効果の一例であるが, 素子間の抵抗のばらつきも考慮し, $I_c=30\sim 40$ mA までが妥当であろう。

出力あるいは抵抗の温度係数の大きさ (いずれも約 $2\%/^\circ\text{C}$) からみてわかるように, この素子はスイッチングの用途に使うことが適当である。定電圧電源に接続



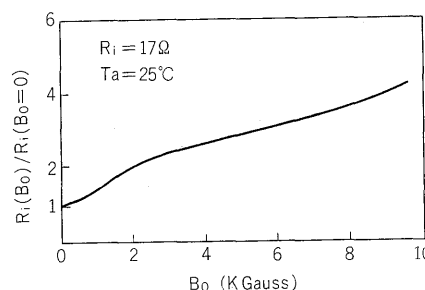
第 8 図 出力電圧特性の温度変化 (3 端子使用)

Fig. 8. Open-circuit output voltage-magnetic field relations of Hall device ENH 20 S-10 at various temperatures



第 9 図 制御電流によるホール素子の温度上昇

Fig. 9. Temperature rise vs. control current



第 10 図 ホール素子の磁気抵抗効果

Fig. 10. Normalized magneto-resistance of Hall device

して使用すれば, 入力抵抗減少が制御電流増加の形でホール出力電圧の変動を補償する。このホール素子の温度の限界は, 半導体層の温度で 100°C にとっている。この値を越えないよう注意して使用する必要がある。

V. ホール素子の信頼性

ホール素子は Si あるいは Ge 半導体と異なり使用量もきわめて少なく, したがってその信頼性に関する報告もほとんどなされていない。ここでわれわれの行なった信頼性試験の一端を紹介しホール素子を採用される上での参考に供したい。実施項目および条件は第 3 表のものである。

素子は任意に選んだ各 50 個について入, 出力抵抗をチ

第3表 ホール素子信頼性試験項目
Table 3. Items of reliability test for Hall device

項目	条件
1. 連続通電	70mA, 室温 (25℃ 中心), 3,000 時間以上実施
2. 間欠通電	70mA, 室温 1分 ON 5分 OFF 10,000回以上実施
3. 温度サイクル	-20℃と100℃間5サイクル以上
4. 高温放置	100℃, 200時間放置
5. 低温放置	-20℃, 200時間放置
6. 耐湿性	60℃, 90~95% 200時間放置

チェックした。その結果は

- | | | |
|--------------|-------|--------|
| (1) 連続通電試験 | 平均変化率 | 2%以下 |
| (2) 間欠通電試験 | " | 1%以下 |
| (3) 温度サイクル試験 | | 2%以下 |
| (4) 高温放置試験 | | 2%以下 |
| (5) 低温放置試験 | | 2.5%以下 |

(6) 耐湿試験 3%以下
のごとくで、まったく問題なく安心して使用しうるものである。現在はさらに多くの項目、さらに長期にわたる試験を継続中である。

VI. あとがき

この種のホール素子は昨年中頃よりブラシレスモータの本格的な立上りにより注目を集めるとともに多量に使用されるようになってきた。ホール素子を使用したブラシレスモータは特性がよく今後のコストダウンとともにいちじるしく伸びると考える。ホール素子としては、数量の伸びとともにトランジスタなみの価格にまでもってゆき多くの需要を喚起したいと考えている。

参考文献

- (1) InSb の特性については
O. Madelung: Physics of III-V Compounds,
John Wiley (1964)

発明の紹介

信号保持装置

(特許第 668084 号)

この発明は、電気的アナログ信号量の保持、およびアナログ入力、パルス入力、パルス数入力信号の積分出力の保持を、比較的簡単な回路で、長期間にわたって安定に行なわせることのできる信号保持装置に関するものである。

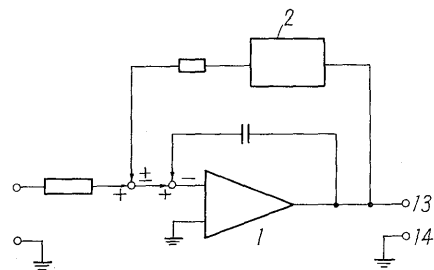
この種の信号保持装置として、ミラー積分回路が従来用いられているが、演算増幅器の入力換算ドリフトや積分コンデンサの絶縁抵抗および漏洩電流などの影響によって、被積分入力信号が零の時の出力が時間とともに変化するため、長時間にわたる信号の保持を行なわせることは困難であった。

この発明は、ミラー積分回路のように遅れ特性を有する演算増幅器 1 の出力を、この出力の大きさによって正帰還および負帰還信号を交互に与える非線形関数回路 2 を介して、入力に帰還させることにより、きわ

めて長時間の信号保持を可能にしたものである。

非線形関数回路としては、たとえばトンネルダイオードを直列接続したものが挙げられる。

出力の増大時における正帰還および負帰還の繰返し率を高めれば高めるほど、保持信号の分解能を高めることができる。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。