

自動車用GaAs Hall ICセンサの開発

Development of GaAs Hall IC sensor for Automobile Usage

関 英 男* 石 川 一 郎* 大 根 健 一*
Hideo SEKI Ichirou ISHIKAWA Kennichi OHNE

岡 本 久 順** 福 田 一 実**
Hisanori OKAMOTO Kazumi FUKUDA

要 旨

現在、自動車に用いられる車速検出は、要求精度に合わせてさまざまな方法が使われている。具体的には、検出可能な速度範囲と耐熱性上の制約から、高耐熱だが極低速が検出できないコイル方式と、停止まで検出できるが耐熱性上限界がある半導体方式を使い分けている。

近年、制御の高度化から、一部用途において低速検出への必要性が高まっている。又、部品の共通化の観点からも、高耐熱で極低速検出が可能なセンサが望ましい。

今回、耐熱性に優れたガリウム砒素半導体を用いて、高耐熱で極低速検出が可能なセンサを開発したので報告する。

ABSTRACT

Due to the limit of functions, several methods are used to measure driving speed. In concrete, the limits of speed range and heat toughness need proper use of coil type, which has good heat toughness and less sensitivity for low speed, and semiconductor type, which has enough sensitivity for low speed and lower temperature limit.

Lower speed sensing is required for up to dated control in several usage. Sensor which has adequate heat toughness and low-speed-sensitivity is convenient as parts commonality.

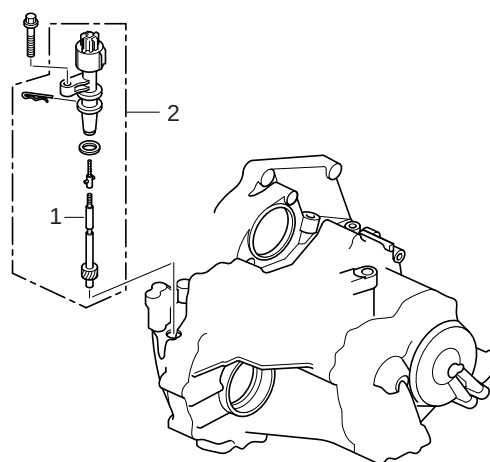
In this report, desirable sensor is developed by adopting garuium-arsenide semiconductor.

1. まえがき

車速の検出は車の制御の最も基本的な要素技術でありながら、未だ統一された方法が確立されておらず、さまざまな方法が採用されている。

現在最も一般的に、車速を生み出す駆動系ギアの回転検出用に使われている方法として、コイルと磁石を使った誘導起電力方式がある。この方式は耐熱性が高く構造も簡潔だが、原理的に極低速の対象・停止した対象の位置検出ができない。昨今、ナビゲーション用の位置検出の高精度化から、低速走行時の移動量も正確に把握したいという必要性があり、コイル方式に代わる半導体磁気センサ方式が採用されている。

一方一般的にこの様なセンサにおいては、検出したい回転対象はトランスミッションケースの中の様な高温となる雰囲気下にある場合が多い。その為、Fig.1の様にド



1 : Driven gear, 2 : Sensor Assy

Fig.1 Conventional speed sensor built-in transmission

*和光基礎技術研究センター

**栃木研究所

Table 1 Characteristics of conventional methods

Method	Light	Magnet	
Main device	Semiconductor	Coil	Semiconductor
Low speed	○	×	○
Heat toughness	△	○	△
Mist toughness	△	○	○
Construction	complicated	simple	complicated

ライブ／ドリブンギアを用いて、比較的高温でない位置まで回転を機械的に取り出せる構造を付加して検出している使用例が多い。又、磁気センサではなく、半導体光センサ方式を用いる場合もあるが、この場合は外部からの塵・水蒸気の影響を受けない様に頑強なシール構造が必要である。この為構造的に複雑になり、コストが高くなっている。各方法の比較をTable 1に示す。

本開発においては、停止状態からでも検出できる耐熱性の高いセンサを開発したので報告する。

2. 開発のねらい

本開発において従来方式に対し機械部構造をスリム化する為、次の要件を満足するセンサを開発することをねらいとした。

即ち、高耐熱の半導体センサを実現すること。具体的には、従来のシリコン(以下Si)半導体に比べ耐熱的に潜在能力の高いガリウム砒素(以下GaAs)半導体を用い、150℃以上で連続使用可能なセンサを実現することである。

この為の課題として次の項目が考えられる。

- (1)磁気検出素子として、S/N比や特性バラツキを考慮し、信号出力要求を満足すること。
- (2)GaAs半導体の持つ高耐熱性を活かせる構成を工夫すること。
- (3)GaAs半導体の材料コストが高いという問題を克服すること。

以下これらの課題に対する対策手法、開発したセンサについて示す。

3. 対策手法

3. 1. 検出原理

本センサの検出原理をFig.2に示す。

検出対象である回転しているギア(図中A)の近傍に磁石(図中B)を配置すると、磁石との間隔が狭いギア歯先の部分(図中C)には磁力線が集中し、歯底の部分(図中D)では疎になる。検出対象と磁石の間で、ちょうど歯

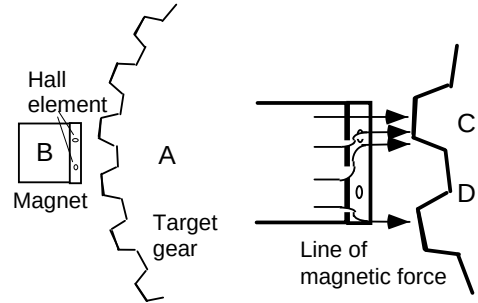


Fig.2 Sensing principle

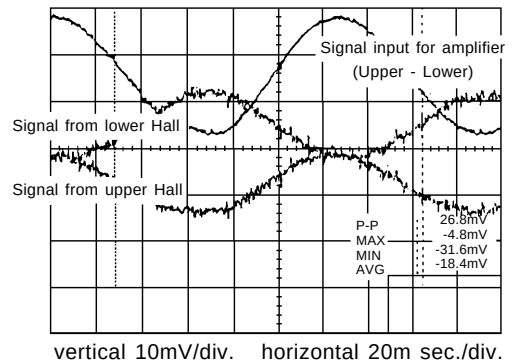


Fig.3 Signal from each sensor

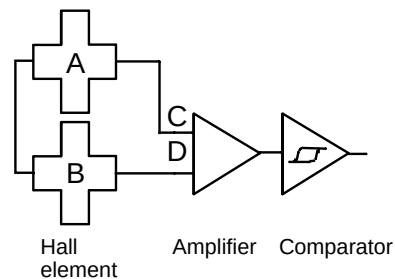


Fig.4 Circuit diagram

ピッチの半分の距離だけ互いに離れた位置に磁力線の疎密に応じた電気信号を出すHall素子を2つ配置すると、検出対象の回転によって個々の位相が180度(π)ずれたFig.3のような信号が得られる。この2つの信号は位相が異なる以外は、他のノイズ成分(例えば、電源ノイズ、バイアス磁場によるオフセットノイズ)が同じになる為、2つの信号の比較により純粋に回転だけが取り出せる。又、停止していても、ギアの歯先・底の位置(正確には、ギアの歯先がどちらのHall素子に近いかが検出できる。

基本原理を元にした回路構成をFig.4に示す。2つの信

号は次段のアンプで増幅され、コンパレータで比較され、最終的に回転に対応したデジタル信号を出力する。尚、得られたデジタル信号は、従来のコイルから得られるアナログ信号に比べて耐ノイズ性が高く、信号出力を送信する上でシールドが不要な為ハーネスコストが安くすむというメリットもある。

尚、本稿においては、以降磁気を検出する部分を素子、素子からの信号を処理する部分をIC、磁石を含めた全体をセンサと呼んで区別する。

3. 2. 磁気検出素子の特徴

Fig.4の構成において、図中のC点、D点の電位は次の様に表せる。

$$V_c = 1/2 \times (S_a \times B_o + S_a \times B_r(t)) + V_{off_a} \quad (1)$$

$$V_d = 1/2 \times (S_b \times B_o + S_b \times B_r(t + \theta)) + V_{off_b} \quad (2)$$

ここで

S_* : 素子*の感度(*=a,b)

B_o : バイアス磁場の強度

$B_r(t)$: 対象の回転に因って生じる磁場の変化

θ : 2つのセンサー位置の差から生じる位相差

V_{off_*} : 素子*の持つ出力誤差(*=a,b)を示す。

$B_r(t)$ は通常の伝達用ギアを対象とした場合、

$$B_r(t) = B_r \times \sin(2\pi \times g \times r \times t) \quad (3)$$

この様に近似できる。ここで

g : ギア歯数

r : 回転速度

である。

前述3. 1. の様に位相差 θ は π であることから、(3)を用いて(1)、(2)は次のように表せる。

$$V_c = 1/2 \times S_a \times B_o + V_{off_a} + 1/2 \times S_a \times B_r \times \sin(2\pi \times g \times r \times t) \quad (4)$$

$$V_d = 1/2 \times S_b \times B_o + V_{off_b} - 1/2 \times S_b \times B_r \times \sin(2\pi \times g \times r \times t) \quad (5)$$

従って2つのHall素子の感度が等しく($S_a = S_b$)、 V_{off_a}, b が $S_a, b \times B_r$ に比べて十分に小さい時、(4)、(5)より

$$V_c - V_d = S_a, b \times B_r \times \sin(2\pi \times g \times r \times t) \quad (6)$$

という信号がアンプに入力され、回転が取り出せる。 B_r は回転対象であるギアの形状やギアとの距離によって決まってしまう為、回転を取り出すには、感度が大きく特性バラツキが少なく出力誤差の小さいHall素子を用い

ることが必要である。Hall素子感度は半導体中の電子の移動速度に比例する。GaAsは耐熱性が高いほかに高速デバイスでもあり、Siの電子移動速度が $1500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec.}$ に対し、 $8500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec.}$ と5倍以上の高速度すなわち高感度を持っている。次に出力誤差だが、これはHall素子形成時の電極と半導体層との重ねあわせ誤差と、GaAs結晶中の微小バラツキに起因している。素子形成時の精度の向上と結晶の高純度化により、出力誤差は従来比半分以下のレベルに改善された。今回開発したセンサにおける $S_a, b \times B_r$ (Signal Voltage)の分布をFig.5に、 V_{off_a}, b の分布をFig.6に示す。感度が大きく、又特性の揃ったHall素子を使用していることにより、安定した検出が可能である¹⁾。

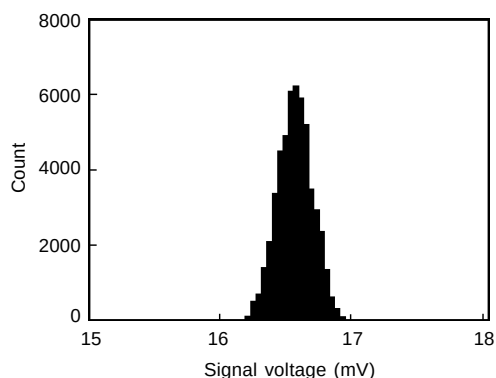


Fig.5 Histogram of signal voltage ($S_a, b \times B_r$) under 0.03 Tesla bias

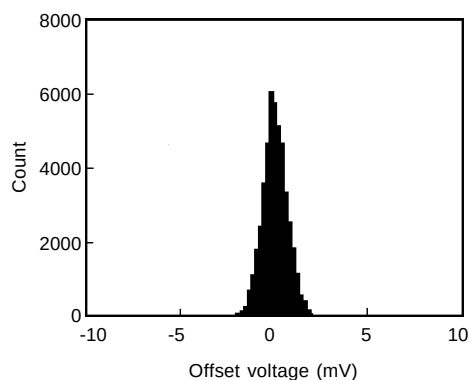


Fig.6 Histogram of offset voltage (V_{off_a}, b)

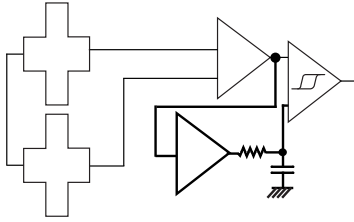


Fig.7 Recent circuit with high pass filter in Si Hall sensor device

余談ながらSiはGaAsに対して感度が低い為、しばしば式(4)(5)において $S_{a,b} \times B_r$ $V_{off\ a,b}$ となってしまう。この為回路をFig.7の様にして誤差分(直流分)を除いてしまう方式が広く用いられている。但しこの場合は、一定周波数以上の交流成分のみしか処理できない為、低速の検出ができないという問題がある。

3.3. 高耐熱性の確保

半導体ICの基本構成要素である、トランジスタ、抵抗、ダイオードは主としてその動作層中の励起電子の濃度により特性が決まってくる。電子が励起状態と非励起状態の間を移動するには2つの状態間のエネルギーの山を越える必要があるが、温度の上昇により電子の持つエネルギーが大きくなってくるとこの山を越えるものが増えてくる。高温になると半導体はこの山を越えてきた電子の影響により、漏れ電流の増加等の特性低下を起こし最終的には導体と言って良い状態になる。

熱起因の電子濃度

$$n = \sqrt{((N_c \times N_v) \times \exp(-E_g / (2 \times k \times T)))} \quad (7)$$

ここで

N_c : 導電帯の状態密度

N_v : 価電子帯の状態密度

E_g : エネルギーバンドギャップ

(Table 2中のBand gapに該当)

k : ボルツマン定数

T : 温度

を示す²⁾。

従って高温でも安定して動作する半導体を作る上で、最も基本的な方法はこのエネルギーの山(上式(7)中の E_g)が大きい材料を選定することである。Table 2に各半導体材料の特性、それを用いた素子の動作範囲を示す。

温度による特性劣化を補正する最近の構造上の工夫

Table 2 Property of semiconductor materials

	Unit	Ge	Si	GaAs	SiC	C (Diamond)
Band gap	eV	0.66	1.12	1.42	2.99	5.47
Theoretical temp. limit	°C	110	280	460	870	1100<
Production temp. limit	°C	80	150	240	450	450
Material lost ratio	Si=1	5	1	5	16	30<

(SIMOX等)により、動作温度範囲は大きくなってきているものの、Si素子では150°C前後が現状の上限と考えられている。これに対しGaAs素子は現状、実力として200°C以上、理論上は400°C前後までの動作が可能である^{3)~8)}。

高温動作の確保の上で次に重要なのは、素子レベルで得られた動作を回路・ICレベルで実現することである。いかに励起状態と非励起状態の間のエネルギーの山が大きろうと、温度によってこれを越えてくる電子はゼロではない為、全ての半導体素子は温度による特性変化をもつ。そこでこの特性変化を抑える回路上の工夫が必要である。

そこで本開発では、コンパレータまでの回路を全て二系統用意し、それらを完全に対称に造ることにより温度特性を低減した。

Fig.8に本センサの動作点の温度による変化を示す。二本の線はセンサ出力がOFFからONに変化する磁場(グラフ中のOperating magnetic field)及びONからOFFに復帰する磁場(同Releasing magnetic field)を示す。温度特性が良いということは、この二本の線が並行に真っ直ぐに伸びていることを意味するが、この様に175°Cまで動作点のズレの無いことが確認できた。本ICを用いることで実車においても良好な温度特性を持つセンサが期待できる。

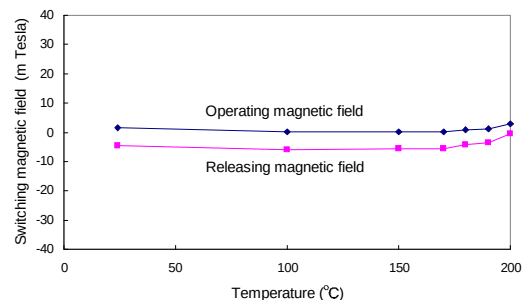


Fig.8 Characteristics of developed GaAs sensor through temperature

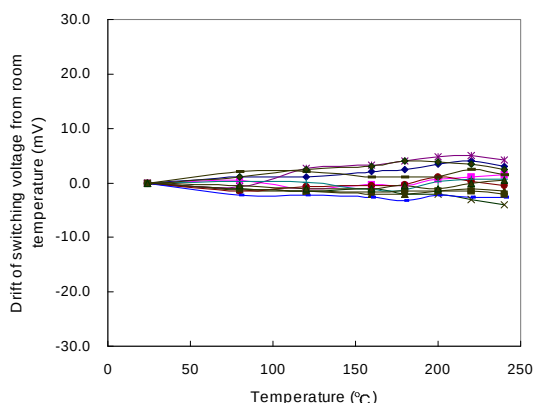


Fig.9 Characteristics of developed GaAs IC through temperature

尚、Fig.8中200°CにかけてReleasing magnetic fieldが若干変化しているが、これはICのパッケージ樹脂の物性的限界点から来ていると考えられる。Fig.9にGaAs IC単独でのスイッチング電圧の温度特性を示す。バラツキが少なく240°Cまでの動作が確認されている。

3. 4. 材料コストの低減

GaAsは半導体材料としてこれまで述べてきた様に、耐熱性の点で優れた特性を持っているが、その材料としてのコストが高いという問題がある。(Table 2参照)

一般に半導体は材料コストを下げる為に、回路の集積度を上げてチップの面積を少なく抑える方法をとるが、本センサの場合2つのHall素子の間隔をギアのピッチの半分だけ取らなければならない為、IC部分の集積度を上げてチップの面積を小さくできない。そこで本開発では、センシング部分であるHall素子と信号処理部分であるICを分離し、それらをワイヤーで繋ぎ樹脂でパッケージングするマルチ・チップ・モジュール(Multi-Chip-Module 以下MCM)構造を採用した。Fig.10にMCM内部を示す。

これにより、モジュール1.75のギアを対象とした場合で、必要なGaAsの面積は1チップの場合に比べて1/3以下に減少し、GaAsの材料費を抑えることが実現できた。又、本構造を採用することにより、ICの回路パターンを変更せずにHall素子間隔を変えることにより、最小1.6mmピッチまで(Hall素子間隔は0.8mm)対応することが可能となった。即ち、変更した場合最もコスト・時間

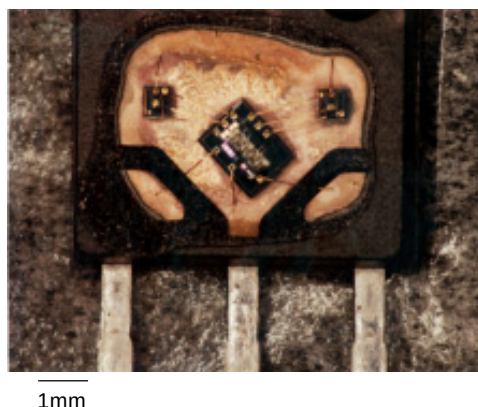


Fig.10 Inside view of Multi-Chip-Module

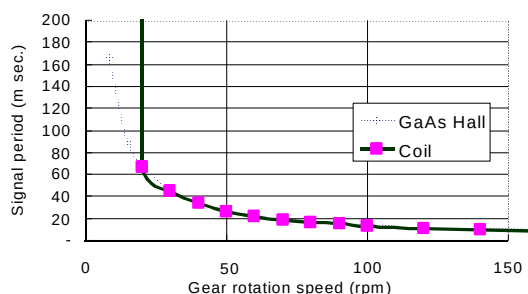


Fig.11 Relationship between rotation-speed and signal-period

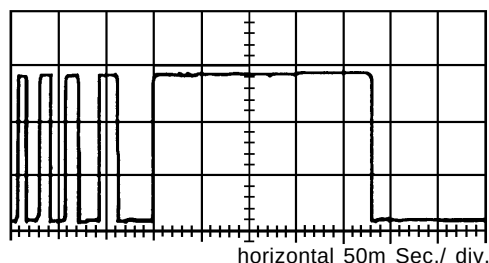


Fig.12 Output signal till to be stopped

がかかるIC部分は共通のまま、汎用的に活用が可能である。

4. 性能評価結果

4. 1. 低速回転検知能力

Fig.11に対象ギアの回転速度と、出力信号周期の関係を示す。極低速まで、周期は回転速度に反比例する関係を保っている。Fig.12に実車テストにおいて停止寸前の出力を示す。この時の出力をECUで処理することより車

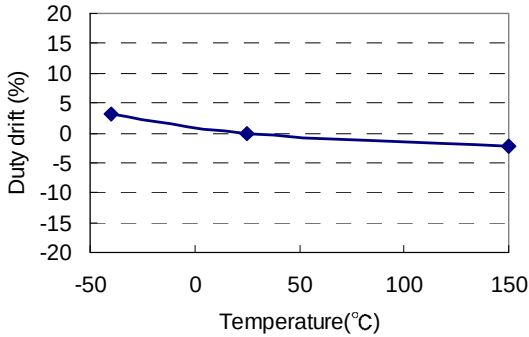


Fig.13 Duty drift through temperature

速0 km/hが得られる。車両の制御上停止判断が必要なシステムへの活用が可能なが確認できた。

4. 2. センサAssyでの温度特性評価

センサAssyとしての性能は、得られるデジタル出力のON時間の比率すなわちDuty比で評価した。Fig.13に各温度でのDuty変化量を示す。トランスミッションにおける温度要件である $-30^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ にわたって、開発されたセンサは良好な特性を有していることが確認できた。

5. 今後の展開

5. 1. 適用拡大への展開

今回の開発の中で、車速検出用としての性能が確認できた。今後は本センサをベースに以下の様なシステムへの適用拡大が可能と考えられる。

- (1) MCM内部のHall素子間隔を小型パルサ用に縮小することで、車輪系・ステアリング系の回転センサへの適用。
- (2) MCM内部のHall素子間隔を縮小し、デジタル出力の反転タイミングゾーンを狭くし高精度化することで、エンジン系の回転センサへの適用。

5. 2. 多機能化への展開

基本的に高耐熱のICが可能となった為、半導体回路で構成・実現できる機能はICチップ部に内蔵させることができる。Fig.14に基本機能である回転のデジタル出力に加え、回転のアナログ出力・雰囲気温度出力を加えたプロトタイプを示す。

これらの機能の追加であれば、ICの面積としては殆ど増加させることなく付加することができる。これによ

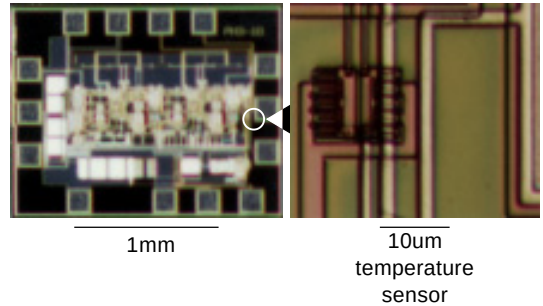


Fig.14 Overview of prototype GaAs IC which has additional functions

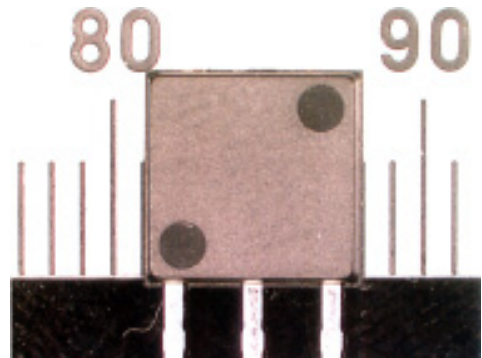


Fig.15 Outlook of Multi-Chip-Module

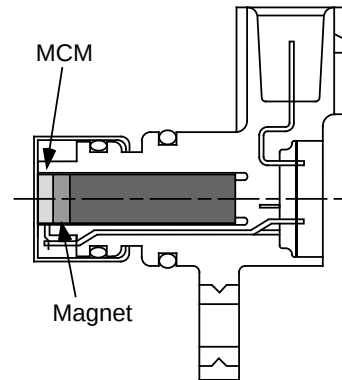
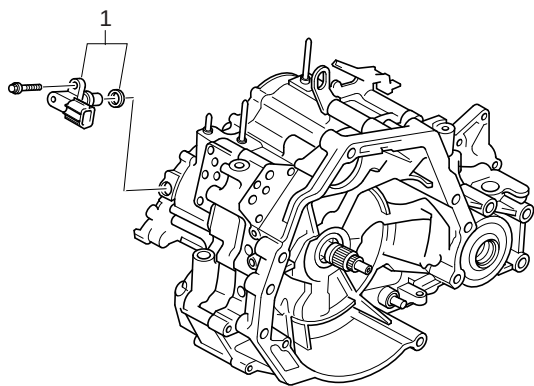


Fig.16 Side view of sensor assy

り、例えばトランスミッションのギア回転とトランスミッション油温が同時に検出できるようになり、センサーフュージョンの実現が期待できる。

6. まとめ

Fig.15に今回開発したMCMの外観を、Fig.16に検出部に



1 : Developed sensor assy

Fig.17 Developed sensor built-in transmission

MCMを搭載したセンサAssyの外観、Fig.17に車速検出用にトランスミッションに取り付けられた状態を示す。Fig.1と比べて補助の機械部品が無くギアの回転を直接検出できている。又耐熱性の他に、本センサは車における耐電磁波障害性、耐久信頼性を満足している。

今回の開発により、

- (1)高耐熱の半導体材料であるGaAsを用いて、175℃まで動作可能な、対象の停止状態まで検出できるセンサを実現した。
- (2)トランスミッション内のギア回転検出用として、実車適合性が確認できた。

7. あとがき

GaAs ICセンサを車両運動制御用に適用することは世界初である。1998年式新型Accordのトランスミッション内ギア回転センサへの適用にあたり、日立電線殿・ケーヒン殿には多大な御協力をいただきました。本紙面をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hisashi Tate(Hitachi-Cable) Hideo Seki(Honda R.&D.) 「GaAs Hall Effect Sensor IC for Automobile Usage」1998 SAE
- 2) S. M. Sze 「Semiconductor Device」John Wiley & Sons, 185
- 3) 高田育紀(三菱電機)「シリコン・パワーデバイスの高温動作で問題となる事柄」第7回高温エレクトロニクス研究会、1997
- 4) 右高正俊(豊田工業大学)「シリコン高温ICの開発」第6回高温エレクトロニクス研究会、1996
- 5) 木本恒暢(京都大学)「SiC半導体デバイスの最近の進展」第5回高温エレクトロニクス研究会、1995
- 6) 滝川光治(豊田中研)「自動車用高温エレクトロニクスデバイス」第1回高温エレクトロニクス研究会、1991
- 7) 板倉啓二郎(松下電子工業)「GaAsホールICの設計と試作」、電子通信学会1987
- 8) 「耐環境半導体デバイス技術の現状と展望」NTTアドバンステクノロジー、1990

■ 著 者 ■



関 英 男



石 川 一 郎



大 根 健 一



岡 本 久 順



福 田 一 実