

薄膜回路とその応用

Thin Film Circuits and Their Applications

小 西 務*
Tsutomu Konishi

要 旨

薄膜回路は従来のトランジスタ回路をほぼそのまま超小形構造にできるとともに、種々の特徴をもっている。その特徴を利用して、今まで各種工業に用いられていた制御装置の薄膜回路化が押し進められつつある。筆者はいくつかの薄膜回路を開発したので、それらの回路構成、性能、特徴などを明らかにする。次に、それらの素子が山陽新幹線用に試作されたデジタル自動列車制御装置、製品化された定期券自動改札装置に使用され、確実な動作と十分な性能を発揮していることを述べている。

1. 緒 言

最近、集積回路 (Integrated Circuit, IC と略称する) という言葉が一般に使われているが、これは半導体 IC と薄膜 IC とに大別できる。半導体 IC は、一枚の基板上に配列された複数の受動素子および能動素子からなる回路を半導体製造技術によって作られるもので、一般にデジタル計算機通信機器などに多く用いられる⁽¹⁾。薄膜 IC は複数の抵抗、コンデンサなどを一枚の基板上に薄膜技術 (蒸着、スパッタリングなど) を用いて作られたもので、それに半導体を接続して回路を構成した後、モールドして成形される。このほか、複数の抵抗、コンデンサを収容した基板を複数個積み重ね、半導体を接続してモールドしたいわゆるマイクロモジュール形がある。これら薄膜技術により作られたモールド構造の回路を薄膜回路と称する⁽²⁾。

薄膜回路は従来の回路設計技術がほぼそのまま使用でき、信号レベルも従来のトランジスタ回路⁽³⁾と同等にでき、動作が安定、確実

で、雑音に強く、また実装に際し、半導体 IC のような高度の制約がない。したがって、製鉄、製紙、自動車、工作機械、化学、鉱業、列車などの各種工業への応用が期待されている^{(4)~(6)}。

ここではまず、開発したいくつかの薄膜回路について、回路構成、特性などを明らかにするとともに、その応用例として、デジタル式自動列車制御装置、および定期券自動改札装置を取り上げ、装置の構成、動作原理、性能、特長などについて述べ、これらの装置に薄膜回路がどのように使用されているかを明らかにする。

2. 回路および特性

薄膜回路には応用により種々の回路があるが、ここでは論理回路、時限回路および増幅回路について紹介し、特に論理回路の特性式を明らかにする。

2.1 論理回路⁽⁶⁾

(1) OR モジュール

これは、図 1 (A) に示すように単にダイオード、OR 回路を構

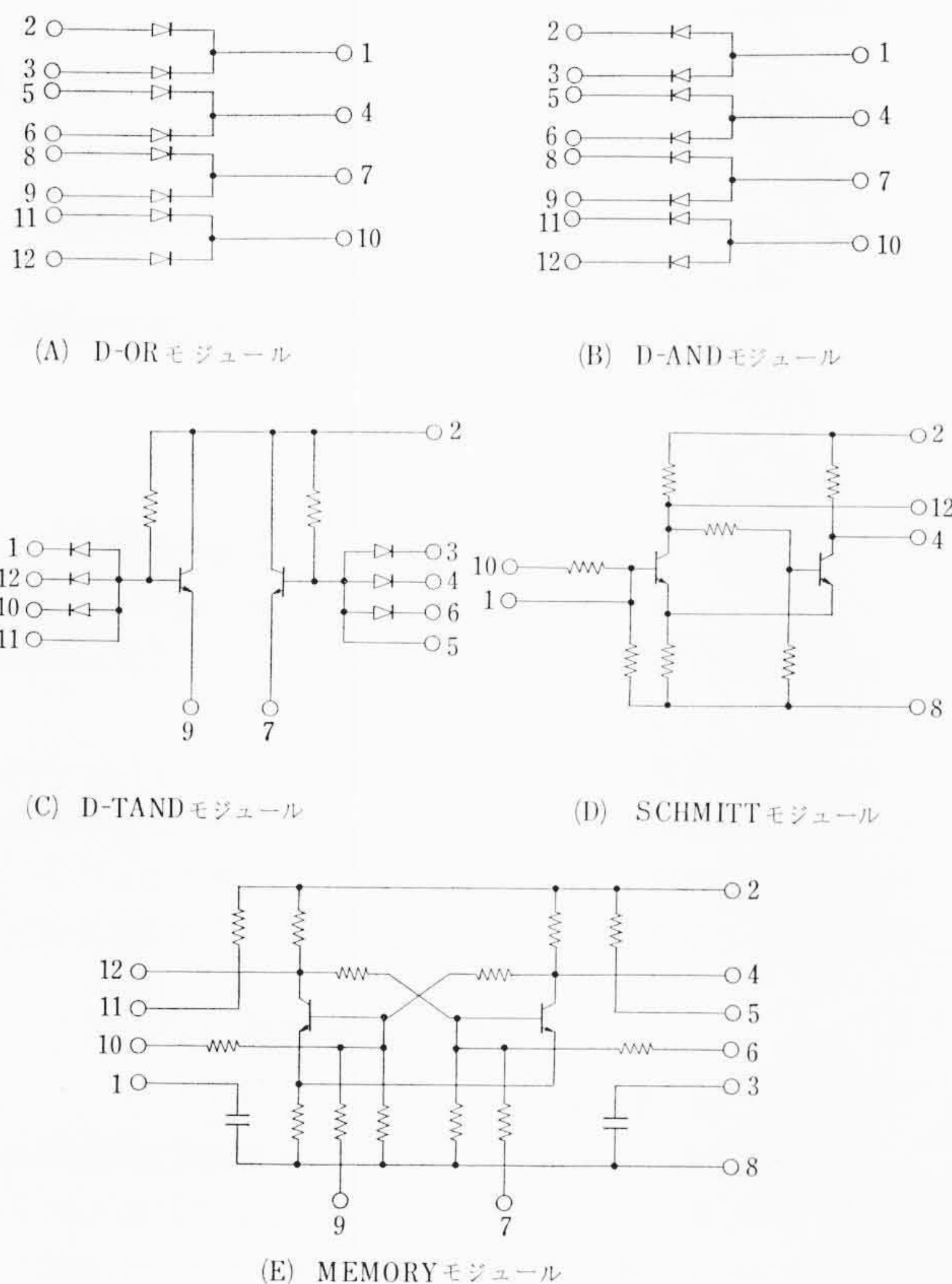


図 1 各種の薄膜回路

* 日立製作所日立研究所 工学博士

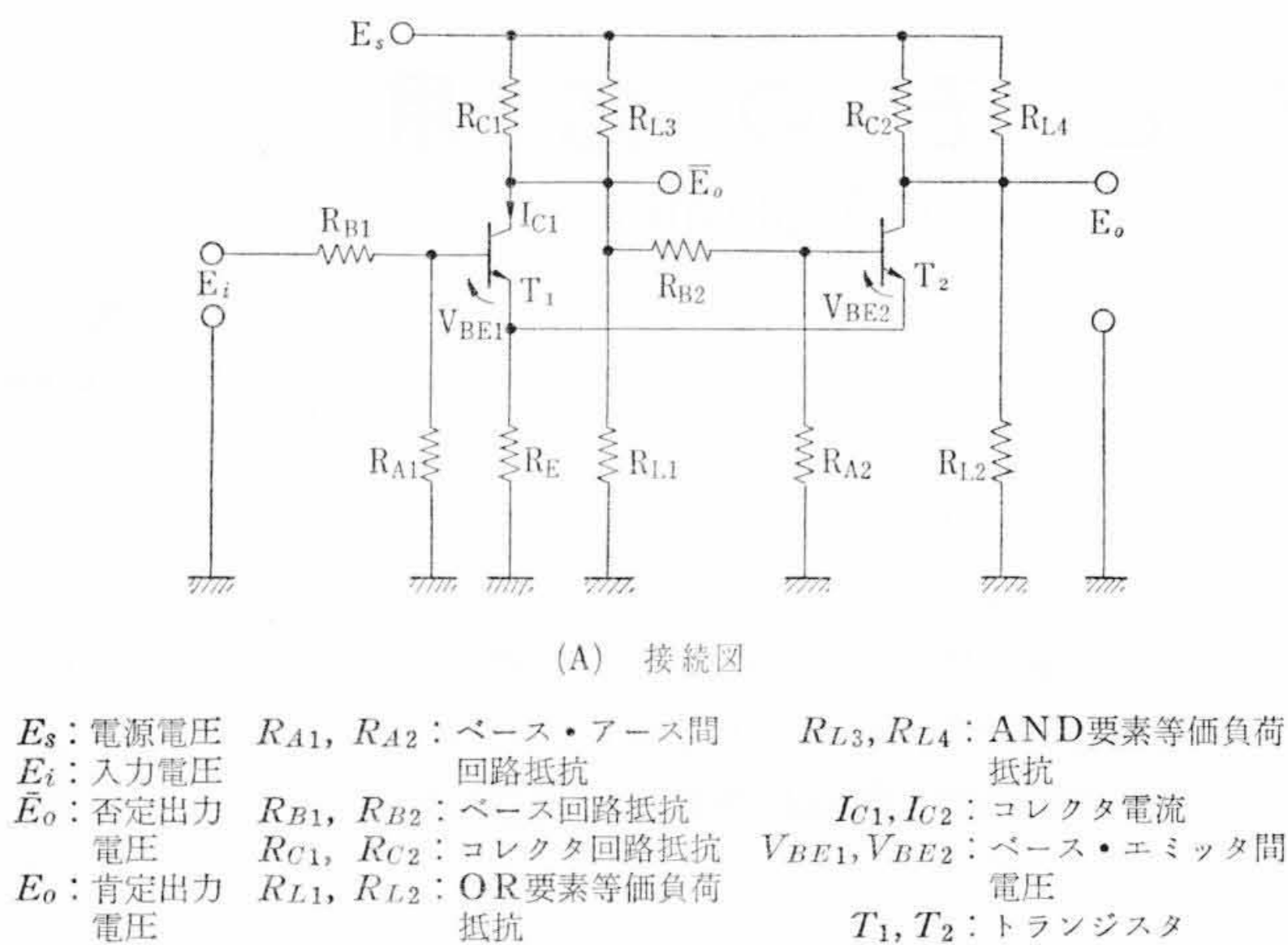


図 2 基本回路と特性

成するため、1パッケージに端子数の許すだけのダイオードを収容したものである。

(2) AND モジュール

AND モジュールは図 1 (B) に示すような単なるダイオード・AND 回路と、同図 (C) に示すダイオード・トランジスタ・AND 回路がある。後者は入力抵抗が大きいので、AND 回路負荷数が大きい場合に用いられる。

(3) SCHMITT モジュール

これは単に波形整形という考え方で使用するだけではなく、上述の (1), (2) の受動回路と組み合わせて安定な論理特性を得るために使用される基本回路である。この基本回路の設計はそのまま次の記憶回路に使用できるので、その特性計算式を後ほど明らかにしておく。

(4) MEMORY モジュール

これは図 1 (E) に示されているが、リレー回路のセルフ・ホールド機能と同一の動作をさせるために用いられるほか、カウンタの要素として使用できるように考慮してある。そのほか本要素は雑音により誤動作する可能性があるので、入力に雑音除去用コンデンサが接続できるようになっている。

以上述べた各モジュールは単独で、あるいは組み合わせて使用されるが、特性については使用状態を考慮して検討されている。

2.2 時 限 回 路

回路は図 1 (F) に示されている。入力端子 1 に ON 信号が印加されて後、一定時間後に出力端子に ON 信号が得られる一種の ON 遅延回路である。この遅延時間は可変である。実際には端子 4 または 6 と 5 の間に可変抵抗が、また端子 7 と 9 の間にコンデンサが接続される。これらを適当に選定することにより遅延時間が決まる。

2.3 増 幅 回 路

増幅回路を図 1 (G) に示す。この回路は一種の光電検出器として使用されるもので、ホト・トランジスタから得られる微小電流 (数 μA) を増幅し、ON-OFF 信号を得るものである。温度変化に対する ON-OFF 出力を与える入力電流の変化を補償している。

以上、図 1 (F) および (G) では、1 モジュール中の半導体数を大にするため、超小形トランジスタを使用している。

2.4 論理回路の特性計算⁽³⁾

ここでは、論理回路に使用される基本回路であるエミッタ結合回路について、論理特性を与える計算式を明らかにしておく。

図 2 (A) の基本回路において、入力電圧 E_i と否定出力電圧 $\bar{E}_o$ 、肯定出力電圧 E_o の間の特性の概形は同図 (B) のようになる。同図において、定常安定動作限界に対し特性変動が問題になるのは座標 $(E_{i1}, \bar{E}_{o1})$ および $(E_{i4}, \bar{E}_{o4})$ であるので、これらの座標に着目して特

性式を整理すると次のようになる。ただし、シリコン・トランジスタを使用するので、遮断電流を無視する。

(1) 座 標 $(E_{i1}, \bar{E}_{o1})$

$$E_{i1} = \left(1 + \frac{R_{B1}}{R_{A1}}\right) \left[\left(1 + \frac{1}{\beta_2}\right) I_{C2} R_E + V_{BE1} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{E}_{o1} = \frac{E_S}{1 + (R'_{C1}/R_{L1})} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$I_{C2} = \frac{E_S}{R'_{C2} + (R_E + r_{CS2}) (1 + R'_{C2}/R_{L2})} \dots\dots\dots (3)$$

(2) 座 標 $(E_{i4}, \bar{E}_{o4})$

$$E_{i4} = \left(1 + \frac{R_{B1}}{R_{A1}}\right) \left[\left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right) I_{C1} R_E + V_{BE1} \right] + \frac{1}{\beta_1} I_{C1} R_{B1} \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{E}_{o4} = I_{C1} (R_E + r_{CS1}) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$I_{C1} = \frac{E_S}{R'_{C1} + (R_E + r_{CS1}) (1 + R'_{C1}/R_{L1})} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\begin{aligned} R_{L1} &= [R_{B1} + (1 + \beta_1) R_E // R_{A1}] // [R_{B2} + (1 + \beta_2) R_E // R_{B2}] / m_1 \\ R_{L2} &= [R_{B1} + (1 + \beta_1) R_E // R_{A1}] / m_2 \\ R_{L3} &= R_D / m_3, \quad (R_D = \text{AND 要素の入力-電源間抵抗}) \\ R_{L4} &= R_D / m_4 \\ R'_{C1} &= R_{C1} // R_{L3} \\ R'_{C2} &= R_{C2} // R_{L4} \end{aligned}$$

記号 $//$ は、 $A // B = AB / (A + B)$ なる演算を意味する。 m_1, m_2 はトランジスタ T_1, T_2 の OR 要素負荷数、 m_3, m_4 は T_1, T_2 の AND 要素負荷数である。また、 β_1, β_2 は T_1, T_2 の直流電流増幅率、 r_{CS1}, r_{CS2} は T_1, T_2 のコレクタ飽和抵抗である。

以上、回路定数および半導体定数が定まると、(1) ~ (6) 式を用いて入出力特性の概形が得られる。しかしながら、OR 回路あるいは AND 回路の付加、抵抗値偏差、半導体定数のばらつき、周囲温度の変化などを含めて、特性の移動限界を計算する必要がある。

3. 特性実測結果

3.1 論 理 要 素

周囲温度変化 $-20 \sim 65^\circ C$ 、トランジスタ直流電流増幅率のばらつき $110 \sim 200$ 、抵抗値偏差 $\pm 5\%$ などが組み合わされたとき、入出力特性が最も左に寄る場合と、最も右に寄る場合について、特性を計算および実測した。OR 要素、AND 要素および記憶要素について、その結果を図 3 (A) ~ (C) に示す。この結果、計算値と実測値は比較的合致

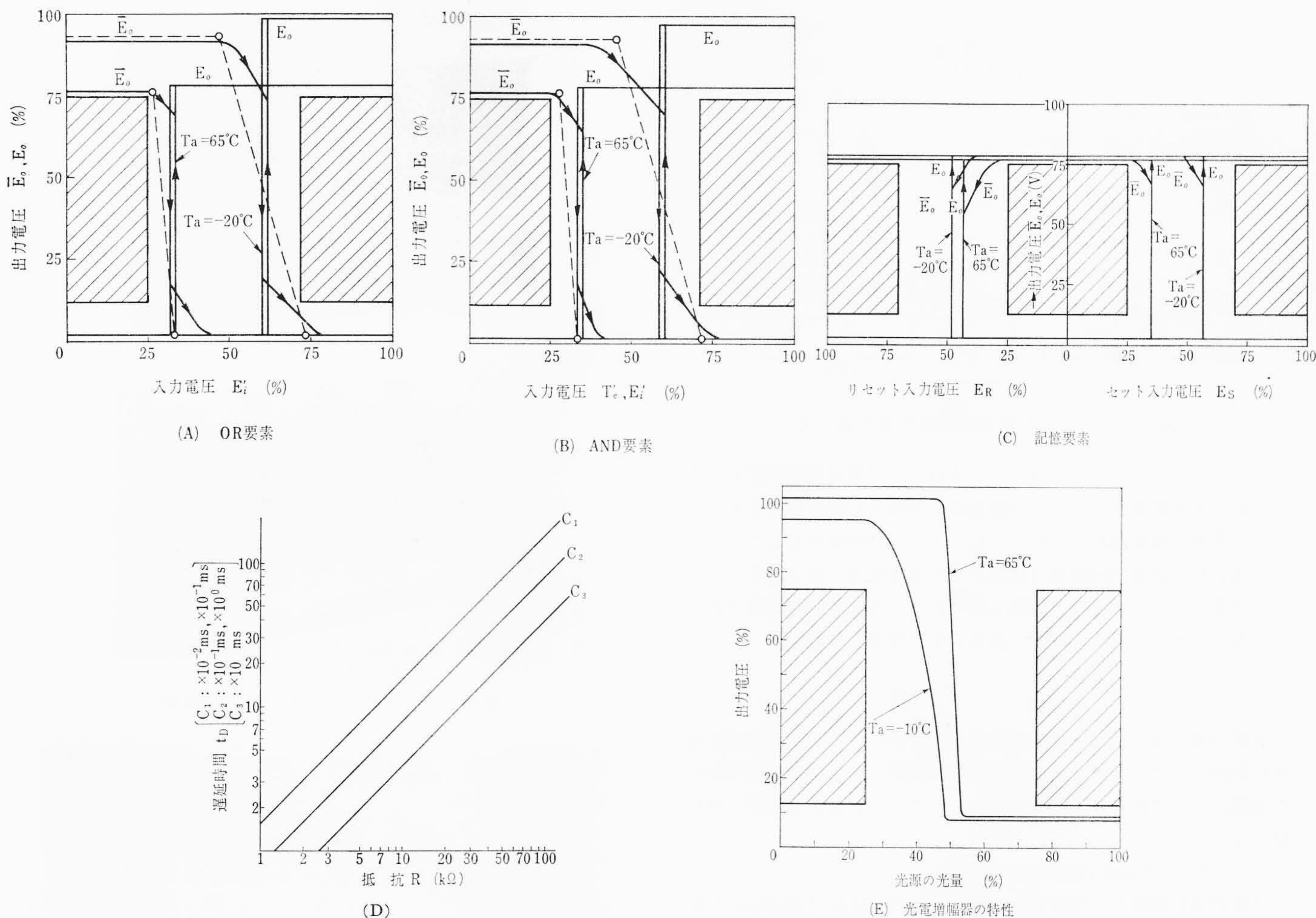


図3 薄膜回路の特性

し、また特性の変動は定常安定動作限界(図中斜線で示す)に対して余裕がある。実際には上記の組合せが重なっても最悪の特性になることはほとんどなく、図3の特性移動範囲はより小さいのが普通である。

3.2 時限回路

図1(F)の回路で、外部接続コンデンサの容量をパラメータにとり、外部接続抵抗と遅延時間の関係を測定した結果を図3(D)に示す。この結果、遅延時間 t_D はコンデンサ C 、抵抗 R に対し次式の関係を持つことがわかる。

$$t_D = kCR \quad (k=\text{定数}) \quad (7)$$

なお、周囲温度 $-20 \sim 65^\circ\text{C}$ 、電源変動 $\pm 3\%$ に対して、遅延時間の誤差は $\pm 7\%$ 以内である。

3.3 増幅回路

図1(G)の回路にホット・トランジスタを接続し、光を照射した場合の入出力特性を図3(E)に示す。同図は、周囲温度 $-10 \sim 65^\circ\text{C}$ 、電源変動 $\pm 3\%$ 、トランジスタの電流増幅率 $110 \sim 200$ の最悪組合せに対する実験結果である。この結果、特性の変動は入力値で約 10% で、論理動作には問題はない。

4. 薄膜回路の特徴

薄膜回路は従来のディスクリットな回路に対してそれ自身特徴をもっており、その特徴を応用に際し生かしてゆくことが望ましい。次に、特徴のおもなものを取り上げ説明する。

(1) 機能要素として動作する⁽⁴⁾。

制御装置を設計する場合、従来のディスクリットな回路を使用すると回路定数の選定やプリント板配線図などにかなりの労力を

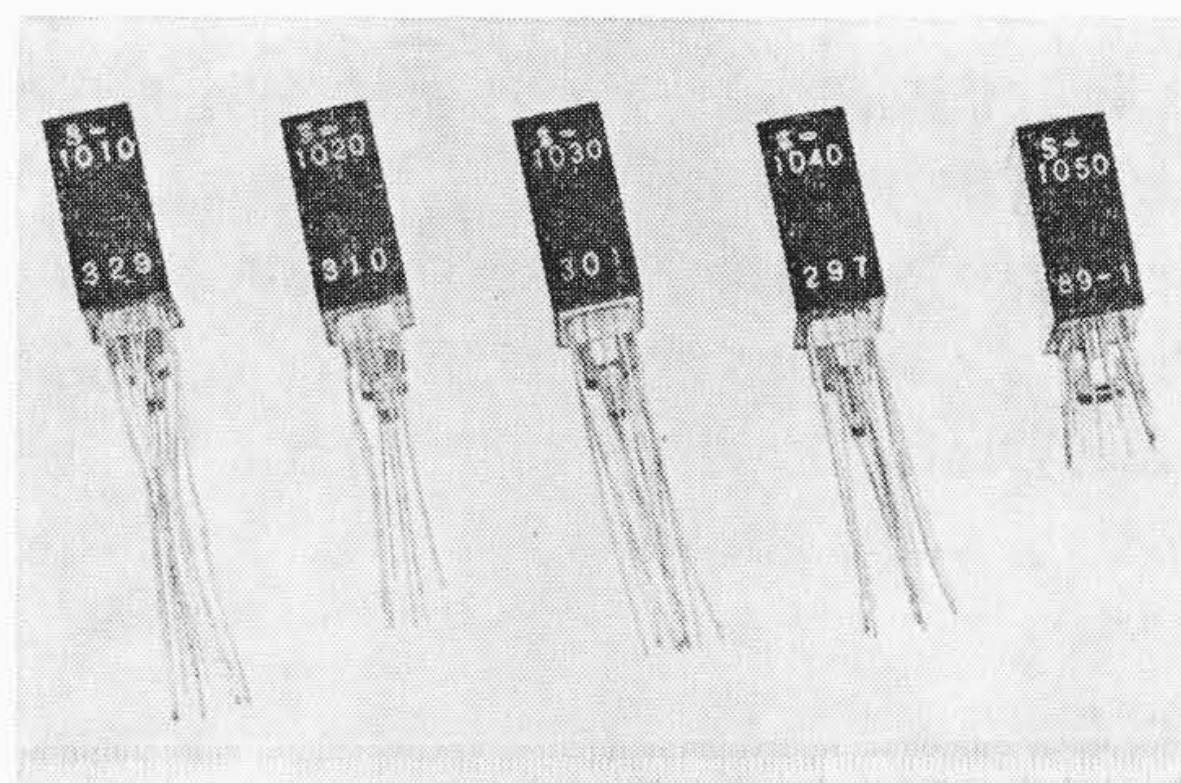


図4 薄膜回路

必要とする。薄膜回路はそれ自身1個の機能要素として使用できるので、制御装置の設計も実装も簡単、容易となり、したがって、制御装置の複雑化、機能の高度化が可能となる。

(2) 小形である⁽⁴⁾。

マイクロモジュール構造とした場合の薄膜回路の写真を図4に示す。このほかにDual in line構造にもできる。同図の写真は図1(A)~(E)を薄膜回路化したもので、外形寸法は $12 \times 12 \times 25 \text{ mm}$ である。これには普通のキャン封止のトランジスタ($6\phi \times 10.2 \text{ mm}$)が埋め込まれているので比較的高さが高いが、超小形半導体($3.8\phi \times 2 \text{ mm}$)の使用により、さらに小形化することができる。

(3) 周囲環境に強い。

部品がモールドされているので振動、衝撃、湿度などに対し強い。特に図4からわかるように、ビスが埋め込まれ、プリント板

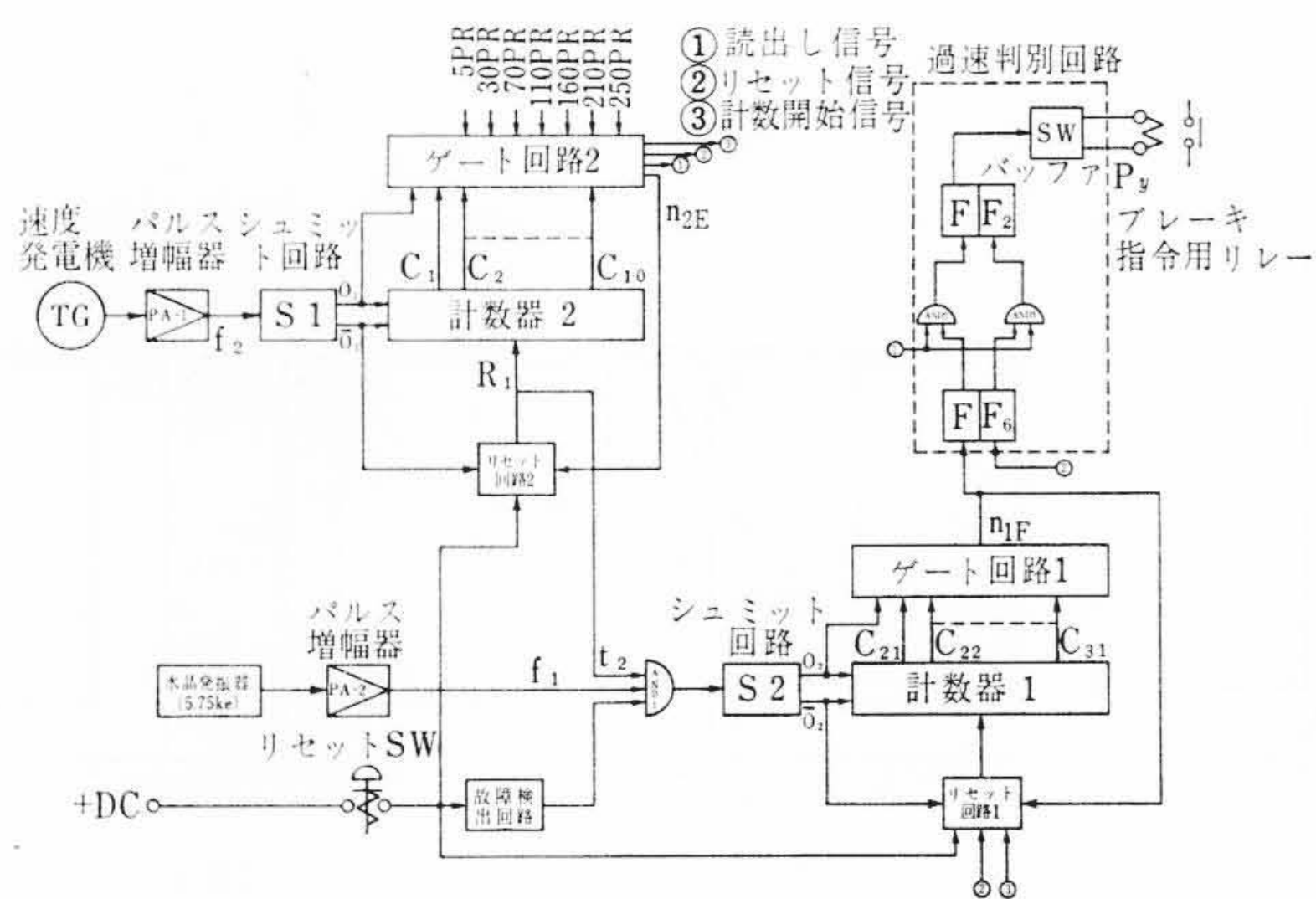


図5 デジタル式自動列車装置の構成図

にネジ止めできるようになっているので、列車用制御装置のように耐振性が要求されるような場合にも問題なしに使用できる。なお、半導体集積回路に比較してもいろいろの特徴をもっている。すなわち、従来の回路設計技術がそのまま使用でき、信号レベルを従来のディスクリート回路と同等にできるので相互接続が容易であり、動作が安定、確実である。また雑音にも強い。

5. 応 用

薄膜回路を用いた種々の工業応用があるが、ここでは山陽新幹線用に試作したデジタル式自動列車制御装置、および定期券自動改札装置について紹介する。薄膜回路としては日立製作所茂原工場の製品を用いた。

5.1 デジタル式自動列車制御装置

自動列車制御装置は列車速度が信号機の設置区間で定められた規定速度以上になると自動的にブレーキがかかるように動作するものである。列車の高速化、列車間隔の短縮などにより輸送密度の増大を図ろうとする場合、特に山陽新幹線のように高速（250 km/h）になると、車速検出精度の高いデジタル式が用いられる。

5.1.1 制御装置の構成と動作原理

デジタル式速度検出方法にはいろいろあるが、精度、応答、安全性などにすぐれた図5の方法が用いられる。速度発電機のパルス周波数 f_2 は計数器2で計数される。計数器2が照査速度で決まる一定数 n_{2E} になると、リセットして再計数する。その期間 t_2 は、

$$t_2 = n_{2E} / f_2 \quad (8)$$

t_2 期間ゲートが開き、標準発振器の周波数 f_1 は計数器1で計数される。この計数量 n_1 は、

$$n_1 = n_{2E} f_1 / f_2 \quad (9)$$

この値は照査速度に対し n_{1F} になるようゲート回路が組み立てられているので

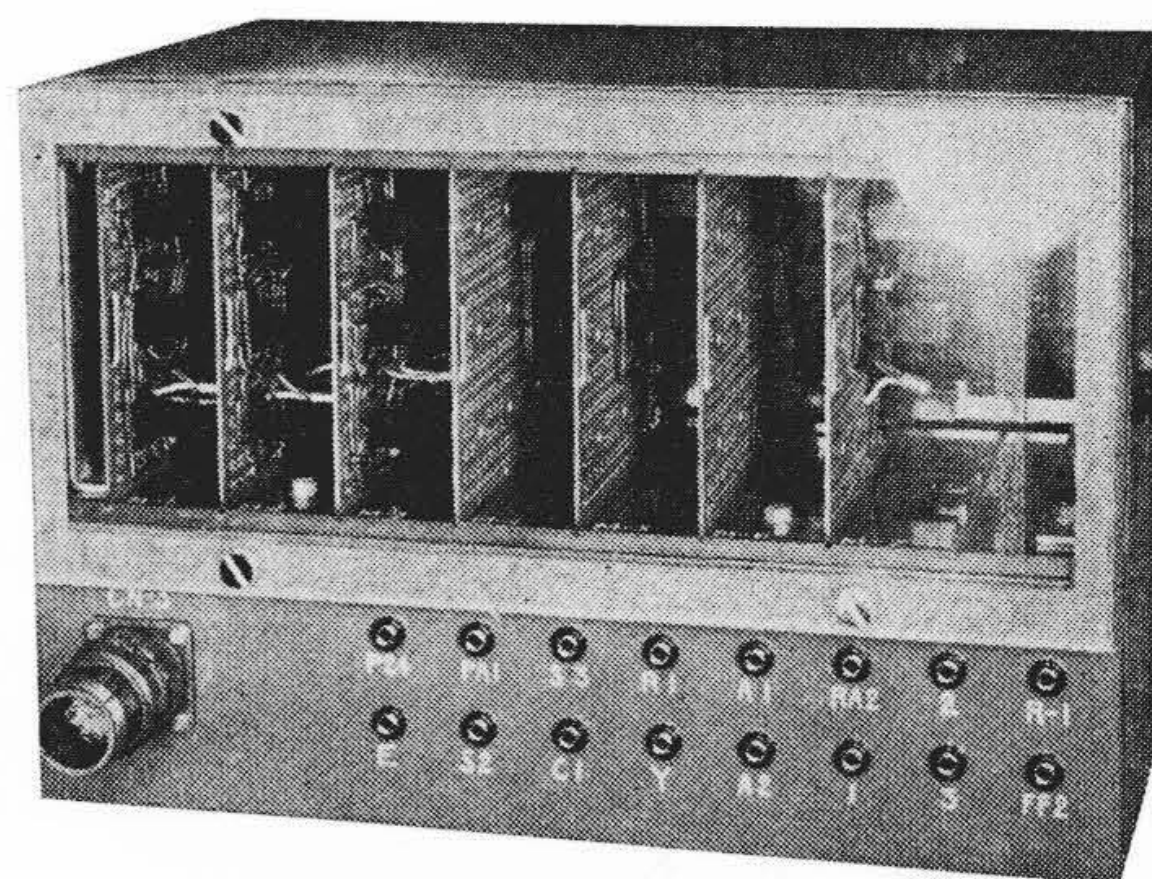
$$n_1 \leq n_{1F} \quad (10)$$

のとき、ブレーキ信号を出す。ゲート回路2の信号のうち、①は読出し、②はリセット、③は計数開始である。

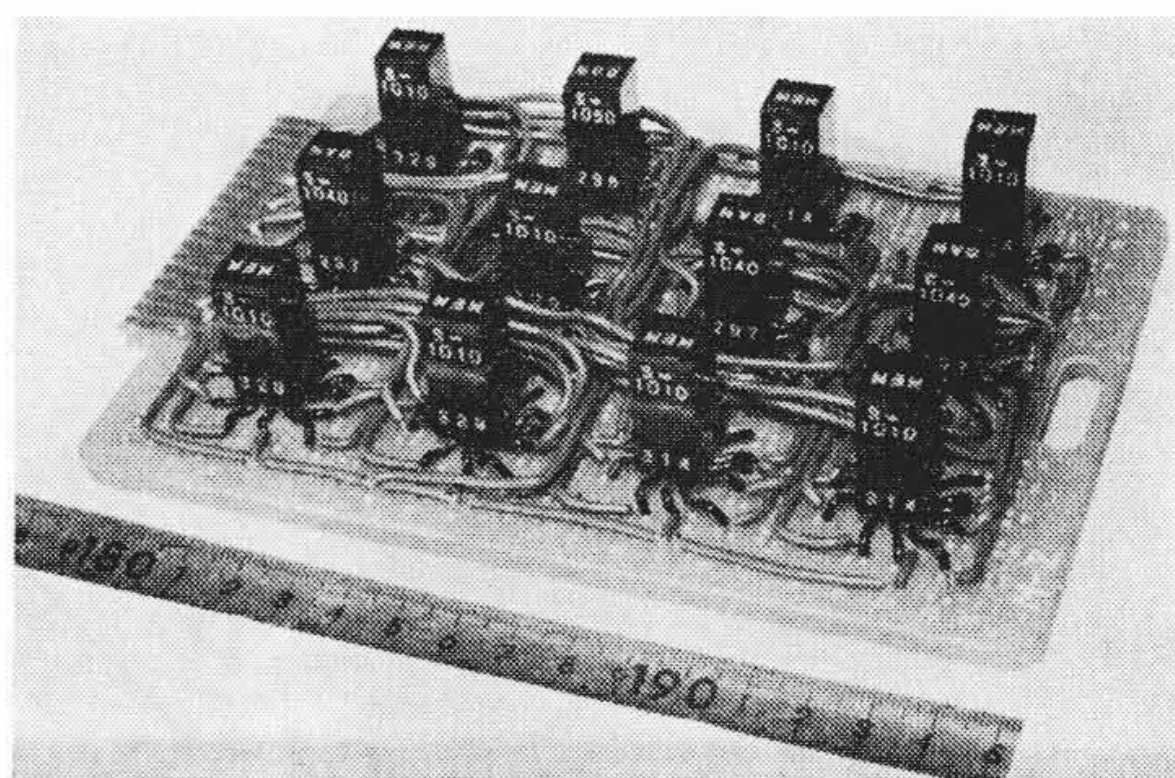
以上の動作原理から明らかなように1回転当たりの速度発電機のパルス数が限定されていても計数器1の容量により高精度にでき、サンプリング時間は小さく設計できるので比較的応答がよく、また速度発電機、各計数器などの故障に対しフェイル・セーフとなるので安全性が高い。

5.1.2 試作制御装置

試作した制御装置（主として計数器2、ゲート回路2、リセット回路2の部分）の写真を図6(A)に、また計数器4ビットを同図(B)に示す。プリント回路で組み立てた試作装置に対し、全体と

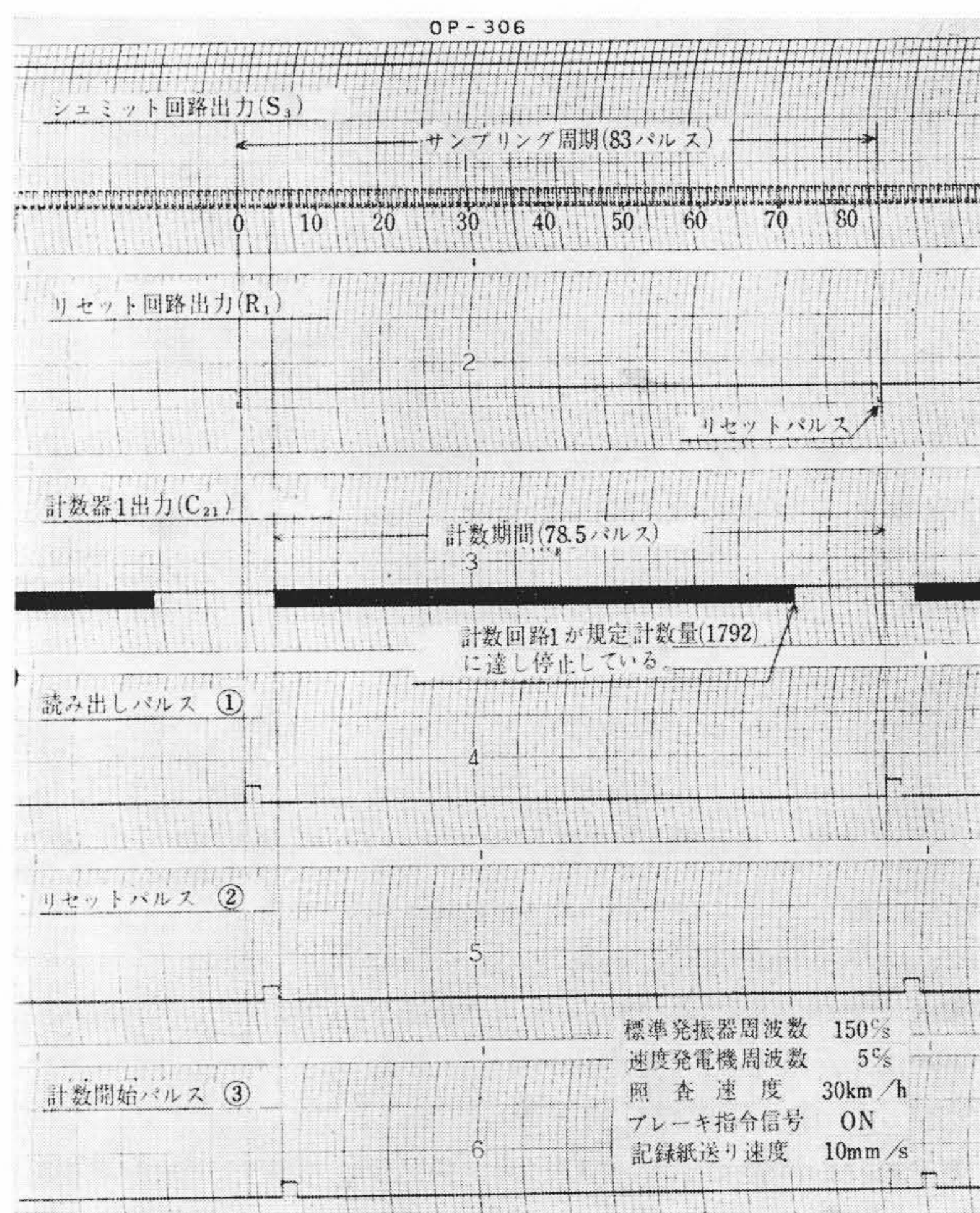


(A) 制御装置



(B) 薄膜回路

図6 デジタル式自動列車制御装置



(車速が照度速度以下の場合)

図7 実験結果の一例

して薄膜回路のほうが約1/3程度にできる。

5.1.3 実験結果および性能

標準発振器周波数 150 c/s, 速度発電機周波数 5 c/s, 照査速度 30 km/h とした場合の回路各部の動作信号の測定結果を図7に示す。この結果、装置が正常に動作していることがわかる。車速検出精度を測定した結果は加速度 1 km/h/s に対し、250 km/h において約 0.235% で、目標値 0.25% 以内である。

5.2 定期券自動改札装置

定期券自動改札装置は現在駅員が行なっている改札作業を完全に

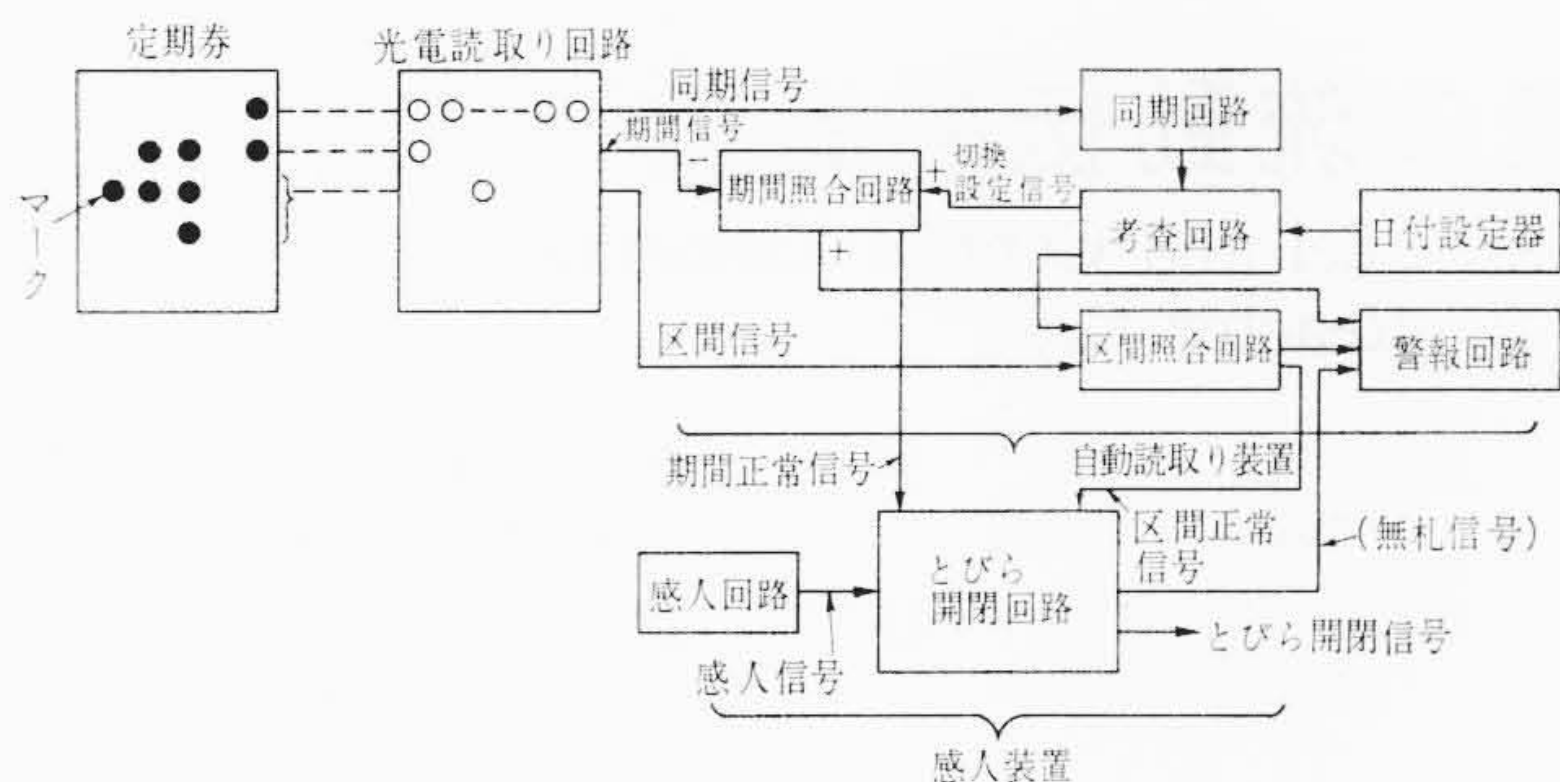
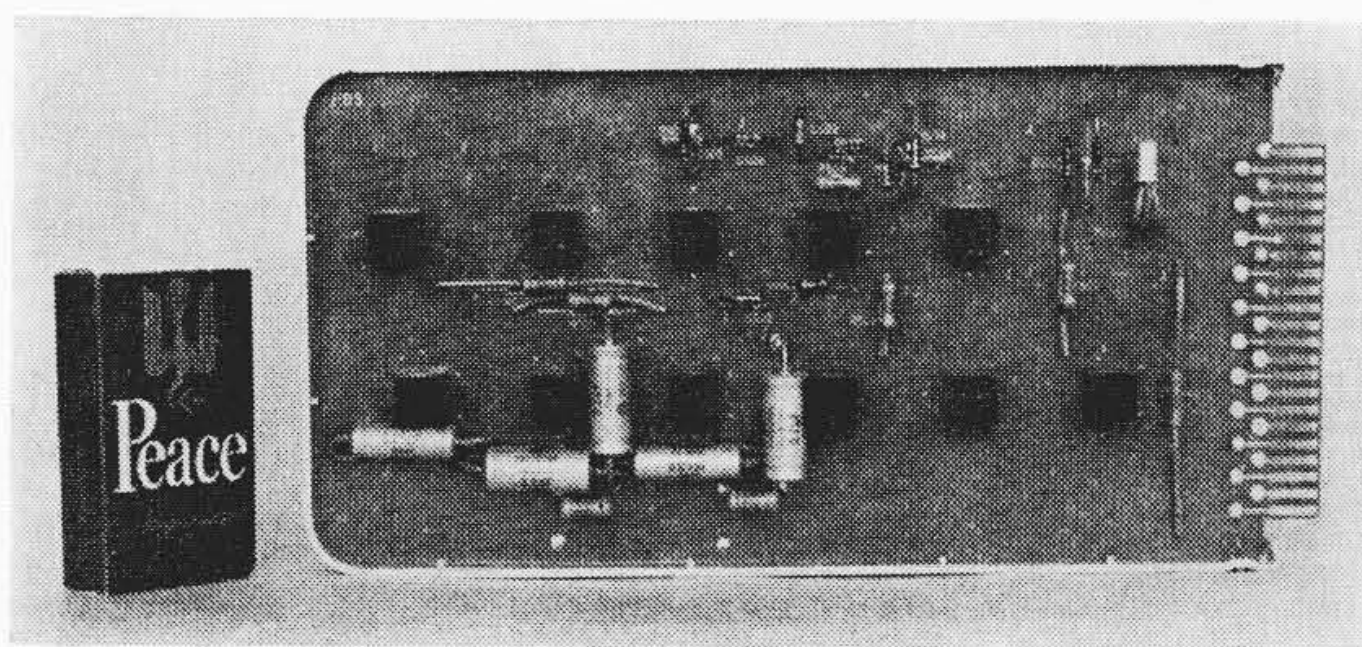


図8 定期券自動改札装置の原理図



(A) 自動改札装置の使用状況



(B) 薄膜回路

図9 定期券自動改札装置

自動化しようとするものである。この装置は定期券に記録された通用期間、区間などの情報を検出、判定し、定期券所持者との対応をとり改札用とびらを自動開閉する。

5.2.1 装置の構成と動作原理

自動改札装置の動作原理図を図8に示す。定期券が送り機構により移動しつつあるとき、定期券に記録された符号を光電読取回路で電気信号に変換する。この信号のうち、同期信号は同期回路にはいる。当日の日付け、No. は日付設定器に設定されていて、この信号を走査回路により1ビットずつ抽出し、期間照合回路に送り、光電読取回路から得られる期間信号 N_1 と比較される。両信号には各ビットごとに重みがつけられているので、

$N_0 \leq N_1$ のとき、期間正常信号

$N_0 > N_1$ のとき、警報信号および表示を出す。

同様に、区間についても区間照合回路により判別する。その他の動作については説明を省略する。以上が自動読取装置の動作の概要である。

次に、感人装置について説明する。自動読取装置により期間正常信号、区間正常信号が得られる。また定期券所持者が改札装置通路を通過するときに感人信号が得られると、これらの信号がとびら開閉回路にはいる。定期券とその所持者が対応する場合にはとびらを開放し、対応がない場合にはとびらを閉鎖するとともに無札警報および表示する。

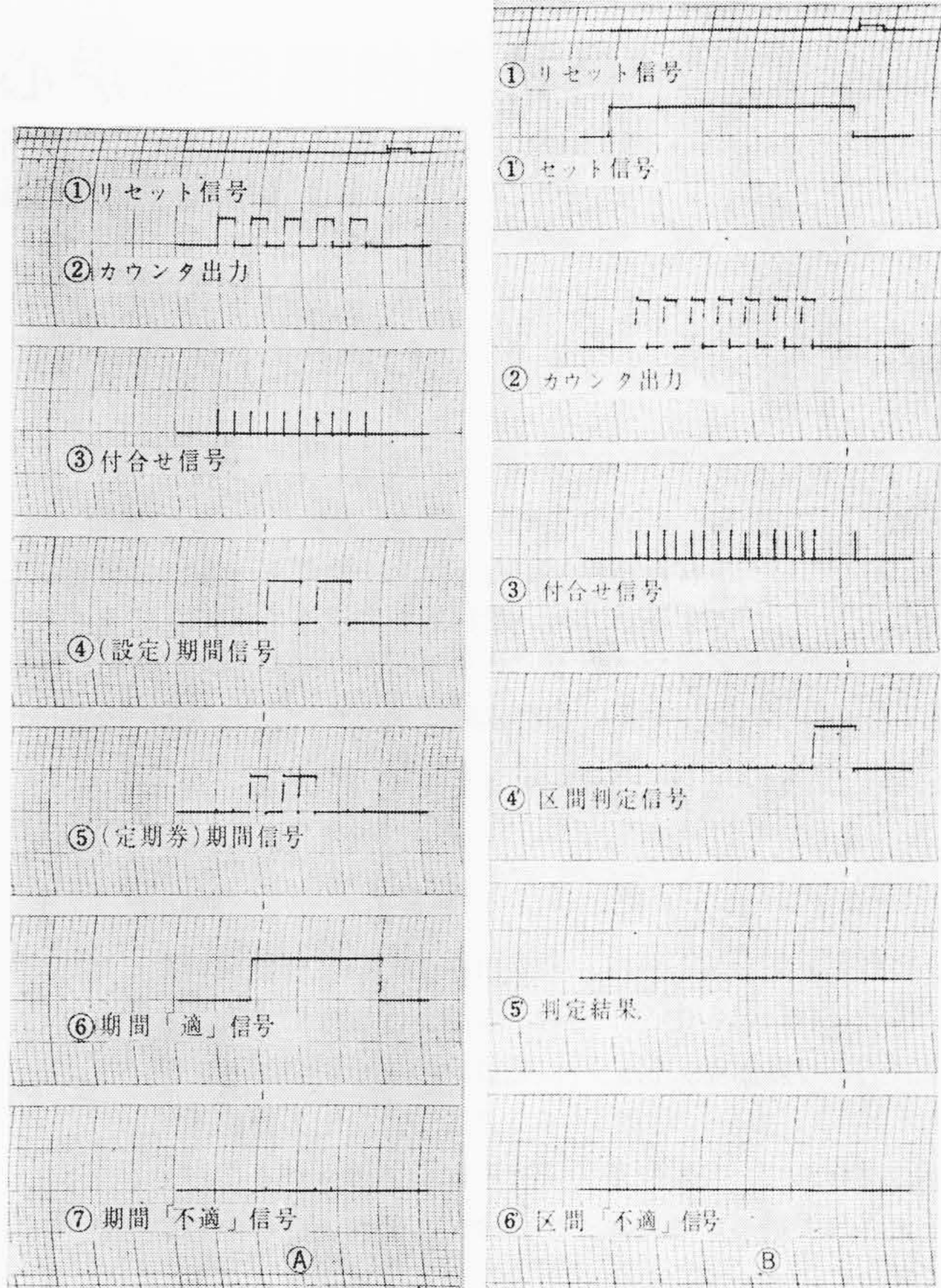


図10 自動改札装置の実験結果

5.2.2 自動改札装置の使用状況

本装置は製品化され二、三の鉄道会社に納入されたが、図9は東京急行元住吉駅での使用状況である。自動読取装置、感人装置などは、すべて同図(B)のようにプリント基板構造で、同図(A)のきょう体内部に収容されている。

5.2.3 実験結果

装置の動作試験結果の一例を図10(A)、(B)に示す。図(A)は通用期間、図(B)は区間がともに正常な場合の波形である。

6. 結 言

各種工業用の制御素子として開発した薄膜回路について、まず各種回路すなわち論理回路、遅延回路、増幅回路などについてその構成を明らかにした。そのうち、論理回路の特性計算式をあげ、次に、これら各回路の特性測定結果を示し、工業応用として十分な性能を有することを説明した。

薄膜回路はそれ自身従来のディスクリット回路に対し特徴をもっているとともに、半導体集積回路に比較しても、工業応用に適した特長をもっていることも述べた。

応用例としては、デジタル式自動列車制御装置および定期券自動改札装置をとりあげ、動作原理、性能などを明らかにするとともに、薄膜回路の使用状態を示した。

以上、本稿で述べた薄膜回路は現在日立製作所で製品化されている種類の一部であり、他の多くの工業分野への応力も着々と進められている。これらについては別の機会に紹介することにする。

参 考 文 献

- (1) たとえば、馬場ほか3名：信学誌 49, 689 (昭41-4)
- (2) たとえば、日評社：日立評論 46, 1175 (昭39-7)
- (3) たとえば、小西：電学誌 82, 1346 (昭37-8)
- (4) 小西：日立評論 48, 1145 (昭41-10)
- (5) 小西：第9回自動制御連合講演会資料 No. 221 (昭41-10)
- (6) 小西：電気学会東京支部大会 No. 43 (昭41-11)