

# エサキダイオード・トランジスタ結合による 単方向性パルス再生増幅器の解析

小室隆男\*, 秋山道雄\*\*, 本多誠一\*

(昭和49年9月9日受理)

## An Analysis of Esaki Diode-Transistor Hybrid Couple Unilateral Pulse Regenerator

Takao KOMURO, Michio AKIYAMA and Seiichi HONDA

Abstract:—In the previous paper, it was reported that a simple Esaki diode-transistor hybrid couple circuit was developed as a unilateral pulse regenerator for a unipolar pulse active transmission line.

This paper describes a computer analysis of operation of the regenerator. For the analysis, the computer program requires the transistor characteristics  $I_b(V_{be}, V_{ce})$  and  $I_c(V_{be}, V_{ce})$  and the diode characteristic  $I_d(V_d)$  to be supplied in forms of functions. It was assumed that the transistor equivalent circuit consisted of V-I characteristics of Ebers-Moll model, junction capacitances and a base resistance and the diode of the V-I characteristic of the thirteenth order polinomial and a junction capacitance.

The circuit operation of the regenerator is governed by nonlinear differential equations. These equations were solved by Runge-Kutta-Gill method on the computer.

Results of the analysis agreed with that of a pulse transmission experiment.

### 1. ま え が き

パルス伝送用能動線路を作る場合、単方向性パルス再生増幅器が必要である。エサキダイオード(以下EDと略す)をトランジスタ(以下TRと略す)のコレクタとエミッタ間に並列に接続したかんたんなED・TR結合回路を用いた単方向性パルス再生増幅器(以下PRと略す)を考え、パルス伝送実験の結果、この増幅器は明確なしきい値、方向性、波形整形作用をもち、直流給電が線路端より可能であることを示した<sup>1)</sup>さらにこれを同軸線路に挿入した能動線路の伝送実験についても報告した<sup>2)</sup>

ここでは、このPRの半値幅10 nsの伝送パルスを対象にした電子計算機による解析について述べる。このPRでは、TRが飽和領域にバイアスされているので、

解析には通常のTRの特価回路を使用することはできない。そこでTRの等価回路として、V-I特性はEbers Mollモデルを用い、それに接合容量とベース抵抗を付加したものを使用した。EDの等価回路として、V-I特性は13次多項式を用い、それに接合容量を考えた。これらについて導いた連立非線形微分方程式をRunge Kutta Gill法により、電子計算機で数値計算を行なった。その結果は、伝送実験の結果とかなりよく合っている。

### 2. PRとパルスに対する等価回路

図1に実際のPRを示す。この回路定数は、T; 1: -1のパルストランス(フェライトコアにエナメル線をバイファイラに10回巻)、TR; トランジスタ、2S

\* 茨城大学工学部電子工学科(日立市中成沢町)

\*\* 茨城大学工学部情報工学科( " )

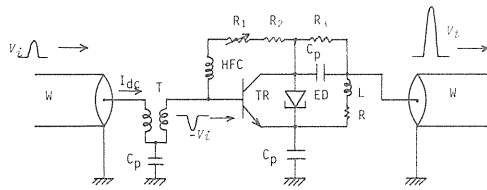


Fig. 1. Pulse regenerator, PR.

C989(NEC), ED; エサキダイオード, 1S1762 (NEC)を2本並列にしたもの, HFC; 高周波チョークコイル, Cp; 直流シャ断またはバイパスのコンデンサ, Cp=0.1 μF, L, R; 再生パルス波形を定めるインダクタンスと抵抗(フェライトコアにエナメル線1回巻), 100MHzの測定で L≒50 nH, R≒30Ω, R1, R2, R3; バイアス用抵抗, R1=10Ω, R2=20Ω, R3=5Ω, Idc; バイアス直流電流, Idc≒26 mA (このとき, ベースバイアス電圧約750 mV, コレクタバイアス電圧約65 mV)であり, 同軸線Wは30 2V(特性インピーダンスW=75Ω)である。

図1のPRをパルスに対して, 極性反転のトランスTを理想的と仮定, 極性については, 別途考慮することにして省略し, 図2の等価回路とする。

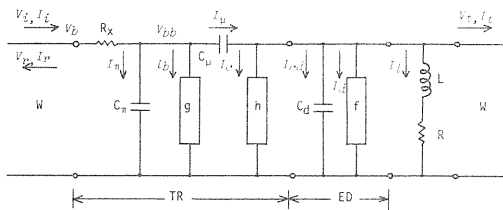


Fig. 2. Equivalent circuit of the PR for pulse signal.

この回路では, TRが飽和領域にバイアスされているため, 通常のTRの等価回路は使用できない。そこでTRの端子電流をベース, コレクタ電圧の関数 ( $g = g(V_{bb}, V_c)$ ,  $h = h(V_{bb}, V_c)$ )とし, これに接合容量 ( $C_n, C_u$ )とベース抵抗 ( $R_x$ )を加えた等価回路を考える。この領域では接合容量もベース, コレクタ電圧にかなり依存するが, かんたんのため回路の動作状態での平均的な値を用いる。EDの等価回路は, 非線形を示す  $f(V_c)$ と接合容量 ( $C_d$ , これにTRのコレクタ, エミッタ間の浮遊容量を含める)とする。

### 3. ED, TRの静特性の近似

図2の等価回路の  $g, h$ がベース, コレクタ電圧の,  $f$ がコレクタ電圧の関数であるので, 数値計算をするためには, これら関数近似しなければならない。この近似において, 電圧は[V], 電流は[A]を用いる。

EDの静特性は実測値をもとにして, (1)式に示すような13次多項式で近似する<sup>3)</sup>

$$I_d/2 = f(V)/2 = I_0 + (V-A)(V-B)(V-C)(D) \dots \dots \dots (1)$$

$$D = X_1 + X_2 V + X_3 V^2 + \dots \dots \dots + X_{10} V^9 + X_{11} V^{10}$$

$$\text{ただし } -30 \times 10^{-3} [V] \leq V \leq 520 \times 10^{-3} [V]$$

以下に(1)式の各定数を示し, その定数を用いた近似値と実測値を図3に示す。

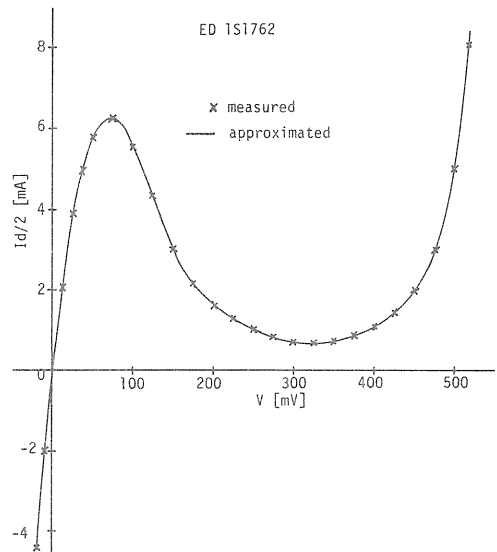


Fig. 3. Measured and approximated V-I characteristics of the ED.

$A = 2.750 \times 10^{-2}$	$B = 1.250 \times 10^{-1}$
$C = 4.900 \times 10^{-1}$	$I_0 = 4.000 \times 10^{-3}$
$X_1 = 2.375$	$X_2 = 5.646$
$X_3 = 1.059 \times 10^2$	$X_4 = -7.110 \times 10^3$
$X_5 = 8.823 \times 10^4$	$X_6 = -5.621 \times 10^5$
$X_7 = 2.185 \times 10^6$	$X_8 = -5.415 \times 10^6$
$X_9 = 8.385 \times 10^6$	$X_{10} = -7.412 \times 10^6$
$X_{11} = 2.858 \times 10^6$	

TRの静特性の近似は Ebers Moll モデル(エミッ

タ接地形式)で考える。TRの電圧, 電流を図4のように定めると,  $g, h$ は(2), (3)式となる。

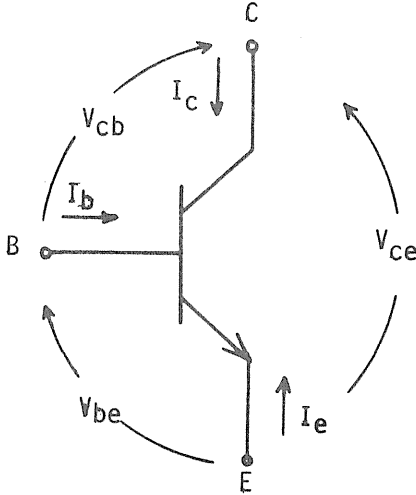


Fig. 4. Definition of transistor terminal variable.

$$I_b = g(V_{be}, V_{ce}) = I_{es}(1 - \alpha_F)(e^{39V_{be}} - 1) + I_{cs}(1 - \alpha_R)(e^{39(V_{be} - V_{ce})} - 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$I_c = h(V_{be}, V_{ce}) = \alpha_F I_{es}(e^{39V_{be}} - 1) - I_{cs}(e^{39(V_{be} - V_{ce})} - 1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $\alpha_F, \alpha_R$  はエミッタ接地電流増幅率  $\beta_F, \beta_R$  を実測して求める。また,  $I_{es}, I_{cs}$  は  $V_{cb}=0, V_{be}=0$  の

時,  $I_e = I_{es}(e^{39V_{be}} - 1), I_c = I_{cs}(e^{39V_{cb}} - 1)$  として, これらを実測して求める。式(2), (3)のTR (2SC989) についての, 各定数を以下に示し, この定数を用いた近似値と実測値を図5, 図6に示す。

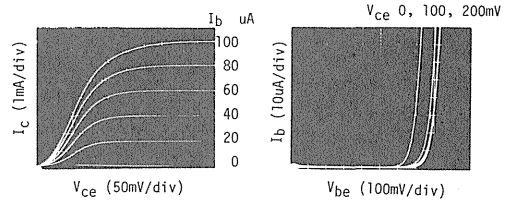


Fig. 6. Measured V-I characteristics of the TR.

$$\alpha_F = 0.9868, \quad \alpha_R = 0.6364$$

$$I_{es} = 1.115 \times 10^{-16} [A], \quad I_{cs} = 1.729 \times 10^{-16} [A]$$

4. パルスに対する応答

ED, TRがベース電圧  $V_b$ , コレクタ電圧  $V_c$  でバイアスされているとき, パルスに対するベース, コレクタ電圧の変化分を  $V_{bs}, V_c$  とすれば, 図2の各電流 ( $i_b, i_c, i_d$ ) のこれらに対する変化分は, それぞれ次式で表わされる。

$$\begin{aligned} i_b &= g(v_{bb} + V_b, v_t + V_c) - I_{ob} \\ i_c &= h(v_{bb} + V_b, v_t + V_c) - I_{oc} \quad \dots\dots\dots (4) \\ i_d &= f(v_t + V_c) - I_{od} \end{aligned}$$

ここで,  $I_{ob}, I_{oc}, I_{od}$  はバイアス電圧  $V_b, V_c$  のときのバイアス電流である。

図2より入力側で(5)式, 出力側で(6)式が成立する。

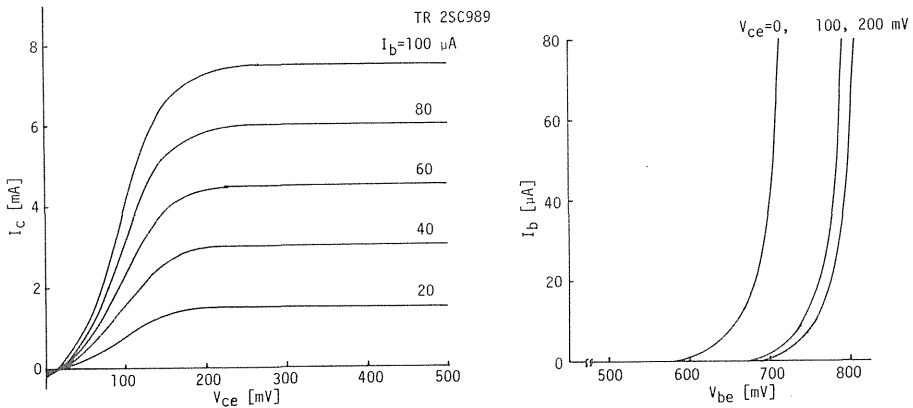


Fig. 5. Approximated V-I characteristics of the TR.

$$\left. \begin{aligned} v_i + v_r &= v_b \\ i_i + i_r &= i_b + i_\pi + i_\mu \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} i_\mu &= i_c + i_d + i_{ed} + i_1 + i_t \\ v_t &= R i_1 + L \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} i_n &= v_n / W \quad (n=i, r, t) \\ i_\pi &= C_\pi \frac{dv_{bb}}{dt}, \quad i_\mu = C_\mu \frac{d(v_{bb} - v_t)}{dt} \\ i_{ed} &= C_d \frac{dv_t}{dt}, \quad v_b = v_{bb} + R_x (i_b + i_\pi + i_\mu) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

である。

(5), (6), (7)式を整理すると次式となる。

$$(R_x + W)(C_\pi + C_\mu) \frac{dv_{bb}}{dt} = 2v_i - v_{bb} + (R_x + W) \cdot (C_\mu \frac{dv_t}{dt} - i_b) \dots\dots\dots (8)$$

$$v_r = v_{bb} + R_x \left\{ i_b + (C_\pi + C_\mu) \frac{dv_{bb}}{dt} - C_\mu \frac{dv_t}{dt} \right\} - v_i \quad (9)$$

$$(C_\pi + C_d) \frac{dv_t}{dt} = C_\mu \frac{dv_{bb}}{dt} - i_c - i_d - i_1 - \frac{v_t}{W} \dots\dots\dots (10)$$

$$L \frac{di_1}{dt} = v_t - R i_1 \dots\dots\dots (11)$$

これらの式を数値計算すれば、パルスに対するPRの動作を求めることができる。

### 5. 数 値 計 算

入力パルス  $V_i$  に raised cosine 波を用いて、きざみ幅 0.2ns で Runge Kutta Gill 法により数値計算した。なお、計算に使用した回路の定数を図7に示した。

これらの素子の値で問題となるのは、 $C_\pi$ 、 $C_\mu$  と  $L$ 、 $R$  である。 $C_\pi$ 、 $C_\mu$  は前述のように電圧依存性があるので、これを実測して、回路の動作状態での平均的な値を使用した。もう一つは再生波形を定める  $L$ 、 $R$  の値であるが、これはフェライトコアにエナメル線を1回巻いたもので、かなり周波数依存性 (5 MHz の測定で  $L \approx 500$  nH,  $R \approx 10\Omega$ , 30 MHz で  $L \approx 75$  nH,  $R \approx 25\Omega$ , 100 MHz で  $L \approx 50$  nH,  $R \approx 30\Omega$ ) をもつが、これもかんたんのために一定値を用いた。

図7~図10に計算結果と実測値を示し検討する。図8のPRの伝送特性の観測形はPRの入力側に2m、出力側に1mはなれた同軸線路上で観測したもので、図7、図8を比較するとき、時間軸を線路の長さだけ補正する必要がある。これらの結果をみると、計算した反射波が観測波形といくぶんずれているが、全体としてはよく合っている。図9はしきい値特性であるが、入力振幅 ( $V_{ia}$ ) 100mV 付近はよく合っているが全体として計算値の

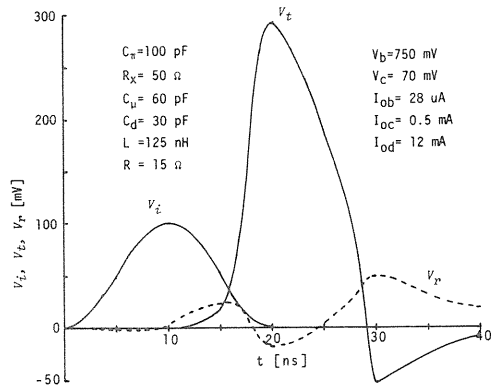


Fig. 7. Computed pulse transmission characteristics of the PR.

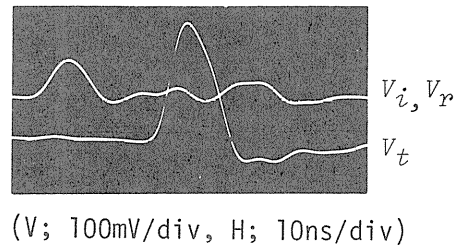


Fig. 8. Observed pulse transmission characteristics of the PR.

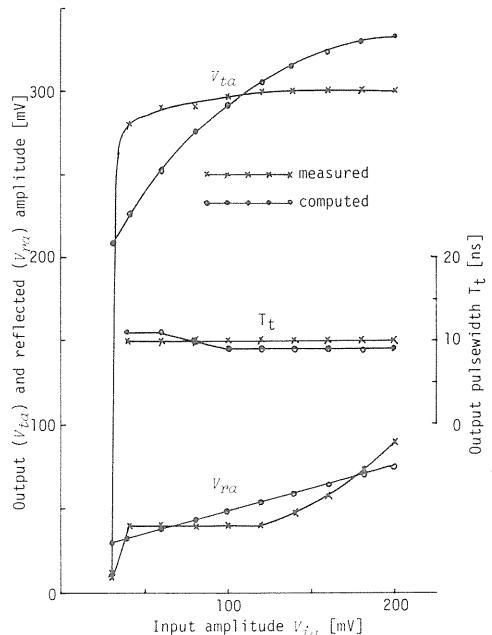


Fig. 9. Characteristics of output and reflected waves vs. input amplitude.

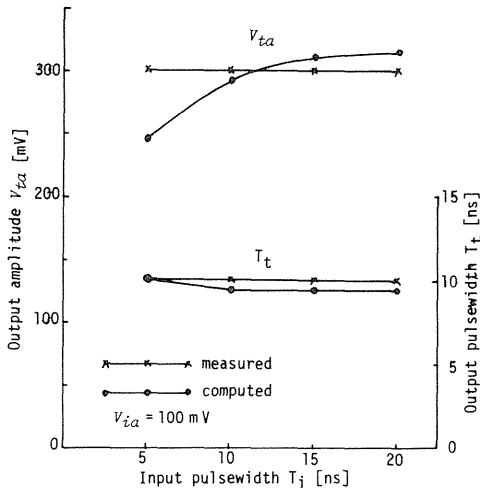


Fig. 10. Characteristics of output waves vs. input pulsewidth.

方がしきい値特性が悪い。図 10 の入力パルス幅 ( $T_i$ ) に対する出力パルスの関係は  $T_i = 5$  ns の出力振幅 ( $V_{za}$ ) がいくぶんずれている。

以上の結果をみると計算値と実測値は, 入力振幅 ( $V_{ia}$ ) 100 mV, 入力パルス幅 ( $T_i$ ) 10 ns 付近ではよく一致した結果が得られている。

## 6. むすび

この P R の解析は, T R が飽和領域にバイアスされているために, T R の V - I 特性を Ebers Moll モデルで近似し, それにベース抵抗と電圧依存性をもつ接合容量をかんとんのために一定値として付加した等価回路を考えた。また, E D は V - I 特性を 13 次多項式で近似し, それに接合容量を加えて考えた。さらに周波数依存性をもつ出力波形を定めるインダクタンスと抵抗もかんとんのために一定値として解析した。

以上の近似した特性を用いて, 伝送パルス幅 10 ns を対象にした数値計算の結果は, パルス伝送実験結果とよく一致している。

## 参 考 文 献

- 1) 小室, 秋山, 本多; 茨大工研究集報 第 19 卷 (1971), P. 87
- 2) 同上; 同上 第 20 卷 (1972), P. 193
- 3) 同上; 同上 第 17 卷 (1969), P. 139