

研究ノート

半導体レーザとフォトトランジスタを用いた 光双安定素子の設計法に関する一考察

青森職業訓練短期大学校 高井秀悦

A Consideration on The Design Method of The Bistable Optical Device Using Laser Diode and Phototransistor

Shuetsu Takai

要旨 近年、将来の高度光通信システムや情報処理システムを構築するためのキーデバイスとして光双安定素子の研究が活発に行われている。光双安定素子は、光の入出力の非線形性と何らかの帰還作用を組み合わせることで実現されヒステリシス特性、論理動作及び微分利得特性など様々な機能が得られる。

本研究ノートは新しい光双安定素子を提案することを目的としたものではなく、すでに提案された素子について、回路設計の立場で検討した結果を報告するものである。すなわち半導体レーザとフォトトランジスタを用いる光双安定素子について、所要の双安定特性を得るための回路設計法を検討し、双安定動作のシミュレーションプログラムを作成している。またその結果を利用して実際に素子を製作し、シミュレーションと実験結果の比較を行っている。

1. まえがき

近年、将来の高度な光通信システムや光情報処理システムを構築するためのキーデバイスとして光双安定素子の研究が活発に行われている⁽¹⁾。光双安定素子は、光の入出力の非線形性と何らかの帰還作用を組み合わせることで実現されヒステリシス特性、論理動作及び微分利得特性など様々な機能が得られる。そしてその実現方法についてはすでに数多くの構成法が提案されている⁽¹⁾。

新型の光双安定素子を考案するためには、非線形性とフィードバックの機構の物理的探索及びそれらの組合せによる動作原理の解析が必要であり、解析手法としては図式解法⁽²⁾が有効である。しかしこの分野の研究を新しく始めるような場合、図式解法による動作原理の説明だけでは分かりにくい面がある。そこでその点を補うために動作原理を数値シミュレーションしてみると理解が深まると考えられる。

本研究ノートは新型の光双安定素子を提案することを目的としたものではなく、すでに提案された光双安定半導体レーザ (Bistable Laser Diode)⁽³⁾ について、回路設

計の立場で図式解法によるシミュレーションプログラムを作成しそれをもとに素子を製作してみた結果の報告である。製作が容易であることを理由に選んだ例は、稲場らにより提案され実現された半導体発光素子と受光素子の組合せによる光双安定半導体レーザ⁽³⁾ である。すなわち半導体レーザ (Laser Diode: 略してLD) とフォトトランジスタ (Phototransistor; 略してPT) とを組み合わせる光双安定素子について、所要の双安定特性を得るための回路設計法を検討し、双安定動作のシミュレーションプログラムを作成している。またその結果を利用して実際に素子を製作し、シミュレーションと実験結果の比較を行っている。

2. LDとPTを用いた光双安定素子の設計法

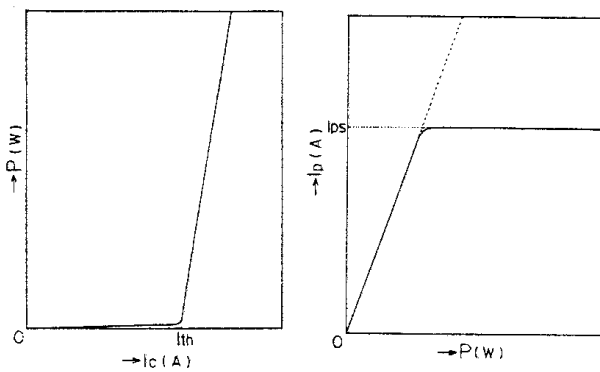
LDのI (電流) - L (光出力) 特性はよく知られているように図1 (a) のような電流に対してしきい値をもつ非線形特性である。一方、PTの入射光電力に対するコレクタ電流特性は、図1 (b) に破線で示したように線形領域が広いが、大きな負荷抵抗を用いれば同図に実線で示したように強制的に非線形特性を持たせることができる。従ってこのような状態で図2に示したような回路構成にすれば、容易に双安定特性を実現することができる⁽³⁾。

図 2 の回路構成において、LD と PT の非線形特性を直線近似して表すと、LD の I-L 特性は

$$P_0 = 0 \quad I_p < (V_{BE} + R_E I_{th}) / R_B \quad (1)$$

$$P_0 = K_2 \{ (R_B I_p - V_{BE}) / R_E - I_{th} \} \quad I_p > (V_{BE} + R_E I_{th}) / R_B \quad (2)$$

となる。ここで P_0 は LD の光出力電力、 I_p は PT に流れる電流、 V_{BE} はトランジスタのベース-エミッタ間電圧、 K_2 は LD の I-L 変換効率で微分子子効率に対応し、 I_{th} は LD のしきい値電流である。更に R_B と R_E



(a) LD の I-L 特性 (b) PT の受光感度特性

図 1 LD と PT の静特性

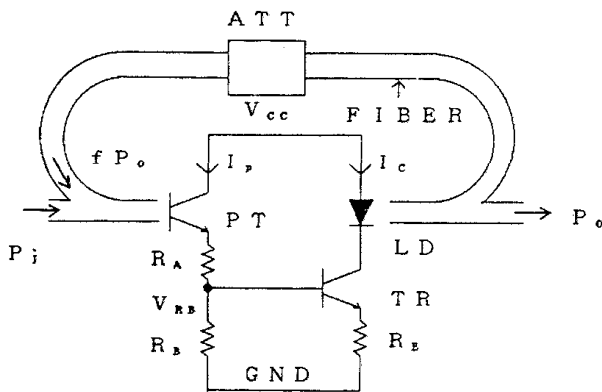


図 2 基本回路構成 (A-T-T: 可変光減衰器)

は図 2 に示す抵抗を表す。また PT の受光感度特性は

$$I_p = K_1 (P_i + fP_0) \quad P_i + fP_0 < P_{is} \quad (3)$$

$$I_p = K_1 P_{is} \quad P_i + fP_0 > P_{is} \quad (4)$$

で近似される。ここで K_1 は PT の光-電流変換効率、 P_i は光入力電力、 f は帰還率 (LD の出力電力のうちで光カップラを経由して PT に帰還される光電力 fP_0 と出力光として取り出す光電力 P_0 との比) 及び P_{is} は PT の

飽和光入力電力を表す。

光の入出力間のヒステリシス特性曲線は、図 3 に示したように近似的にそのヒステリシス幅 P_f と光出力 P_{os} の 2 つのパラメータで決定される。従って図 2 の基本回路において、所要の P_f と P_{os} とが得られるように回路定数を定めればよい。そのためには更にあと 2 つの量

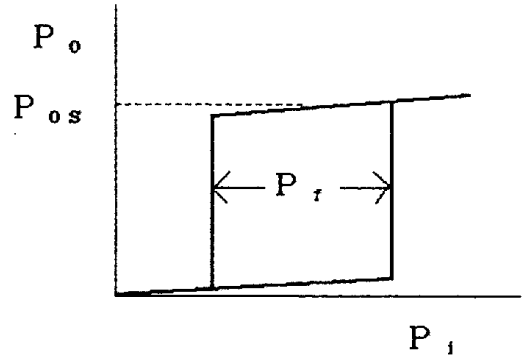


図 3 光の入出力間のヒステリシス特性曲線

例えば PT の飽和電流 I_{ps} と PT が飽和したときの抵抗 R_B の両端電圧 V_{RB} を指定する必要がある。このとき各抵抗値は

$$R_B = V_{RB} / I_{ps} \quad (5)$$

$$R_A = (V_{CC} - V_{PT}) / I_{ps} - R_B \quad (6)$$

$$R_E = (V_{RB} - V_{BE}) / (P_{os}/K_2 + I_{th}) \quad (7)$$

と求まる。ここで V_{CC} は電源電圧、 V_{PT} は PT の飽和電圧である。このようにして抵抗値が決定されると、LD からの光出力電力 P_{os} が求まる。つぎに所要のヒステリシス幅 P_f を得るためには、帰還率 f を決定すればよく

$$f = \frac{P_f}{P_{os}} - \frac{R_E I_{th} + V_{BE}}{K_1 P_{os} R_B} + \frac{I_{ps}}{K_1 P_{os}} \quad (8)$$

なる関係式から P_f が求められる。なお PT が飽和するときの光入力電力 P_{is} は

$$P_{is} = I_{ps} / K_1 - fP_{os} \quad (9)$$

で与えられる。以上のような回路設計法で定数を求めれば、所要の光出力電力 P_{os} とヒステリシス幅 P_f が決定される。

3. シミュレーションプログラム

2 章で説明した設計法に従って回路定数を決定し、双安定動作の図式解法⁽³⁾をシミュレーションし、ヒステリシス特性を画面表示するプログラムのフローチャートを図 4 に示す。

初めに入力パラメータであるヒステリシス幅 P_f 、光出力電力 P_{os} 、PTの飽和電流 I_{ps} 及び抵抗 R_B の電位差 V_{RB} をキーボード入力する。次に回路の電源電圧 V_{CC} 、PTの飽和電圧 V_{PT} と光-電流変換効率 K_1 、LDのしきい値電流 I_{th} と電流-光変換効率 K_2 、及びトランジスタのベース-エミッタ間電圧 V_{BE} を与えておき、式 (5) から式 (9) を用いて回路定数 R_A 、 R_B 、 R_E と帰還率 f 及び飽和光入力電力 P_{is} を計算する。

算出した定数を用いて、光入力電力 P_i を0.1ずつ増加させながら、直線近似したLDとPTの特性の式 (1) から式 (4) を連立一次方程式とみて、PTのコレクタ電流 I_p とLDの光出力電力 P_o を求める。その際LDとPTの特性は非線形なので次の3つの場合分けが必要である。すなわち①LD出力が0である解を探して表示する。②LDは発振しているが、出力光は飽和に至っていない状

態における解を探して表示する。③LD出力が飽和したときの解を探して表示する。①はPTに流れる電流 I_p が $0 < I_p < (2V_{BE} + R_E I_{th}) / R_B$ の範囲にあるときであり、フローチャートではこのときの I_p を I_1 で表している。次に②は $(2V_{BE} + R_E I_{th}) / R_B < I_p < K_1 P_{is}$ の範囲であり、このときの I_p を I_2 とおけば

$$I_2 = \frac{K_1(2V_{BE}K_2f + K_2fR_EI_{th} - R_E P_i)}{K_1K_2fR_B - R_E} \quad (10)$$

で与えられる。また③は式 (2) と (3) の交点の I_p が $K_1 P_{is}$ となる光入力電力を P_{i2} とすれば、 $P_{i2} / K_1 < I_p < P_{is} / K_1$ の範囲である。

以上のフローチャートに従って関数解法のシミュレーションプログラムをベーシックで作成した。プログラム例を図5に示す。

4. シミュレーションと実験結果の比較

シミュレーション例として、ヒステリシス幅 $P_f = 20\mu$ W、LDの飽和出力光電力 $P_{os} = 150\mu$ W、PTの飽和

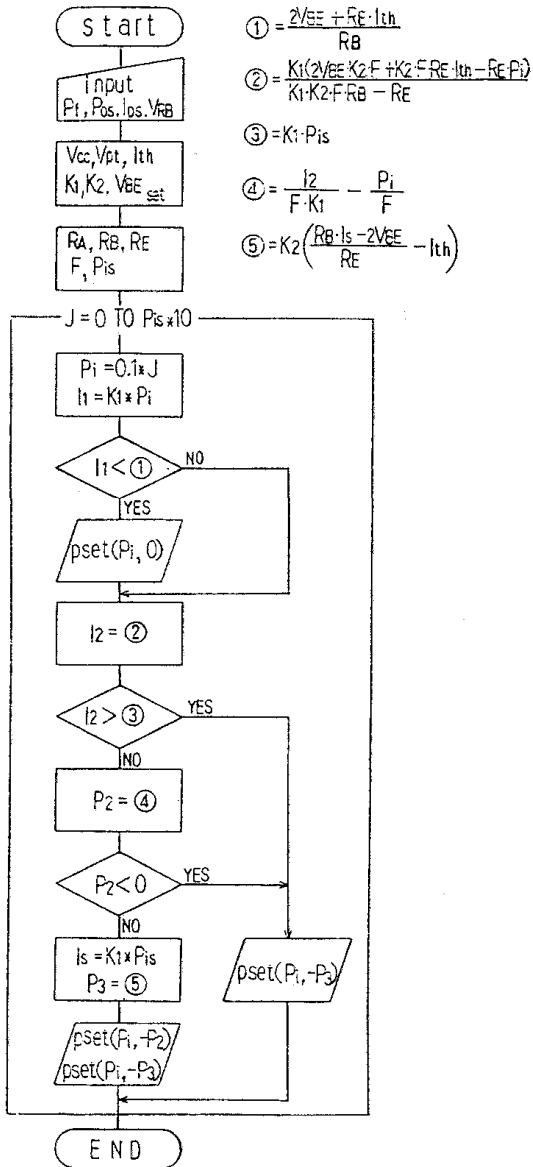


図4 フローチャート

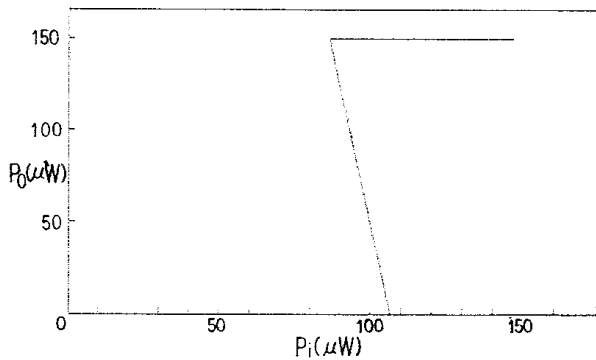
```

10 'BOD-S
20 '光双安定素子の設計プログラム'
30 ' PF:ヒステリシス幅 POS:出力パワ IPS:飽和電流 VRB:RBの両端電圧
40 INPUT"PF, POS, IPS, VRB=" ;PF, O, IPS, VRB
50 VCC=5:VPT=.25:I TH=42.37:K1=.0177:K2=29.583:VBE=.8
60 AB=(VCC-VPT)/(IPS*.001)
70 RB=VRB/(IPS*.001)
80 RA=AB-RB
90 IC=O/K2+ITH
100 RE=(VRB-2*VBE)/(IC*.001)
110 FH=PF/O-(RE*ITH*.001+2*VBE)/(K1*O*RB)*1000+IPS/(K1*O)
120 PIS=IPS/K1*F*O
130 PO=K2*((RB*IPS*.001+2*VBE)/RE)*1000-ITH)
140 P2=0:P3=0
150 X=1
160 INPUT"Fの値を変えますか? Y/N ";Hs
170 IF Hs="N" THEN 230
180 X=IPS/(K1*O)
190 N=(IPS-(RE*ITH*.001+2*VBE)/RB*1000)/(K1*O)
200 PRINT"FMAX=" ;N:PRINT"FMIN=" ;N:PRINT"F=" ;FH
210 INPUT"F=" ;F
220 GOTO 250
230 F=FH
240 ""BOD-FIG"
250 CLS 3
260 CONSOLE 0,25,0,1:WIDTH 80,25
270 WINDOW (-30,-(O*1.3))-(1.5*(INT(PIS))+9,O*.1)
280 LINE (0,-O*1.1)-(1.5*PIS+5,0),.B
290 FOR K=0 TO 15*(INT(PIS))/100
300 LINE (K*10,0)-(K*10,-O*.02)
310 NEXT K
320 FOR K=0 TO O/50+1
330 LINE (0,-K*50)-(2,-K*50)
340 NEXT K
350 PRINT"PF=" ;PF:PRINT"POS=" ;O:PRINT"IPS=" ;IPS:PRINT"VRB=" ;VRB
360 PRINT
370 PRINT"RA=" ;RA:PRINT"RB=" ;RB:PRINT"RE=" ;RE:PRINT"F=" ;F
380 PRINT
390 PRINT"RAB=" ;AB:PRINT"IC=" ;IC:PRINT"PIS=" ;PIS:PRINT"PO=" ;PO
400 FOR J=0 TO 1.3*PIS*10
410 PI=.1*J
420 I1=K1*PI
430 IF I1<(2*VBE+RE*ITH*10^(-3))/RB*10^3 THEN 440 ELSE 450
440 PSET (PI,-0),4
450 I2=K1*(2*VBE+K2*F*10^3+K2*F*RE*ITH-RE*PI)/(K1*K2*F*RB-RE)
460 IF I2>K1*PIS THEN 550
470 P2=I2/(F*K1)-PI/F
480 IF P2<0 THEN 550
490 IS=K1*PIS
500 P3=K2*((RB*IS*10^(-3)-2*VBE)/RE-ITH*10^(-3))*10^3
510 PSET (PI,-P2),4
520 IF F<N THEN 560
530 PSET (PI,-P3),4
540 GOTO 560
550 PSET (PI,-P3),4
560 NEXT J
570 IF X=3 THEN 580 ELSE 140
580 END
    
```

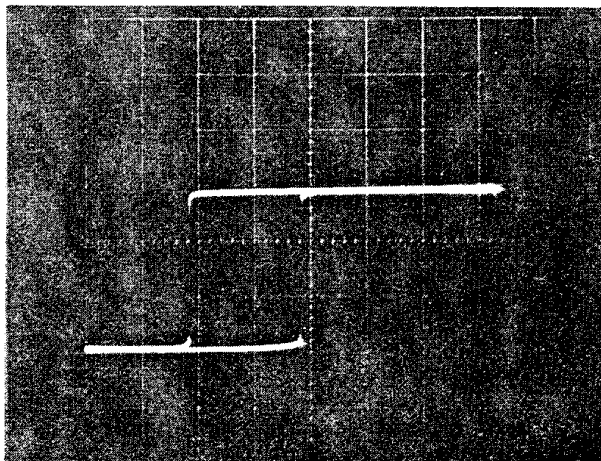
図5 シミュレーションプログラム

電流 $I_{ps} = 2 \text{ mA}$ 及び抵抗 R_B の両端電圧 $V_{RB} = 3.5 \text{ V}$ とした場合の計算結果を図 6 (a) に示す。シミュレーション波形はアルファベットの“Z”を左右折り返した形になるが、斜めの直線部分は電気回路の負性抵抗に相当し安定には存在できない点を表す。従ってこの結果は所要のヒステリシス特性を表している。これらのパラメータを入力したとき、帰還率 f は 0.18 であり、各回路定数は $R_A = 625 \Omega$ 、 $R_B = 1.75 \text{ k}\Omega$ 、 $R_E = 40 \Omega$ となる。

これらの定数を用いて図 2 の回路を製作し、ヒステリシス特性を測定した結果を図 6 (b) に示す。実験に用いた LD は $0.78 \mu\text{m}$ 帯で発振する屈折率導波形 Channeled-substrate planar 形の HL 7801G であり、PT は TPS 601 である。入力用の光源は直線性を考えて LED (FH-511) とし、LD の出力光のモニタは PT (TPS 601) とした。また 2 入力 1 出力 (或いは 1 入力 2 出力) の光カップラは、プラスチックファイバを加工して自作した。さらに光可変減衰器 (ATT) もプラスチックファイバ用の光コネクタを加工して自作した。帰還率 f の測定結果は 0.014 であった。

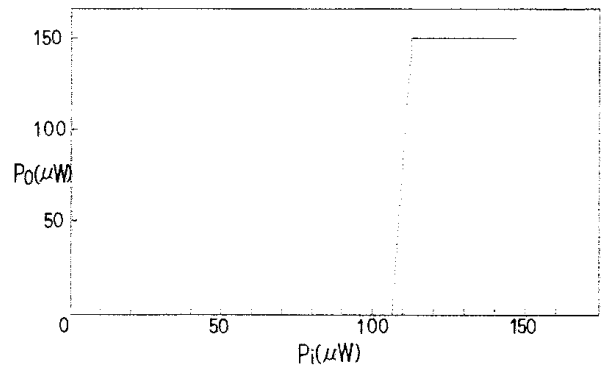


(a) シミュレーション結果

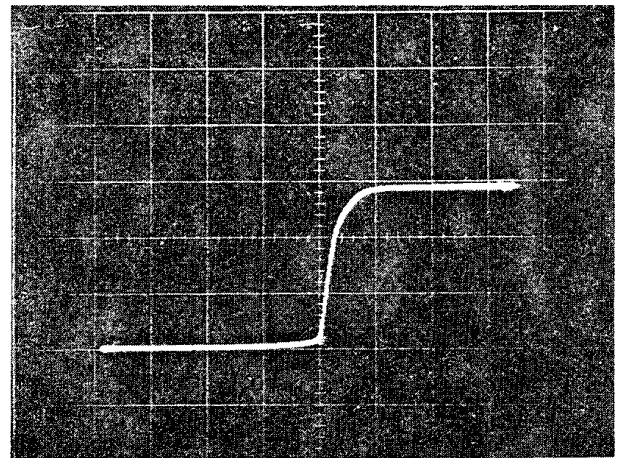


(b) 実験結果 (H : $10 \mu\text{W}/\text{div}$, V : $50 \mu\text{W}/\text{div}$.)

図 6 ヒステリシス特性



(a) シミュレーション結果



(b) 実験結果 (H : $10 \mu\text{W}/\text{div}$, V : $50 \mu\text{W}/\text{div}$.)

図 7 微分利得特性

これらの結果を比較すると、ヒステリシス特性の形はほぼ一致しているが、帰還率に約 1 桁の違いがある。この原因は自作した光ファイバカップラの特性の再現性が悪いことと、それに伴い変換効率に組み込んだカップラの損失の値に問題があることによると考えられる。

次に微分利得特性は帰還率 $f = 0$ とすれば容易に実現することができる。しかしシミュレーション上では発散の問題があるので近似的に $f = 10^{-4}$ とした場合のシミュレーション結果を図 7 (a) に示す。また同図 (b) に $f = 0$ として実験した結果を示す。この場合にはシミュレーションと実験結果はほぼ一致している。

5. むすび

LD と PT を用いた光双安定素子について回路設計の立場から検討した。すなわち所要の光の入出力特性を得るための回路設計法を考察し、図式解法をシミュレーションするプログラムを作成し、更にその結果を利用して素子を製作した。その結果帰還率に一桁程度の違いはあるが、入出力特性はほぼ良好な一致がみられた。今後の問題は光カップラの改良とその損失のプログラムへの

フィードバック及びこの素子は非常に低速なので高速化の検討である。

筆者はこれまでに提案された光双安定素子の見直しと新しい原理の探索⁽⁴⁾を行っているが、この光双安定素子のように容易に実験できる例はまれで、設備などの関係で実験できない場合が多い。このような場合に図式解法をシミュレーションすると、定量化された光の入出力特性に関する知見が得られる⁽⁵⁾。例えば分波器形の光双安定素子⁽⁴⁾の場合図式解法と結合モード理論による解析とでは入出力波形に違いがみられ、理論の適用範囲を考える際にも役立つ。従って図式解法のシミュレーションを併用しながら、動作原理を探求することは極めて有益である。

謝 辞

光カップラの作製治具を作って下さり、また光コネクタの加工もして下さった本学機械システム系の成田敏明先生に深く感謝する。また卒業研究テーマとして、シミュレーションプログラムを担当した野上愛子君と実験を担当した山ノ内謙吾君に感謝する。

参考文献

- (1) 神谷：「特集光論理素子 総論」, O plus E, No. 98, pp. 63 - 68 (1988-01).
- (2) P. W. Smith : 「Electrooptic Nonlinear Fabry-Perot Devices」, IEEE J. Quantum Electron., vol QE-14, pp. 207-212 (March 1978).
- (3) 小川, 伊藤, 稲場：「双安定半導体レーザ」, 応用物理, vol. 52, pp. 877-882 (1983-10).
- (4) 高井：特願 5 8 - 1 7 0 0 2 8, 特願 5 9 - 1 4 8 1 1 5 (O plus E誌の特許情報のページNo. 81, p.126 (1986-08) 参照).
- (5) 野上：「電気光学効果を用いた非線形ファブリペローデバイスの数値実験」, 青短内部資料(1988-08).