

BILED/BILD组合回路的光学逻辑运算

刘树田 李淳飞 吴杰
(哈尔滨工业大学应用物理系)

提 要

利用激光二极管或发光二极管混合双稳态回路(BILD/BILED)的组合,得到了光学多稳态,光学异或逻辑门和光学 R-S 触发器。这种光电子学的逻辑回路与大规模集成技术完全相容,因此有希望应用于光学信息处理,光通信和光计算。

关键词: 光学逻辑门;光计算;光学双稳态及多稳态;光电混合双稳态回路。

一、引 言

双稳态半导体激光器及其逻辑功能的研究,近年来受到人们的关注。由于双稳态半导体激光器的工作能量低,具有增益特性,与集成光路相容,工艺上比较成熟,因而有可能先于其它双稳态器在光通信和光计算等领域中获得应用。在过去的几年中,人们提出了几种不同机理的双稳态半导体激光器。如由于腔内饱和吸收引起的光学双稳性^[1,2]; 由于激活层中热应力导致 TE-TM 偏振模增益不同引起的偏振双稳性^[3]; 以及耦合腔(C^3)的增益饱和特性引起的光学双稳性^[4]等等。还有一种由小川洋等人提出的光电混合双稳态半导体激光器。他们先后用发光二极管(LED)和激光二极管(LD)与光电探测器(PD)构成了双稳态发光二极管(BILED)和双稳态激光二极管(BILD)回路。并且用 BILED 回路演示了“与”,“非”和光学触发器等逻辑元件^[5~7]。我们首次利用 BILED 回路的组合,简便地得到了光学多稳态,光学异或逻辑门和光学 R-S 触发器,从而用最少的分立元件完成了各种二进制逻辑门。

二、组合 BILED 回路的光学多稳态

我们在实验中发现将两个 BILED 回路并联或串联均可以实现光学三稳态。并联时其结构如图 1。

图中左右两侧分别为两个 BILED 回路,LED 为 GaAsP 发光二极管,PD 为 Si 光电三极管 3DU32,晶体管 T 用以放大光电流。 V_B 是偏置电压, R_s , R_1 , R_2 分别是主支路和两个分支路的限流电阻。 R_{t1} 和 R_{t2} 用以控制两个 BILED 回路的开启阈值。 f_1 和 f_2 分别是 BILED₁ 和 BILED₂ 的光反馈系数;两个直接调制的发光二极管作为输入光 P_i , P_o , P_{o1} 和 P_{o2} 。考虑到 LED 的光输出与驱动电流近似成线性关系,输入、输出信号可直接由限流电阻两端的电压信号取得。

将回路中各支路的电流分别标为 I, I_1, I_2, Id_1 和 Id_2 , 于是有:

$$I = I_1 + I_2 + Id_1 + Id_2,$$

$$I = I(V_B, R_s, R_1, R_2, P_i).$$

通常情况下, Id_1 和 Id_2 只有 $10 \sim 100 \mu A$, 可在分析中略去, 因而写成

$$I \approx I_1 + I_2,$$

$$I = I(V_B, R_s, R_1, R_2, P_i).$$

若两个双稳态回路中只有一个工作在上稳态, 如 $BILED_1$, 此时 PD_1-T 饱和,

$$I_{1s} \approx V_B / (R_s + 2R_{LED} + R_1 + R_{ce}) = I_s.$$

其中 I_{1s} 和 I_s 分别为 I_1 和 I 的饱和值。此时已将非线性元件线性化, 并等效为电阻。若两个双稳回路都工作在上稳态, 整个回路的电阻减小为 $R \approx R_s + (R_1 + R_{LED} + R_{ce}) // (R_2 + R_{LED} + R_{ce}) + R_{LED}$ 。此时饱和电流 $I_s' > I_s$ 。而 $BILED_1$ 回路中由于 A 点的电位减小, 使得饱和电流 $I_{1s}' < I_{1s}$ 。如图 2 所示, 在无光反馈情况下, I 和 I_1 在一个 $BILED$ 单独工作及两个 $BILED$ 同时工作时, 饱和电流随输入光强的变化关系。

由于 R_{i1} 和 R_{i2} 的分流作用, 选择适当的 R_i 值, 可以控制 $BILED$ 的开启阈值。如图 3, 当 R_{i1} 减小时, $BILED_1$ 回路中 I_1 在无光反馈情况下随 P_i 的变化曲线向右移动, 从而使其开启阈值增大。

选择 $R_{i2} < R_{i1}$, 从而 $P_{on2} > P_{on1}$, 其中 P_{on1} 和 P_{on2} 分别为 $BILED_1$ 和 $BILED_2$ 的开启阈值, 随着 $BILED_1$ 和 $BILED_2$ 的两次上跳, 输出 P_0 和 P_{o1} 随 P_i 的变化皆形成三稳态, 见图 4(a)、(b)、(c)。

在图 1 所示的三稳态回路中, P_{o1} 的第三个稳态介于第二个稳态与低态之间。而 P_0 的第三个稳态大于第二个稳态。这两种不同的输出特性, 可分别用于二进制逻辑和多值逻辑

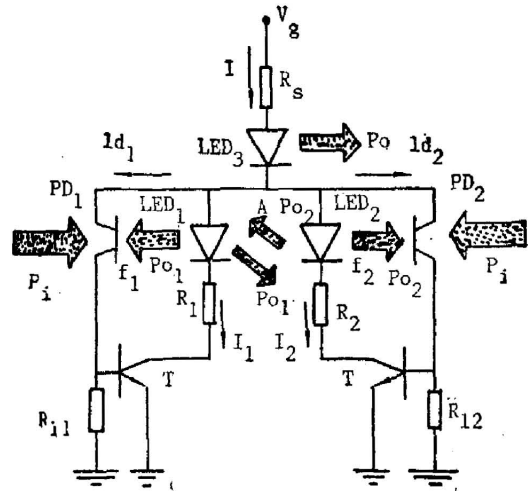


Fig. 1 Diagram of optical tristable circuit

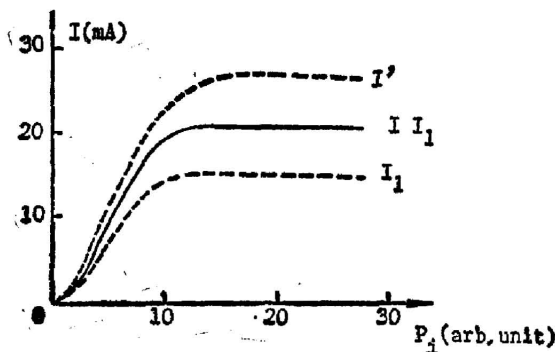


Fig 2 $I-P_i$ and I_1-P_i curves for only $BILED$ works (solid line) and for $BILED$ and $BILED$ work together (dashed line)

$$V_B = 4.0 \text{ V}, R_s = 50 \Omega, R_1 = R_2 = 20 \Omega, R_{i1} = R_{i2} = \infty$$

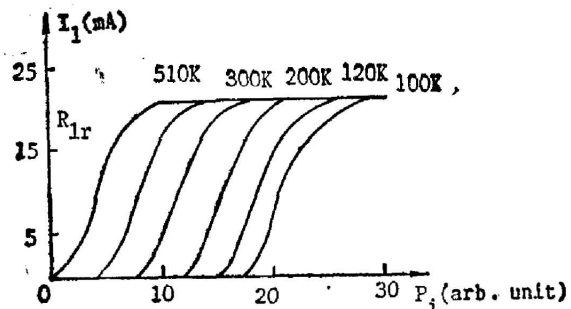


Fig. 3 I_1-P_i curve for different values of R (without optical feedback)

$$V_B = 4.0 \text{ V}, R_s = 50 \Omega, R_1 = 20 \Omega$$

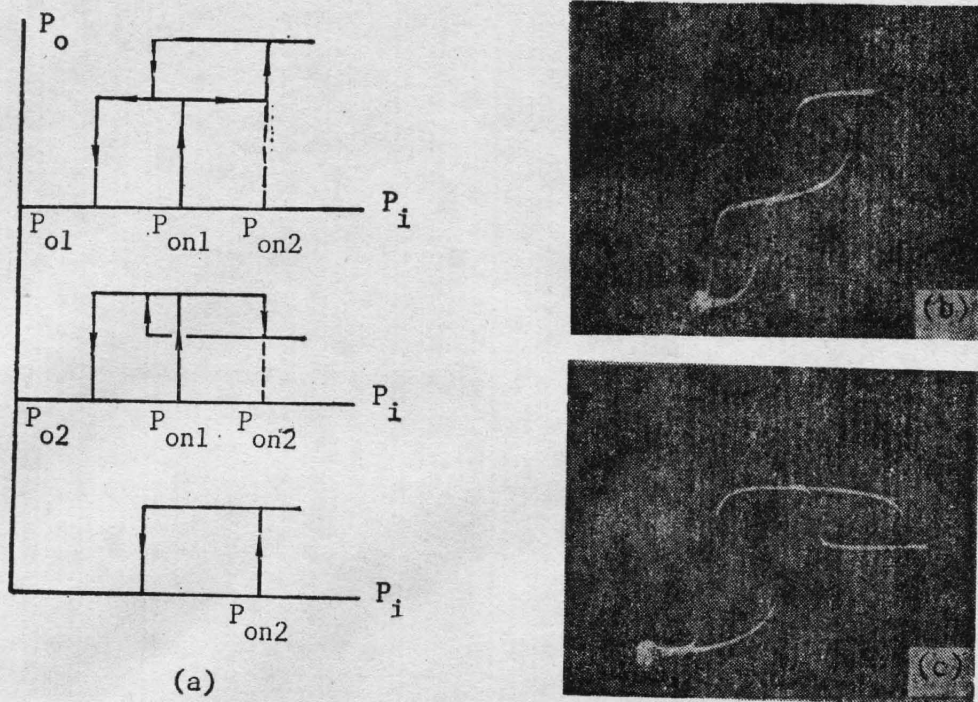


Fig. 4

(a) The hysteresis loop of the output vs. input.

(b), (c) Experimental results, $V_B=5.5\text{ V}$, $R_s=50\ \Omega$, $R_1=20\ \Omega$, $R_2=10\ \Omega$, $R_{i1}=510\ \text{k}\Omega$, $R_{i2}=200\ \text{k}\Omega$

的设计。光学二进制异或逻辑门和光学 R-S 触发器正是利用了 P_{o1} 的输出特性。而 P_o 可以对多值信号输入作出多值输出的响应,其作用类似于 I^2L 电路中的“电流镜”。因而可以作为基本元件设计光学多值逻辑门。

更多级的光学多稳态可用多个 BILED 回路并联得到。如图 5 是由三个 BILED 回路构成的四稳态的实验结果。

光学多稳态同样也可以由 BILED 回路的串联得到。如图 6(a) 所示的三稳态回路。BILED₂ 的反馈端与电阻 R_3 并行接在 BILED₁ 的接地端。 R_3 的作用是当 BILED₂ 尚未开启时为 BILED₁ 提供电流回路。令 $R_{i1} > R_{i2}$, 故随着 BILED₁ 和 BILED₂ 先后在不同光强下的上跳, P_{o1} 随 P_i 呈现三稳态。见图 6(b)。

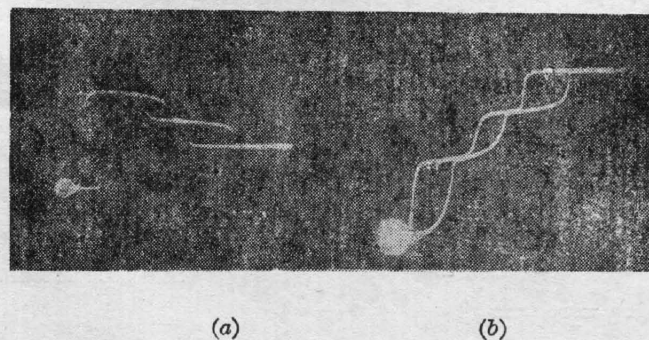


Fig. 5 Experimental results of multistable circuit which consists of three BILED's in parallel

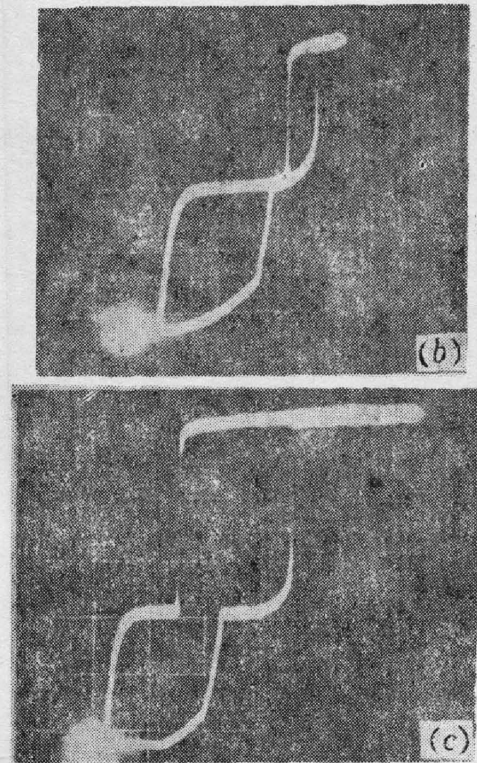
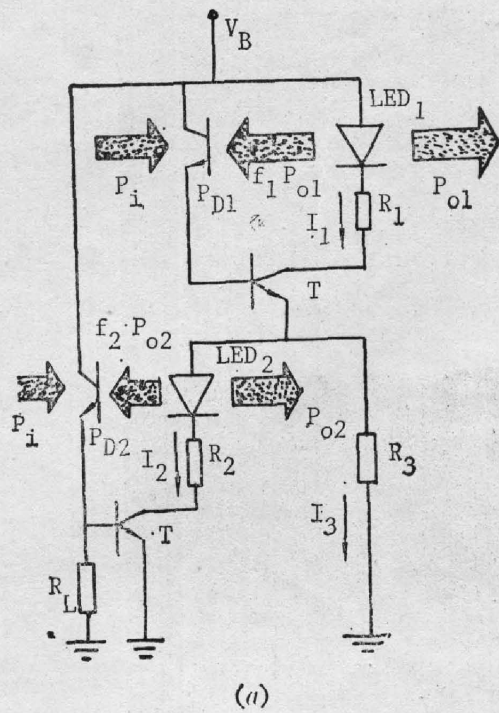


Fig. 6

(a) Diagram of tristable circuit which consists of two BILED's in series. (b), (c) Experimental results of multistability; (b) $V_B=6.0V, R_3=300\Omega, R_1=20\Omega, R_2=3\mu\Omega, R_l=510k\Omega$; (c) $V_B=6.3V, R_3=400\Omega, R_1=20\Omega, R_2=3\Omega, R_l=300k\Omega$

三、光学异或逻辑门及光学 R-S 触发器

1. 光学异或逻辑门

由两个 BILED 回路并联构成的光学异或逻辑门见图 7。该图与图 1 基本相同,不同的是输入光强 P_i 用两个输入方波信号代替,并在 BILED₁ 中加入一个二极管作为箝位,使其输出 P_{o1} 在低态时十分小。

如前面提及的,图 1 结构的三稳态回路中,输出光强 P_{o1} 的第三个稳态值比第二个稳态

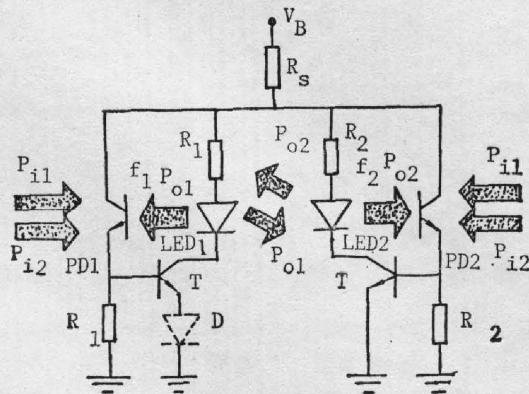


Fig.7 Diagram of optical XOR gate

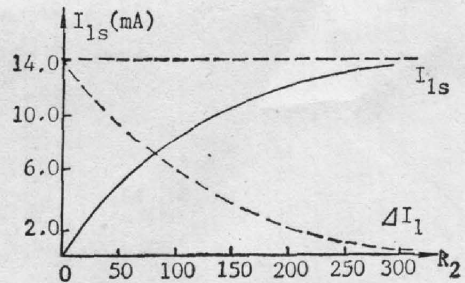


Fig.8 $I_{1s}-R_2$ and ΔI_1-R_2 curves, $V_B=4.0V, R_s=50\Omega, R_l=20\Omega$

值低。其差值 $\Delta I_1 = I_{1s} - I'_{1s}$ 与偏置电压和各支路的电阻分配有关; 当 $V_B = 4.0\text{V}$, $R_s = 50\ \Omega$, $R_1 = 20\ \Omega$ 时, $I_{1s} = 14\text{mA}$ 。固定 $R_1 = 20\ \Omega$ 改变 R_2 , ΔI_1 和 I'_{1s} 与 R_2 的关系曲线如图 8 所示, $R_2 = 0$ 时, $I'_{1s} \approx 0.8\text{mA}$ 已经十分接近低态。图 9(a) 是输入光 P_i 为三角波时, P_{o1} 随 P_i 的变化回线。在 $R_2 = 0$ 时, 第三个稳态可以认为与低态重合。从该图可清楚地理解光学异或逻辑门的操作过程。当 $P_{i1} = P_{i2} = 0$ 时, BILED₁ 不能开启, $P_{o1} = 0$; 当 P_{i1} , P_{i2} 之中有一个为 1 时, BILED₁ 开启, 此时 $P_{o1} = 1$, 而当 $P_{i1} = P_{i2} = 1$ 时, BILED₂ 开启而 BILED₁ 关闭, $P_{o1} = 0$ 。从而完成了异或逻辑运算。图 9(b) 给出了光学异或逻辑门的输入、输出波形。图中输入信号为两个低频电信号的叠加。

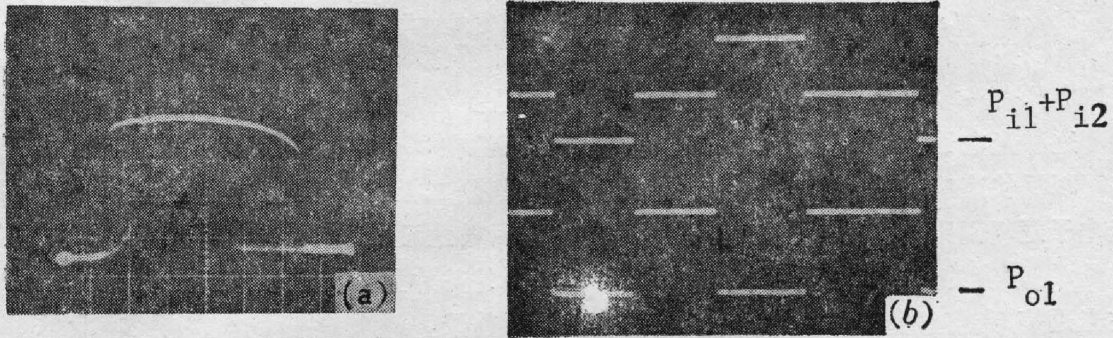


Fig. 9

(a) Characteristic loop of output P_o vs. a triangle wave input P_i .

(b) Input-output waveform. $V_B = 4.0\text{V}$, $R_s = 50\ \Omega$, $R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 0$, $R_{i1} = 510\ \text{k}\Omega$, $R_{i2} = 120\ \text{k}\Omega$

2. 光学 R-S 触发器

小川 洋等人曾用两个反相器(即“非”门)构成光学 R-S 触发器。实验证明仅用两个 BILED 回路的并联, 亦可得到光学 R-S 触发器。其结构与光学异或逻辑门基本相同。所不同的是输入信号由光信号 R , S 分别取代了, 此处 BILED₁ 的输出 P_{o1} 用作光学 R-S 触发器的 Q_n 输出, 而 BILED₂ 的输出 P_{o2} 用作触发器的 \bar{Q}_n 输出。在 BILED₁ 的输入端有两个信号 R 和 \bar{Q}_n , 而在 BILED₂ 输入端的两个信号为 S 和 Q_n 。同时我们在两个输入端分别加入两个固定的外部维持光 H_1 和 H_2 。见图 10(a), 当输入光为一个三角波时, P_{o1} 随 P_i 有如图 9(a) 所示的回线。增大 f_1 和 f_2 , 可以使 BILED₁ 和 BILED₂ 的下跳阈值充分小; 若 $R = 1$, $S = 0$, BILED₁ 开启, $Q_n = 1$, $\bar{Q}_n = 0$; 若 $R = 0$, $S = 1$, 由于 $Q_n = 1$, 故使得 BILED₂ 开启, $\bar{Q}_{n+1} = 1$ 而 $Q_{n+1} = 0$; 当 $R = 0$, $S = 0$ 时, 若原来的状态在 $Q_n = 1$, $\bar{Q}_n = 0$ 状态, 由于维持光

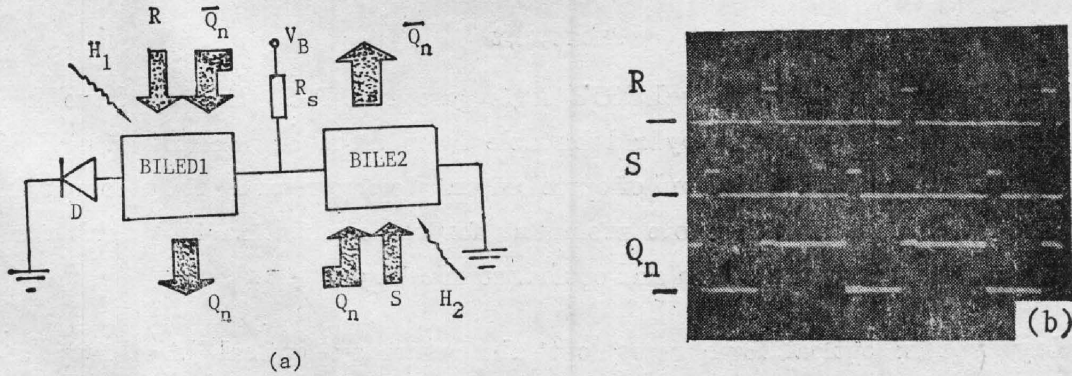


Fig.10 Schematic diagram of an optical R-S flip-flop. Input-output waveform

$H_1 > P_{off1}$ 使得 BILED₁ 仍处于上态, 但需要 $H_2 + Q_n < P_{on2}$, 因而 BILED₂ 不能开启, 维持原状态不变。若原状态处在 $Q_n = 0, \bar{Q}_n = 1$, 只需 $H_2 > P_{off2}$, 而且 $H_1 + \bar{Q}_n$ 稍小于 P_{on1} , 该状态也维持不变。这样的条件可以通过调节 R_n 和 f_i 来获得。当 $R = S = 1$ 时, 无论原来处于何状态, 将变得不确定。图 10(b) 给出了光学 R-S 触发器的输入、输出波形。

四、结 论

通过 BILED 回路的并联或串联组合, 我们得到了光学多稳态, 并在此基础之上得到了光学异或逻辑门和光学 R-S 触发器。这种组合的 BILED 回路具有相当大的灵活性: (一) 可以实现所有的二进制逻辑门, 并可以实现二进制数的全加运算。(二) 可以实现多值逻辑中几个基本的逻辑门。这对光计算无疑具有重要的意义。

这种光电子学的逻辑回路的速度不是很快, 大约在 $200 \mu s$ 。快速处理的光电子逻辑回路可以用快速响应的激光二极管或发光二极管与雪崩二极管 APD 来构成。代换后的这种光电子逻辑回路具有较高的响应速度(约 $1 ns$)。目前业已成熟的半导体集成技术可以使这种简单、紧凑的光电子逻辑回路集成在小于 $1 mm$ 的基片上。这将使这种光电子逻辑回路在光通信, 光信息处理和光计算中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ch. Harder, K. Y. Lau, and A. Yariv; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **40**, No. 3 (Jan), 124~126.
- [2] H. Kawaguchi, and G. Iwane; *Electron. Lett.*, 1981, **17**, No. 4 (Feb), 167~168.
- [3] Y. C. Chen and J. M. Liu; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**, No. 1 (Jan), 16~18.
- [4] N. K. Dutta, G. P. Agrawal, and M. W. Focht; *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**, No. 1 (Jan), 30~32.
- [5] Y. Ogawa, H. Ito and H. Inaba; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 11 (Jun), 1878~1880.
- [6] 小川 洋, 伊藤弘昌, 稻场文男; 《应用物理(日)》, 1983, **52**, No. 10 (Oct), 877~882.
- [7] 奥村谦一郎, 小川 洋, 伊藤弘昌, 稻场文男; 《电子通信学会会志(日)》, 1983, **J66-C**, No. 5 (May), 393~400.

Optical logic implementation in composite BILED/BILD circuits

LIU SHUTIAN, LI CHUNFEI, AND WU JIE

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology)

(Received 20 June 1988; revised 1 June 1989)

Abstract

Optical multistability, optical XOR logic gate and R-S flip-flop have been demonstrated using composite hybrid bistable laser diode or light emitting diode (BILD/BILED) circuits. This kind of optoelectronic logic circuit is fully compatible with VLSI technique and therefore promising for the application to optical signal processing, optical communication and optical computing.

Key words: optical logic gates; optical computing; optical bistability and multistability; optoelectronic hybrid bistable circuit.