

# 光学双稳态半导体激光器的理论分析

吕惠志 苑立波 孙晶华 孙秋华

(哈尔滨工程大学物理部, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 引入了正切函数作为非线性光-电流关系函数, 借助于速率方程, 建立了光学双稳态半导体激光器的理论模型。对器件本身进行了理论分析, 讨论了器件的主要特性, 给出了数值分析结果, 提出了器件性能改进方法。

**关键词** 光学双稳态, 半导体激光器, 速率方程。

## 1 引 言

近年来高速, 高效的全光通讯系统的研究与开发非常活跃。尤其是光学双稳态器件的研究更是倍受重视。如利用 GaAs, InSb 等半导体材料的吸收端附近的非线性折射率特性构成的光学双稳器件<sup>[1~2]</sup>。但是这种器件本身不包含信号放大, 难以解决多级连接时的光信号放大问题<sup>[3]</sup>。为此, 人们开始寻找直接利用光源本身, 特别是适于集成化的半导体激光器的非线性来实现光学双稳态运转, 并同时产生光放大的方法。稻场文男等人发展了一种双稳态半导体激光器<sup>[4]</sup>, 实验表明, 该器件可实现光微分, 光限幅及各种光运算功能<sup>[5]</sup>。利用其光微分特性所实现的线性光放大器, 其增益带宽可达 9~10 GHz。其光开关特性的信号响应时间为 10 ns, 预计可达到半导体激光器的响应极限<sup>[6]</sup>。由于其本身具有光放大功能, 因而可降低对输入信号幅度的要求, 并保证有足够大的输出信号, 在多级连接使用中十分有利。然而尽管稻场文男等人给出了详尽的实验结果, 但缺乏系统的理论分析, 为了进一步提高该器件的性能, 寻找改进方法, 本文利用速率方程, 建立了该器件的理论模型, 对器件本身进行了理论分析, 讨论了器件的主要特性, 给出了数值分析结果, 并指出了改进其性能的途径。

## 2 基本方程

稻场文男等人发展起来的双稳态半导体激光器 (BILD) 的结构由半导体激光器 (LD) 与光电三极管 (PT) 组成<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示。半导体激光器发出的光的一部分反馈到光电三极管, 由于器件本身的非线性光-电流特性, 使得该系统可实现双稳态运转。为了描述光电三极管的非线性, 将光电三极管视为由光电二极管 (PD) 和具有线性放大倍数  $\kappa$  的三极管组成, 如图 2 所示。对于光电二极管, 其非线性光-电流关系函数由下式给出

$$P = a \operatorname{tg}(bl) \quad (1)$$

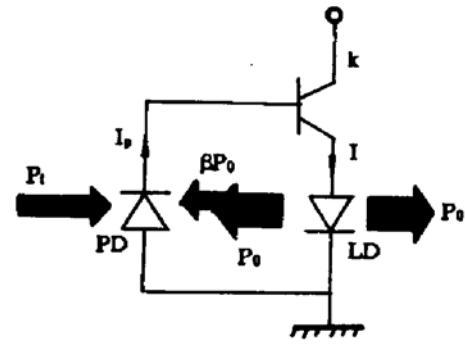
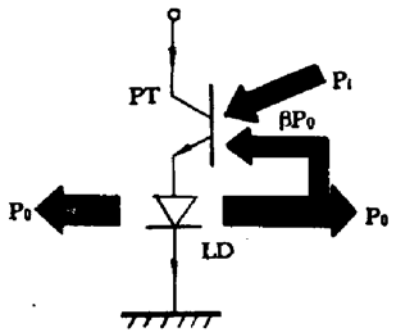


Fig. 1 The principle circuit of the bistable semiconductor laser diode

Fig. 2 Experimental circuit of BILD

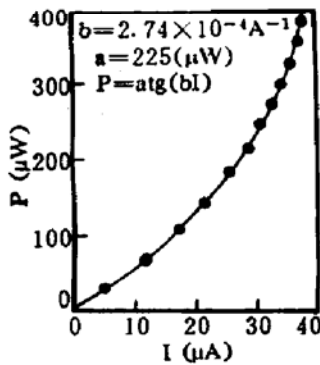


Fig. 3 Testing data of the type of 2CU1 PD and its theoretical curve with  $a = 2.25 \times 10^{-4} \text{ W}$ ,  $b = 2.74 \times 10^4 \text{ A}^{-1}$

其中  $P$  为入射光功率 ( $\text{W}$ ),  $I$  为其光电流 ( $\text{A}$ ).  $a$ 、 $b$  为特性参数。对典型的 2CU1 型光电二极管,  $a = 2.25 \times 10^{-4} \text{ W}$ ,  $b = 2.74 \times 10^4 \text{ A}^{-1}$ 。图 3 给出了实验测试点与拟合曲线, 由此可以看出两者符合得较好。由图 1 有

$$P = P_i + \beta P_0 \tag{2}$$

式中  $\beta$  为半导体激光器与光电二极管间的光耦合系数。将 (1) 式代入 (2) 式得

$$P_i + \beta P_0 = a \text{tg}(bI_p) \tag{3}$$

流经半导体激光器的总的驱动电流为

$$I = \kappa I_p + I_0 \tag{4}$$

式中  $I_0$  为三极管的偏置电流, 一般情况下  $I_0 \neq 0$ , 但从研究器件动态特性的角度看,  $I_0$  的存在并不影响问题的讨论, 为简便计, 令  $I_0 = 0$ 。则

$$I = \kappa I_p \tag{5}$$

对于半导体激光器, 按速率方程<sup>[7]</sup>

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV_a} - AS_0(N - N_c) - \frac{N}{\tau_s} \tag{6}$$

$$\frac{dS_0}{dt} = AS_0(N - N_c) + \frac{CN}{\tau_y} - \frac{S_0}{\tau_p} \tag{7}$$

式中  $S_0$  为活性区内平均光子密度,  $N$  为载流子密度,  $A$  为受激辐射系数, 它与活性区的材料及几何形状有关。  $C$  为自发辐射系数,  $\tau_s$  为载流子发光再复合寿命,  $\tau_p$  为光子平均寿命,  $\tau_y$  为平均载流子寿命,  $V_a$  为活性区体积, 典型值为  $V_a = 3 \times 10^{-12} \text{ cm}^3$ <sup>[8]</sup>。式中受激辐射项采用线性增益假设,  $N_c$  为增益曲线特征常数, 与温度有关, 当  $T = 298 \text{ K}$  时, 对于 GaAs, 典型值为  $N_c = 2.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $C = 5 \times 10^{-6}$ <sup>[8]</sup>。其它典型值取  $\tau_s = 10^{-9} \text{ s}$ ,  $\tau_p = 10^{-12} \text{ s}$ ,  $\tau_y = 10^{-8} \text{ s}$ ,  $A = 5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ <sup>[7]</sup>。半导体激光器中平均光子密度  $S_0$  与输出光功率  $P_0$  的关系为

$$P_0 = \frac{h\omega\eta_e V_a}{2\tau_p} S_0 = \chi S_0 \tag{8}$$

其中  $\eta_e$  为外部微分量子效率, 式中系数 2 是考虑到激光由两侧输出且假设两者相等。而  $\chi = h\omega\eta_e V_a / 2\tau_p$ , 为一系数, 将所给各值代入,  $\chi = 1.755 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{M}^3/\text{s}$ 。

同理假设  $P_i$  也是由相同结构和特性的半导体激光器发出的光，则与其相应的平均光子数密度为

$$P_i = \chi S_i \tag{9}$$

于是(3)式化为

$$\chi(S_i + \beta S_0) = a \operatorname{tg}(bI_i) \tag{10}$$

### 3 光输入输出特性

在稳态近似下，令  $dN/dt = 0$ ； $dS_0/dt = 0$ 。联立方程(6)和(7)，并考虑(5)式及(10)式，可得  $S_0$  与  $S_i$  所满足的方程

$$(AS_0 + \frac{C}{\tau_v}) \left[ \frac{\kappa}{b} \operatorname{arctg} \frac{\chi}{a} (S_i + \beta S_0) - \frac{eV_a}{\tau_r} S_0 \right] = AS_0 I_{th} \tag{11}$$

其中

$$I_{th} = \frac{eV_a}{\tau_r} (N_c + \frac{1}{\tau_p A}) = \frac{eV_a N_{th}}{\tau_r} \tag{12}$$

为半导体激光器阈值电流， $N_{th} = N_c + \frac{1}{\tau_p A}$  为阈值载流子密度。对 GaAs 激光器，由上述典型数据算出的  $N_{th} = 2.3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  及  $I_{th} = 11 \text{ mA}$ ，但对于实际的激光器，由于结构等原因，实际阈值电流远大于该值。图 4~图 7 是  $\kappa$  及  $\beta$  取不同值时的  $S_0 \sim S_i$  曲线图，由图可见  $S_0(S_i)$  函数可分为三种类型：

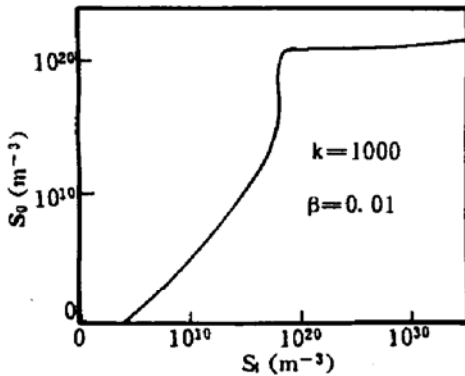


Fig. 4 The photon output vs. input characteristic curve with  $\kappa = 1000$  and  $\beta = 0.01$

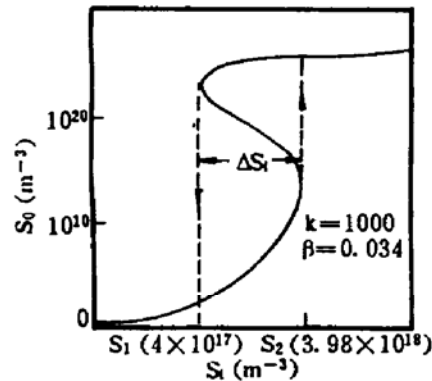


Fig. 5 The optical output vs. optical input bistable characteristics curve with  $\kappa = 1000$  and  $\beta = 0.034$ , where  $\Delta S_i = S_2 - S_1$

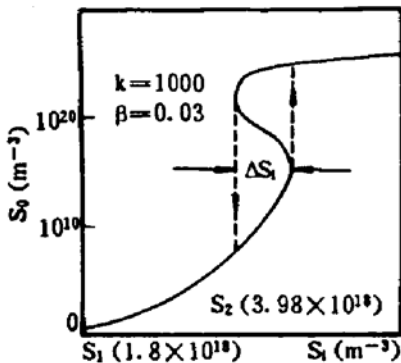


Fig. 6 The optical output vs. optical input bistable characteristics curve with  $\kappa = 1000$  and  $\beta = 0.03$ , where  $\Delta S_i = S_2 - S_1$

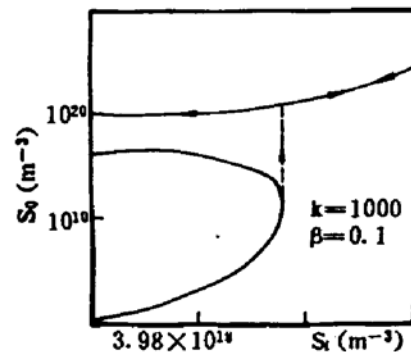


Fig. 7 The self-oscillatory curve with  $\kappa = 1000$ ,  $\beta = 0.1$ , system can only get up to higher state in  $S_i = 3.98 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ , but can not get down to lower state even  $S_i = 0$

① 微分曲线: 无滞后存在, 曲线单调上升直至某一饱和值后基本稳定。

② 双稳曲线: 改变  $\kappa$  及  $\beta$  值的大小, 曲线的滞后量的大小也不同, 在  $\kappa$  值固定时, 随着  $\beta$  值的增加, 其滞后量也增加。而曲线转折点处  $S_i$  (相当于双稳态 触发阈值光功率) 值的大小则主要由  $\kappa$  值决定。

③ 自激振荡曲线: 如图 7 所示, 当输入光强达到某一阈值后,  $S_0$  由低态跃变到高态。继续增加  $S_i$ , 则  $S_0$  趋于饱和。而当  $S_i$  连续减小时,  $S_0$  并不发生由高态到低态的转变。即使  $S_i$  减小到零,  $S_0$  依然保持在高水平值上。这种现象称为双稳态半导体激光器的自激振荡。

## 4 双稳态存在的条件

由方程(1)~(7), 在稳态近似下,  $dN/dt = 0$ ;  $dS/dt = 0$ , 并略去自发辐射(令  $C = 0$ ), 则可求得

$$\arctg \frac{\chi}{a} (S_i + \beta S_0) = \frac{eV_a b}{\kappa \tau_p} S_0 + \frac{eV_a b}{\kappa \tau_s} N_{th} \quad (13)$$

令  $\mu_1 = eV_a b / \kappa \tau_p$ ;  $\mu_2 = (eV_a b / \kappa \tau_s) N_{th}$ 。则方程(13)化为

$$\arctg (\chi/a) (S_i + \beta S_0) = \mu_1 S_0 + \mu_2 \quad (14)$$

方程(14)为一超越方程, 其解可以用图解法求出, 即若令

$$y_1 = \arctg (\chi/a) (S_i + \beta S_0), \quad y_2 = \mu_1 S_0 + \mu_2 \quad (15)$$

则其解为  $y_1$  与  $y_2$  的交点, 为使两条线有交点, 直线方程  $y_2$  的截距应满足  $\mu_2 < \pi/2$ , 由此求出放大倍数  $\kappa > 200$ 。这是首先必须满足的一个条件。在  $\kappa$  值足够大的情况下(这是实际应用中的理想情况), 直线截距  $\mu_2$  很小, 如  $\kappa = 1000$  时  $\mu_2 \approx \pi/10$ , 可近似认为  $\mu_2 \approx 0$ 。于是为使直线与反正切曲线有两个交点, 必须满足近似条件  $\mu_1 < (\chi\beta/a)$  即  $(eV_a b) / (\kappa \tau_p) < (\chi\beta/a)$ , 两边同时乘以  $S_0 / (I - I_{th})$  得

$$b \left[ \frac{(S_0/\tau_p)}{(I - I_{th})/(eV_a)} \right] < \frac{\beta \kappa}{a} \frac{P_0}{(I - I_{th})} \quad (16)$$

因为  $\frac{(S_0/\tau_p)}{(I - I_{th})/(eV_a)} = \eta_{stim}$  为内部微分量子效率, 且  $\eta_{stim} \approx 1$  而  $[P_0/(I - I_{th})] = \alpha$  为半导体激光器的光电转换效率, 由此得到

$$\kappa \alpha \beta > ab \quad (17)$$

为双稳态存在的必要条件, 其中  $a, b$  为光电二极管光-电流特性曲线的拟合系数。

## 5 数值分析结果

由基本方程出发, 对器件的输入输出特性进行了数值模拟分析, 其主要结果如下:

### 5.1 双稳态阈值触发光功率 $P_{th}$

在双稳态运转的条件下, 为使其由两个稳态中的低态跃迁到高态去, 所需输入信号的强度即所谓阈值触发光功率(见图 6)。该值直接反映了器件的灵敏度。数值模拟结果表明,  $P_{th}$  主要由  $\kappa$  决定而受  $\beta$  的影响很小。例如, 当  $\kappa = 1000$  时  $\beta$  由  $0.02 \sim 0.0349$ ,  $P_{th}$  的相对变化率仅为千分之一。 $P_{th}$  与  $\kappa$  的关系的数值模拟结果如图 8 所示。由图可见, 随着  $\kappa$  值的增加,  $P_{th}$  减少的幅度不是很大,  $\kappa = 1000$  时,  $P_{th}$  约为  $\kappa = 500$  时的  $1/2$ 。

### 5.2 信号上升速度与临界减慢效应

联立方程(6)及(7), 在稳态近似下, 令  $dN/dt = 0$ , 并略去自发辐射项(令  $C = 0$ ) 可以导

出

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m &= \frac{A\tau_s}{A\tau_s S_0 + 1} \left( \frac{\kappa}{eV_s b} \arctg \left[ \frac{\chi}{a} (s_i + \beta S_0) \right] - \frac{N_G}{\tau_s} \right) - \frac{1}{\tau_s} \\ &= \frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m - \frac{1}{\tau_s} \end{aligned} \tag{18}$$

$\frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m$  代表信号强度相对变化速率，是一个直接与信号上升速度有关的物理量，我们称它为归一化信号上升速率，通过计算机数值模拟，给出  $\kappa = 1000$ ,  $\beta = 0.1$  时的  $\frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m \sim S_0$  关系曲线如图 9 所示，其中  $S_i$  作为参变量代表不同的外界输入信号强度。由图可见，在  $S_i < 4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  的条件下，当  $S_0 = 0$  时，起始信号上升速率  $\frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m < \frac{1}{\tau_s}$ ，此时腔内光子数不会有净增加，因而不会产生激光振荡，而当  $S_i$  达到某一临界值  $\frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m |_{S_0=0} \geq \frac{1}{\tau_s}$ ，此时信号上升速率开始大于零，腔内受激辐射才能维持下去，随着  $S_0$  的增大，腔内光子数亦急速增大。然后在  $S_0 \approx 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  时开始趋于饱和，并且  $(dS_0/dt)_m$  逐渐趋于零。但当  $S_i$  刚刚超过某一临界值时， $dS_0/dt$  亦趋于零，此时的开关速度显著变慢，称为临界减慢效应<sup>[9]</sup>。图 9 中给出的阈值触发光功率  $S_i$  略大于上节(5.1)讨论中的数值，其原因是忽略了自发辐射造成的。

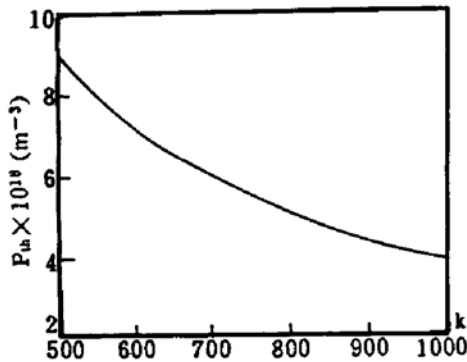


Fig. 8 The threshold optical power for trigger bistability from lower state to higher state

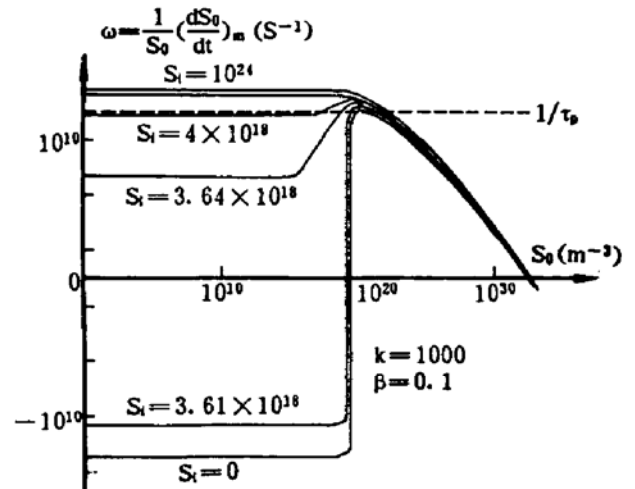


Fig. 9 Normalized signal rising rate curve. where, input signal ( $S_i$ ) is a parameter variation

### 5.3 双稳回线宽度 $\Delta S_i$

图 5、图 6 给出了在双稳态运转条件下，当输入信号  $S_i \geq S_2$  时，则输出信号  $S_0$  可由低态跃变到高态，而当  $S_i \leq S_1$  时，系统输出信号由高态反回到低态，构成一闭合双稳回线。本系统中，双稳回线宽度  $\Delta S_i = S_2 - S_1$  是可调的，如上所述，当  $\kappa$  一定时， $S_2$  可视为不变(阈值触发光功率不变)。计算机模拟结果指出  $S_1$  随着  $\beta$  的增大而减少，因而  $\Delta S_i$  相应的增加，如当  $\kappa = 1000$  时， $S_2 \approx 3.98 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ， $\beta = 0.01$  时出现微分曲线； $\beta < 0.0348$  时出现双稳曲线； $\beta \geq 0.0349$  时出现自激振荡曲线。图 10 给出了  $\kappa = 1000$  时双稳回线宽度与  $\beta$  之间的关系曲线。

### 5.4 信号放大倍数与饱和效应

如上所述，该器件是一个具有放大功能的主动型光逻辑器件，只要大于其阈值光功率的光信号都可以触发它，而其输出信号的大小主要由  $\kappa$  决定。可以根据需要适当调整  $\kappa$  而得到所需的输出信号强度。如取  $\kappa = 700$ ，由图 8 查得其阈值光功率  $P_{th} = 6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  而其输出信号

强度经计算得  $S_0 = 5.68 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , 即大约放大了 100 倍, 图 11 给出了固定输入信号强度 ( $S_1 = 9 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ) 的条件下输出信号强度  $S_0$  与系统放大倍数  $\kappa$  的关系。由图可见, 随着  $\kappa$  的增加, 输出信号强度并非线性的增大, 而是逐渐减慢而趋于一个饱和值。这一现象的出现, 是由于半导体激光器中受激辐射的饱和效应所导致的。

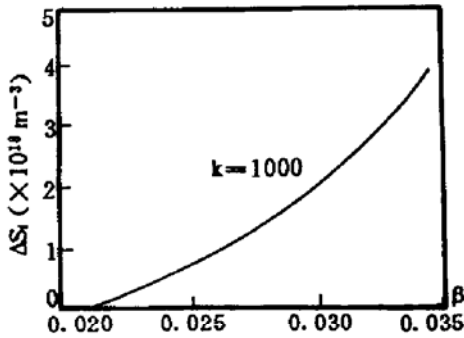


Fig. 10 The width of bistable loop  $\Delta S_1 = S_2 - S_1$  versus  $\beta$  with  $\kappa = 1000$

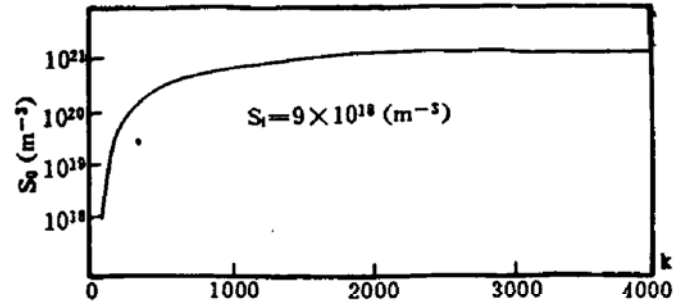


Fig. 11 Photons density (output signal) within cavity of semiconductor laser vs. amplify parameter  $\kappa$ . The output signal tend to saturation, Where  $\kappa \geq 2000$

## 6 结 论

综上所述, 本文以速率方程为出发点, 建立了该器件的理论模型, 讨论了器件的各种可能的运转方式, 给出了实现双稳态运行的必要条件。讨论了器件的信号上升速度, 放大能力, 阈值特性等问题及其相互关系, 为进一步了解双稳半导体激光器的工作特性提供了理论依据。据此提出对该器件可能的改进途径为:

1) 由该器件及其组合可构成各种逻辑元件及功能触发器<sup>[5, 10]</sup>。作为逻辑元件, 在光通讯及各种信息处理应用中, 一个首要问题是运算速度问题。通过对信号上升速度的讨论, 得出归一化信号上升速率可表为

$$\frac{1}{S_0} \left( \frac{dS_0}{dt} \right)_m = \kappa \Psi(S_0) - \Psi_0 \quad (19)$$

式中  $\Psi(S_0)$  及  $\Psi_0$  为以器件本身参量及腔内光子密度  $S_0$  的函数; 而  $\kappa$  为放大倍数。由(19)式可知, 为提高开关速度, 提高  $\kappa$  值是一个最直接有效的办法, 此外选用响应时间短的半导体激光器, 光电二极管等亦同样重要。

2) 为防止临界减慢效应, 输入信号幅度不能太低。此外, 提高  $\kappa$  值可相应提高输出信号幅度及降低阈值触发功率。从实用角度出发, 也可以选用具有较大放大倍数的雪崩光电二极管代替光电二极管。利用现代的光电集成技术, 亦可将系统及其组合集成在一片基底上。

## 参 考 文 献

- [1] M. Gibbs, S. L. McCall, T. N. C. Venkastan *et al.*, Optical bistability in semiconductors. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**(6): 451~453
- [2] D. A. B. Miller, S. D. Smith, A. Johnston., Optical bistability and signal amplification in a semiconduction crystal; Applications of new low-power nonlinear effects in InSb. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**(9): 658~660

- [3] M. J. Adams, H. J. Westlake, M. J. Omahony *et al.*, A comparison of active and passive optical bistability in semiconductors. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(9) : 1498~1504
- [4] Y. Ogawa, H. Ito, H. Inaba, New bistable optical device using semiconductor laser diode. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1981, **20**(9) : L646~L648
- [5] K. Okumura, Y. Ogawa, H. Ito *et al.*, Optical bistability and monolithic logic functions based on bistable laser/light-emitting diodes. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(4) : 377~382
- [6] 小川洋, 伊藤弘昌, 稻场文男, 光双安定半导体レーザー. 应用物理, 1983, **52**(10) : 877~882
- [7] 末松安晴编著, 半导体レーザーと光集积回路, オーム社, 1984 年版
- [8] Y. Suematsu, S. Akiba, T. Hong. Measurement of spontaneous-emission factor of AlGaAs double-hetero-structure semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, **QE-13**(8) : 596~600
- [9] For example, R. Bonifacio, P. Meystre., Critical slowing down in optical bistability. *Opt. Commun.*, 1979, **29**(1) : 131~134
- [10] Hui-zhi Lu, K. Matsuura, M. Horita., Optical flip-flop based on bistable hybrid circuits. *The Trans. of IEICE*, 1990, **E73**(12) : 2020~2021

## Theoretical Analysis of Bistable Semiconductor Laser Diode

Lu Huizhi    Yuan Libo    Sun Jinghua    Sun Qiuhua

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(Received 29 January 1994; revised 5 October 1994)

**Abstract** A tangential function is introduced to describe the nonlinear light-electric current relation of a photo-electric diode. Based on the rate equations of semiconductor laser and the nonlinear function equation mentioned above, we have established the theory of bistable laser diode (BILD) and analyzed the major properties of BILD using this method. Finally, the ways for improving the response feature of BILD are proposed according to the numerical analysis results.

**Key words** optic bistability, semiconductor laser diode, rate equations.