

半导体激光双稳运转中的相变*

张远程 宋 骞 何绍伟

(武汉大学, 430072)

提要: 利用 Landau 相变理论对光纤耦合输出反馈泵浦半导体激光双稳系统运转中的非平衡相变进行了理论分析。指出, 反馈参量的增加是系统由二级相变向一级相变转化的条件。由此导出了系统三种工作模式及其用于光信号放大和处理的参数, 与实验一致。

关键词: 光学双稳, 相变, 光信号放大, 光信号处理

Phase transition in operation of a semiconductor OBD

Zhang Yuancheng, Song Qian, He Shaowei

(Wuhan University, Wuhan)

Abstract: In accordance with Landau's theory on phase transition, a theoretical analysis has been made for the nonequilibrium phase transition in the operation of a fibre-coupled semiconductor OBD with feedback pumping. It is shown that the feedback parameter is the transitional condition from the second-order phase transition to the first-order phase transition. Parameters of three operation modes and signal amplification and processing have been reduced respectively. The theory agrees with the author's experimental results.

Key words: optical bistability, phase transition, optical signal amplification, optical signal processing

一、引 言

根据稻场文男的输出反馈泵浦激光双稳方案^[1], 我们利用光纤耦合构成光双稳系统, 实现了微分增益、反微分增益、双稳、反双稳和零偏等五种工作模式的运转, 并由此完成了光信号放大、光脉宽压缩和光逻辑共 13 种光信号处理功能^[2]。稻场是根据 Landau 理论提出其方案的, 不过, 他只是提出了一个原则思想, 并未结合具体器件形式, 因而未能给出定量关系。

本文将重新按照 Landau 相变理论^[3], 具体探讨光纤耦合输出反馈泵浦半导体激光双稳装置(OBD, Optical Bistability Device)运转中的各级相变, 寻找相变条件, 并得出与我们的实验相符的定量关系。

二、系统状态方程

OBD 是一种典型的一级相变体系。不难由激光的半经典理论^[4]出发, 建立光纤耦合输出反馈泵浦半导体激光双稳系统的状态方程, 并由此研究体系中的相变。

半导体激光二极管(LD, Laser Diode)的线性增益正比于载流子反转分布, 在高增益区又正比于注入电流密度^[5], 因而正比于注入电流 I ; 同时考虑到, LD 常工作在它的阈值电流 I_t 附近。这样, 其场强 E 的半经典运动方程, 以及其写成输出功率 P 形式的稳态解就分别是

$$\frac{dE}{dt} = A(I - I_t) - BE^3 \quad (1)$$

和

$$P = \begin{cases} 0 & (I < I_t) \\ K(I - I_t) & (I \geq I_t) \end{cases} \quad (2)$$

这里, $A = \gamma_c / I_s$ 和 $B = AI_t / E_s^2$ 分别是线性和饱和增益系数, $K = \frac{\pi r^2 \sqrt{\epsilon / \mu}}{R_0} \frac{A}{B}$ 是 LD 特性的直线增长段斜率, γ_c 是其光腔线型的半宽, E_s 是激光介质的饱和场幅; r 、 ϵ 和 μ 分别是光纤截面半径、其材料的介电常数和导磁率, $R_0 = 377 \Omega$ 则是真空等效阻抗。

实验中, LD 的注入电流是偏置电流 I_b 和电流 I_f 之和, 后者是用光电二极管将部分输出功率 fP ($f < 1$ 为反馈参量, 可通过光纤耦合器的选择及精密微调架的调整而改变) 和信号功率 P_i 加以探测 (灵敏度设为 S), 并用一电子放大器 (未饱和增益设为 G) 放大后形成的。显然, 选用如下的有饱和的反馈特性是合理的:

$$I_f = GS(P_i + fP) / [1 + (P_i + fP) / P_s] \quad (3)$$

式中 P_s 是使电子放大器饱和的光电二极管输入功率。将 (3) 式代入 (1) 式, 令 $I_0 = I_t + I_b$ 有

$$\frac{dE}{dt} = A \left[I_0 + \frac{GS'(E_i^2 + fE^2)}{1 + (E_i^2 + fE^2) / E_s^2} \right] E - BE^3 \quad (4)$$

而

$$(S', P, P_s, P_i) = (S, E^2, E_s^2, E_i^2) \pi r^2 \sqrt{\epsilon / \mu} / R_0 \quad (5)$$

如下式引入系统热力势 (自由能) 函数^[6]:

$$dE/dt = -\partial\phi/\partial E \quad (6)$$

由 (4)、(6) 式并对 E 积分, 将所得对数函数展开并略去高阶小量, 就得到系统的状态方程:

$$\phi(E, E_i) = \phi_0(E_i) + \frac{1}{2} a(E_i) E^2 + \frac{1}{4} b E^4 + \frac{1}{6} c E^6 \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \phi_0(E_i) &= \frac{AGS'E_i^2}{2fE_s^2} (E_s^4 + E_i^4/3) \\ a(E_i) &= A(I_0 - GS'E_i^2) = A(I_0 - GSP_i) \\ b &= B - AGS'f \\ c &= AGS'f^2/E_s^2 \end{aligned} \quad (8)$$

注意到三系数中, c 恒正; 除反馈电流外的 LD 注入电流 ($I_b + GSP_i$) 高于、等于或低于其阈值电流 I_t 时, a 将分别小于、等于或大于零; LD 特性直线增长段的斜率 K 大于、等于或小

于反馈特性未饱和部分斜率 $K' = (GSf)^{-1}$ 时, b 将分别小于、等于或大于零。这些因素决定热力势能曲线的形状, 从而决定相变类型。

三、状态及其稳定性

OBD 可能存在的状态必是其热力势取最小值的状态, 即必须满足

$$\partial\phi/\partial E = E(a + bE^2 + cE^4) = 0 \quad (9)$$

$$\partial^2\phi/\partial E^2 = a + 3bE^2 + 5cE^4 > 0 \quad (10)$$

当 $\Delta = b^2 - 4ac > 0$ 时, 满足(9)式的 E^2 的解, 以及相应的 $\partial^2\phi/\partial E^2$ 值共三组:

$$E_1^2 = 0, \quad \partial^2\phi_1/\partial E^2 = a \quad (11a)$$

$$E_2^2 = (-b - \sqrt{\Delta})/(2c), \quad \partial^2\phi_2/\partial E^2 = \sqrt{\Delta}(\sqrt{\Delta} + b)/c \quad (11b)$$

$$E_3^2 = (-b + \sqrt{\Delta})/(2c), \quad \partial^2\phi_3/\partial E^2 = \sqrt{\Delta}(\sqrt{\Delta} - b)/c \quad (11c)$$

这样, 得到如下结论: 1. $\Delta < 0$ 时, 只有稳定解 E_1^2 , ϕ 无其它极值; 2. $\Delta > 0$, $a > 0$ 时, E_1^2 为稳定解; 又若 $b < 0$, 则 ϕ 有另外两个极值; 其中 ϕ_2 为极大值, 对应非稳定解; ϕ_3 为极小值, 对应稳定解; 3. $\Delta > 0$, $a = 0$, $b < 0$ 时, 系统只有一个稳定解 E_3^2 , 此时 $E_1^2 = E_2^2 = 0$, $\phi_1 = \phi_2 = \phi_0$ 为亚稳态 ($\partial^2\phi_2/\partial E^2 = \partial^2\phi_1/\partial E^2 = 0$); 4. $\Delta > 0$, $a < 0$, $b > 0$ 时, E_1^2 是不稳定解, 此外仅存的解 E_3^2 是稳定的; 5. $\Delta = 0$ (此时必有 $a > 0$), E_2^2 和 E_3^2 两解简并, 形成高输出亚稳态, 即 $\partial^2\phi_2/\partial E^2 = \partial^2\phi_3/\partial E^2 = 0$ 。图 1 绘出了以上五种典型的热力势曲线, 不失一般性, 图中已令 $\phi_0 = 0$ 。由图可以看出, OBD 有三种典型工作模式。

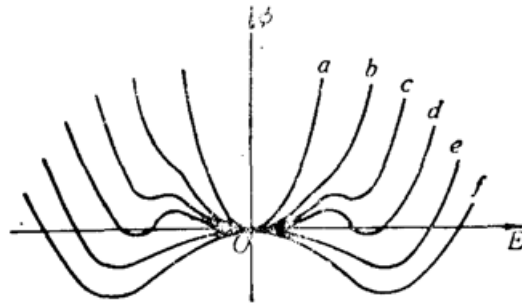


FIG. 1 Function of thermodynamic potential

a— $\Delta < 0$, $a > 0$; b— $\Delta = 0$, $a > 0$, $b < 0$; c, d— $\Delta > 0$, $a > 0$, $b > 0$; e— $\Delta > 0$, $a = 0$, $b < 0$; f— $\Delta > 0$, $a < 0$, $b > 0$

四、微分增益工作模式

当反馈量很小, 以致

$$f < (GSK)^{-1} \quad (12)$$

时, 有 $b > 0$, $K' > K$ 。这时系统只有唯一的稳定解 E_3^2 , 且输出随输入连续改变。当 $P_i < P_{i0} = I_0/(GS)$ 时, $P = 0$; 当 $P_i \geq P_{i0}$ 时,

$$P = [(K - K') + \sqrt{(K' - K)^2 - 4K^2(I_0 - GSP_i)/I_s}] P_s / (2fK) \quad (13)$$

图 2(a) 以 P_i 为参量 (第三坐标轴), 绘出了热力势 ϕ 作为 P 的函数图形, 它们具有图 1 中势能曲线 a 和 f 的形状, 势能最低点在 $P - P_i$ 平面上随 P_i 的改变而连续移动。其轨迹便是微分增益曲线 (13), 形如图 2(b)。这时系统工作于微分增益模式 DGM (Differential Gain

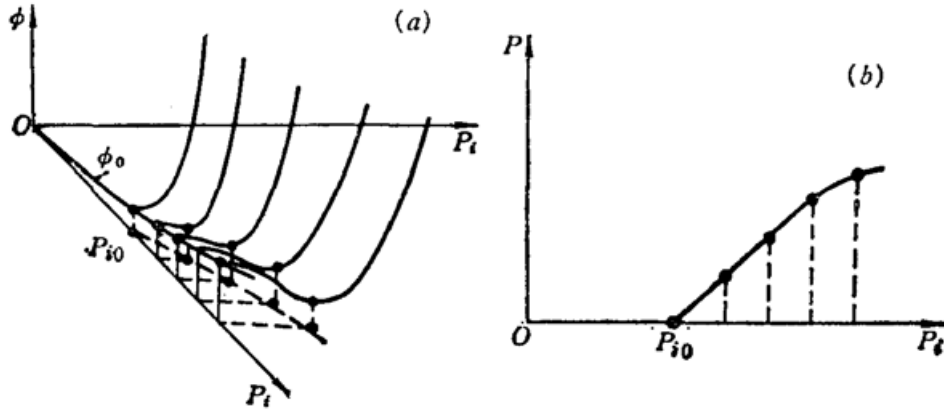


Fig. 2 Differential gain mode

(a) thermodynamic potential curve family; (b) differential gain curve

Mode)。由(13)式可得小信号光增益

$$G_f = \frac{dP}{dP_i} = [(GSK)^{-1} - f]^{-1} \tag{14}$$

下标“f”表示 DGM 适用的固定偏置 (FOB, Fixed Optical Bias) 光信号放大^[7], 偏置光强可选为 P_{i0} 。由此可见, 欲获得大的光增益, 需提高光电探测器的灵敏度和电子放大器的增益并加大反馈量; 输入光信号幅度加大时, 光增益会下降。以上结论均为实验所证实。

图中, P_{i0} 是二级相变点。该点两侧状态(即光强)连续改变, 其一级微商也连续, 二级微商不连续。

五、双稳工作模式

加大反馈量 f , 直到

$$f > 1/(GSK) \tag{15}$$

时, 会使 $K' < K$, $b < 0$, 系统将呈现双稳特性并工作于双稳模式(Bistability Mode)。此时, 外加信号引发的不是二级相变, 而是一级相变。即状态(光强)不连续改变, 热力势的一级微商不连续, 这样, 反馈参量起着使系统由二级相变向一级相变转化的重要作用。图 3 表示相应的热力势函数和输入-输出滞回特性, 后者是势能极小值在 $P-P_i$ 平面上的投影; 图中虚线对应势能极大值, 我们已知, 它们是由一些不稳定平衡点组成的。

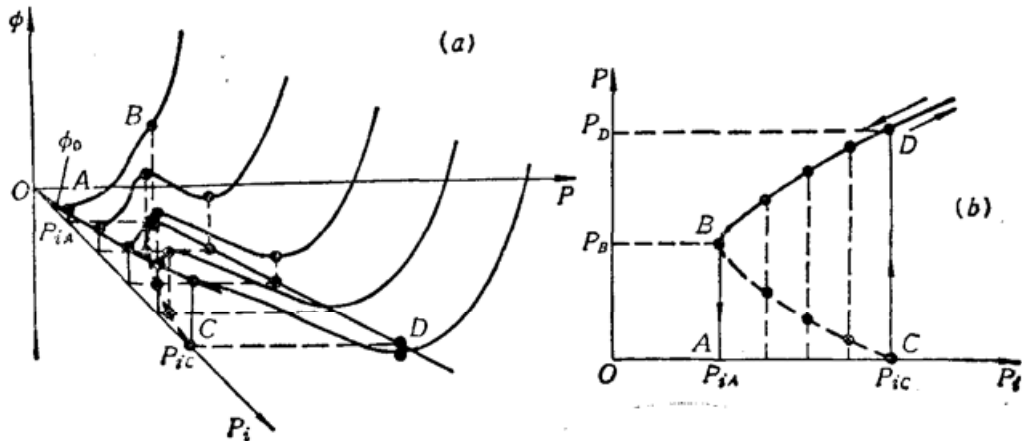


Fig. 3 Bistable modes

(a) thermodynamic potential curve family; (b) hyslerisis property

由图 3 我们看到当 P_i 增加时势能曲线逐渐变化的情况。当 P_i 增至 P_{i0} 时势能曲线形如图 1 中的曲线 e , 它满足 $a=0$ 的条件, 因而 C 点是一个亚稳点, 这样, 当输入光强由零增至 P_{i0} 时, 系统会由亚稳点 C 突然跃变到稳定平衡点 D 并产生相应的输出光强 P_D , 宛如一个光滑平顶小山上的钢球必然会落入深谷一样; 反之, 当输入光强由一个大于 P_{i0} 之值减小至 P_{iA} 时, 势能曲线变成形如图 1 中的曲线 b , 它满足 $\Delta=0$ 的条件, 因而图中 B 为亚稳点, 于是钢球必然会从此点跌落至 A , 相应地输出光强由 P_B 跌落至零。这样, P_{i0} 和 P_{iA} 就分别是 OBD 的上跳和下跳阈值。

由上述亚稳条件不难求出 A 、 B 、 C 和 D 四点对应的输入和输出光强:

$$P_{iA} = P_{iB} = P_{i0} - \left(\frac{K - K'}{2K} \right)^2 P_s \quad (16)$$

$$P_{i0} = P_{iD} = P_{i0} = I_0 / (GS) \quad (17)$$

$$P_A = P_C = 0 \quad (18)$$

$$P_D = 2P_B = (K - K') P_s / (Kf) \quad (19)$$

如果前面的处理中采用较软的 LD 特性而不是折线 (2), P_A 和 P_C 就不会是零而是具有一个较小的本底; $P_D = 2P_B$ 这种固定的关系是由于我们选用 (4) 式饱和特性造成的。不过, 这些不足之处并不影响本文主要结论的正确性和实用性。我们看到, 正是由于所选用的饱和特性导致势函数中最后一项 (E^6 项) 的存在, 而它是造成系统有三个平衡态并出现两个亚稳态, 最终导致一级相变的根本原因, 与实验相符合。

作脉冲偏置 (POB, Pulsed Optical Bias) 光信号放大^[7]时, 应将偏置光脉冲的幅度选为 αP_{i0} , α 应在能稳定工作的前提下尽可能接近于 1。于是 POB 光增益为

$$G_p = \frac{1 - K'/K}{(1 - \alpha)f} \frac{I_s}{I_0} \quad (20)$$

提高 G_p 的途径与提高 G_f 相同, 但前者在 $f = 2 / (GSK)$ 时达极大值, 此后随 f 的增加而下降。

五、零偏工作模式

进一步加大反馈量, 直至

$$f \geq 1 / [GSK (1 - 2\sqrt{I_0/I_s})]^{-1} \quad (21)$$

时, 就会在 $P_i = 0$ 时仍有 $\Delta = 0$ 。这表明图 3(a) 中的亚稳点已移至 $P_i = 0$ 的 $P-\phi$ 平面上; 相应地, 图 3(b) 的滞回特性的 A 点亦移至原点。这时系统工作于零偏模式 (ZBM, Zero Bias Mode)。在这种模式下, 可实现无偏置的弱光对强光的控制和开关。因为本系统是有源的, 这无疑是有意义的。

考 参 文 献

- 1 H. Inaba, *Phys. Lett.*, **86A** (9), 453 (1981)
- 2 张远程, 宋鸾, 何绍伟, 待发表
- 3 L. D. Landau, *Phys. Z. Sovietunion*, **11**, 26 (1937); Collected Papers of L. D. Landau, 193 (1967)
- 4 M. Sargent III et al., *Laser Physics* Addison-Wesley (1974)
- 5 H. C. Casey, Jr., M. B. Panish, *Heterostructure Lasers Part. A*, Academic Press, 1978
- 6 V. DeGiorgio, M. O. Scully, *Phys. Rev.*, **A2**, 1170 (1970)
- 7 张远程, 宋鸾, *中国激光*, **15**(6), 359 (1988)