

文章编号: 1001-3806(2002)01-0061-02

## 波长调谐时外腔中半导体激光的电流双稳\*

邓 燕 陈建国

(四川大学光电系, 成都, 610064)

摘要: 预测了由于半导体激光二极管(LD)的准费米能级随 LD 内载流子密度变化, 因而, 在调谐外腔半导体激光器的输出功率-振荡频率曲线上出现双稳环的时候, 通过 LD 的电流也应出现一个伴随的双稳环。

关键词: 外腔半导体激光器; 准费米能级; 双稳

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

### Bistability of currents passing LD in wavelength tunable external cavity

Deng Yan, Chen Jianguo

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** Because quasi-Fermi levels of a laser diode(LD) vary with the carrier density, it is predicted that a hysteresis loop should occur for the current passing LD while a hysteresis loop appears for the power-frequency curve of a tunable external cavity semiconductor.

**Key words:** external cavity semiconductor laser; quasi-Fermi level; bistability

### 引 言

可调谐外腔半导体激光器(ECLD)不但能用来产生波长可调的窄线宽激光输出<sup>[1]</sup>, 而且也作为研究光与物质相互作用提供了一个有价值的场所<sup>[2]</sup>。在对 ECLD 的研究中, 人们观察到了双稳、混沌、相干崩塌等非线性现象<sup>[3]</sup>。近年来, 人们对强反馈(即外反馈强于二极管激光器与外腔发生耦合的那个端面所提供的反馈)情况下的 ECLD 的非线性特征进行了研究, 对激光的输出功率-振荡频率( $P-\nu$ )曲线上的双稳环以及输出功率-偏置电流( $P-I$ )曲线上的双稳环作了较为详细的分析<sup>[4, 5]</sup>。

研究表明, 可调谐 ECLD 的  $P-\nu$  曲线上的双(多)稳源于联系载流子密度(或增益)与介质折射率的谱线展宽因子  $\alpha$ 。在导出了 ECLD 振荡在不同波长上的阈值载流子密度的表达式后, 我们对强反馈情况下 ECLD 的  $P-\nu$  双(多)稳进行了解析分析, 得到了环宽的解析表达式<sup>[5]</sup>。在本文中, 我们将对调谐过程中, 伴随功率双稳而出现的激光二极管(LD)偏置电流的双稳进行初步地分析和讨论。这种双稳

源于 LD 内载流子密度变化引起的准费米能级移动, 从而使得通过 LD 的电流发生变化。

### 1 功率双稳

由文献[6]可知, 当 ECLD 被调在频率  $\nu$  处振荡时, 阈值载流子密度  $N(\nu)$  满足:

$$N(\nu) = N_0 + \frac{\gamma + \ln G(\nu)/L}{g\Gamma} \quad (1)$$

式中,  $N_0$  是透明载流子密度,  $\gamma$  为损耗系数,  $L$  为激光二极管长度,  $g$  为微分增益系数,  $\Gamma$  为限制因子, 单程增益  $G(\nu)$  的表达式为:

$$G(\nu) = \{ [R(1-R_1)^2 \cos^2 \eta + (R_1-R)(1-RR_1)]^{\nu/2} - r(1-R_1) \cos \eta \} / r_2(R_1-R) \quad (2)$$

式中,  $R_2$  和  $R$  分别为半导体激光二极管(LD)前、后端面反射率(其中后端面与外腔耦合),  $R_1$  为外腔有效反射率, 上述诸反射率对应的反射系数绝对值用相应的小写字母标识, 参量  $\eta$  满足:

$$\eta = \frac{4\pi n(N)L\nu}{c} \quad (3)$$

式中,  $c$  为真空中的光速,  $n(N)$  是当 LD 内载流子数为  $N$  时的折射率, 它与载流子密度有以下关系:

$$n(N) = n_{\text{ref}} \left[ 1 - \frac{gc\Gamma\alpha(N - N_{\text{ref}})}{4\pi\hbar\nu_{\text{ref}}} \right] \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  就是联系介质增益与折射率的谱线展宽因子,  $N_{\text{ref}}$  为某个参考载流子密度, 此时, 对应的折射

\* 国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 邓 燕, 女, 1977 年 9 月出生。硕士研究生。

现从事激光与光通信方面的研究。

收稿日期: 2001-02-08; 收到修改稿日期: 2001-05-29

率为  $n_{\text{ref}}$ 。

在 LD 静态运行时, 由速率方程可知, 激光器的输出功率  $P$  近似的满足:

$$P \propto \left[ \frac{I}{e\Omega} - \frac{N}{\tau} \right] \quad (5)$$

式中,  $e$  为电子电荷(绝对值),  $\Omega$  为有源区体积,  $\tau$  为载流子寿命。把适当的运行参数代入(1)式~(5)式, 可以得到调谐 ECLD 的  $P$ - $\nu$  曲线, 进而研究双稳特性<sup>[5]</sup>。理论研究表明, 要观察强反馈情况下调谐 ECLD 的功率双稳, LD 与外腔耦合的端面要镀减反膜, 使其反射率降到千分之几到百分之几的水平。我们用单层 SiO 膜使 LD 一个端面反射率降到约 1%, 并在实验中观察到了  $P$ - $\nu$  曲线上的双稳环, 测量结果见图 1, 图中“□”表示振荡频率增大过程中测得的点, “▽”表示频率降低过程中测得的点。从图中可看到, 双稳环大致呈平行四边形, 归一化振荡频率  $\delta = (\nu - \nu_0) / \Delta\nu$ , 其中,  $\nu_0$  表示所测的初始频率,  $\Delta\nu$  是 LD 纵模间隔。

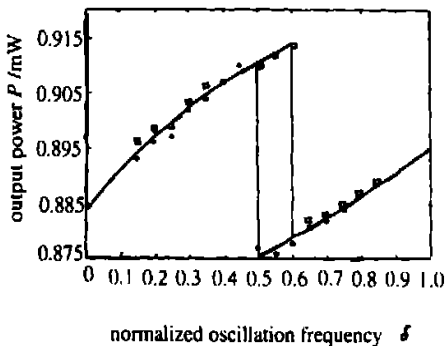


Fig. 1 Measured hysteresis loop on  $P$ - $\nu$  curve of an ECLD

## 2 电流双稳

众所周知, 当半导体激光器处于振荡状态时, 跨 LD 的电压  $V_d$  等于导带和价带的准费米能级之差<sup>[7]</sup>。对于导带而言, 电子数密度  $N$  与归一化准费米能级  $\epsilon_{fc}$  满足<sup>[7]</sup>:

$$N = \frac{2N_c}{\pi^{1/2}} \int_0^\infty \frac{\epsilon^{1/2} d\epsilon}{1 + \exp(\epsilon - \epsilon_{fc})} \quad (6)$$

式中,  $N_c$  为常数。对价带也可写出类似的式子。从(6)式可见, 特定的器件,  $N$  与  $\epsilon_{fc}$  有一一对应的关系。在  $\epsilon_{fc}$  不大的情况下保留泰勒展开第 1 项, 近似有:

$$\Delta N = \left[ \frac{dN}{d\epsilon_{fc}} \right] \Delta \epsilon_{fc} \quad (7)$$

在掺杂较低的情况下, 注入载流子浓度实际上是可用  $N$  来近似的<sup>[7]</sup>, 因而可以看到, 在准费米能级移动不太大的情况下, 跨 LD 的电压  $V_d$  的变化量  $\Delta V_d$

与 LD 内载流子密度的变化量  $\Delta N$  大致呈线形关系。换句话说, 如果静态运行时, 阈值载流子浓度改变, 跨 LD 的电压亦会改变, 从而引起通过 LD 的电流发生变化。

当双稳 ECLD 被调谐到跳变波长处振荡时, 激光器处在“on”和“off”状态时, 阈值载流子密度  $N_{\text{on}}$  和  $N_{\text{off}}$  是不同的, 且  $N_{\text{on}} < N_{\text{off}}$ 。对恒压供电回路而言,  $V_d$  上升  $\Delta V_d$  将导致通过 LD 的电流下降  $\Delta I$ , 假设回路电阻为  $\rho$ , 则有:

$$\Delta I = - \frac{\Delta V_d}{\rho} \quad (8)$$

于是, 在可调谐 ECLD 的  $P$ - $\nu$  曲线上出现双稳环的同时, 在 LD 的  $I$ - $V$  曲线上也应该出现一个双稳环, 且激光器输出功率的上跳对应偏置电流的上跳。

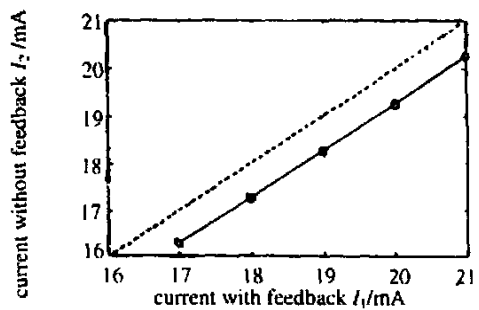


Fig. 2 Relation between current with feedback and without feedback

在图 2 中, 我们用实线画出了一个静态运行的 ECLD, 在有反馈和无反馈时通过 LD 的电流变化关系的测量结果。图中横坐标表示有外腔时的电流  $I_1$ , 纵坐标则表示用障碍物遮住光栅后测得的通过 LD 的电流  $I_2$ 。图中虚线是虚拟的  $I_1 = I_2$  时的情况。从该图可以看出, 当 ECLD 中 LD 的电流(或输出功率)变化时, 有反馈和无反馈两种情况下通过 LD 的电流差  $\Delta I (= I_1 - I_2)$  基本保持不变。在实际的操作时, 我们用障碍物遮住光栅, 使有反馈 ECLD 变成无反馈激光器。测量结果表明, 电流差  $\Delta I$  基本保持不变, 这意味着  $I_1$  和  $I_2$  的差别是由于在这两种情况下, LD 的准费米能级之差不同。从测量过程可以看出, 在无反馈情况下, 改变半导体激光器的偏置电流, 并不改变腔内损耗等因素, 故激光器的阈值不会发生变化, 静态运行时的载流子浓度或准费米能级之差亦不会随 LD 偏置电流(或输出功率)的变化而改变。这个道理也适用于有反馈的情况。于是, 恒电压驱动的激光器, 在遮住光栅和不遮住光栅的情况下, 因准费米能级之差的不同而使通过 LD

(下转第 65 页)

度,应尽量把传感器安装在法平面内。通常角度  $\theta$  不超过  $55^\circ$ 。如反射带贴在轴端面上则其角度在  $35^\circ$  到  $60^\circ$  之间。

当传感器两束入射光平面与轴的法平面不重合时,见图 5。两束激光平面与轴线的夹角 根据轴的粗细而定,但此时引起的频移  $f_D = 2\omega d/\lambda$  应包括一个  $\cos\theta$  和  $\cos\Phi$  项。若这些角度不能保持稳定也会造成误差。

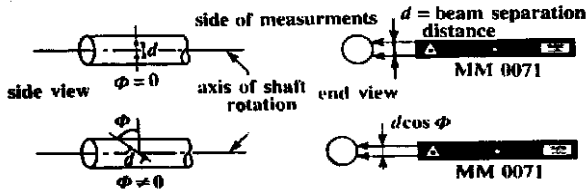


Fig. 5 Direction of measurement for side of shaft measurements when the MM0071 is tilted

当传感器光束不在轴心线上和转轴的距离不当,也会产生测量误差,见图 6。当传感器的入射光偏离轴心线时,由于其反射不为正反射,偏离原光路,传感器光电二极管不能全部接收到。信号减弱,强度增加,相干度下降,导致信号失真,无法正确测量。因此,应尽量把传感器安装在同一轴心线上并保持传感器与轴心线垂直。传感器与轴距离应在  $5 \sim 50\text{cm}$  内变化。太远光强不够,太近反射带上多余的频谱也会通过传感器到达光电二极管上,不利于动态条纹的清晰。因此,在安装时应尽量保持在  $5 \sim 50\text{cm}$  内。

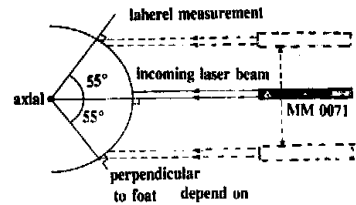


Fig. 6 Orientation of the MM0071 with respect to the shaft

### 3. 2 影响 2523 扭振仪测量误差的因素

(1) 电压的稳定性、准确性对信号处理线路中作为基准的时间、频率有影响。(2) 2523 只能用调好的转速输出  $1\text{V}/1000\text{r}/\text{min}$  来判定仪器的状态。无法进行扭振测试的标定。(3) 输出噪声的影响: 所含噪声和测量信号的带宽有很大的关系,是正比于带宽的平方根。在测量扭角速度时噪声随转速的升高而升高。而在测量扭角位移则相反。例如带宽为  $1000\text{Hz}$ , 转速为  $1000\text{r}/\text{min}$  最大噪声比可达  $0.6$ 。因此,可测扭角的下限不能小于  $0.6$ 。分辨率不是很高。(4) 双光束间距离的稳定性对测量有影响。

总的来讲,2523 激光扭振仪不需像传统的扭振测量在被测轴上安装齿轮和分度均匀的反光带,只要在轴上粘贴一圈专用反光带即可,大大方便了现场的测量,而且它测速范围宽,低速可达  $30\text{r}/\text{min}$ ;可测频率范围大,为  $0.3 \sim 1000\text{Hz}$ ;量程大;分档细,是其它扭振仪无法比拟的。

### 参 考 文 献

- [1] Instruction Manual Br el & Kjr 1992.

(上接第 62 页)

的电流不同。但由于有外腔激光器的阈值和无外腔 LD 的阈值在测量的过程中并无变化,  $I_1$  与  $I_2$  这两者间的差值则不应随输出功率而发生变化。

我们预测并初步论证了可调谐外腔半导体激光器的电流双稳的存在。可以设想,这种效应能够用来测量半导体激光器的某些特性,例如,有可能通过测  $\Delta I$  来确定 LD 准费米能级之差等。当然,要利用这种效应还需在理论与实验上作进一步深入的探索和研究。

### 参 考 文 献

- [1] 陈建国,周小红. 光学学报,1998,18(10):1417~1421.  
 [2] 陈建国,李 焱,李大义 *et al.* 激光技术,2000,24(5):285~288.  
 [3] Yan C, Wang X, Meinerly J G. IEEE J Q E, 1996, 32(5): 813~821.  
 [4] Zorabedian P, Trutna W R, Cutler L S Jr *et al.* IEEE J Q E, 1987, 23(11):1855~1860.  
 [5] Li Y, Lu Y, Chen J G *et al.* J Opt A: pure Appl Opt, 1999, 1: 466~470.  
 [6] Zhou X H, Chen J G, Lu Y. Appl Opt, 1997, 36(8):4138~4141.  
 [7] Agrawal G P, Dutta N K. Semiconductor Lasers. 2th ed, New York: van Nostrand Reinhold Company, 1993.