

# 程控宽带连续调谐外腔半导体 激光器特性分析\*

潘仲琦 杨今强 叶亚斌 张汉一 郭奕理 周炳琨  
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要** 对宽带调谐外腔半导体激光器进行了理论及实验研究, 分析了其最大调谐范围和连续调谐条件, 为宽带可调谐激光器的设计提供了依据。完成了实用化的程控宽带连续调谐外腔激光器, 该器件调谐范围超过 75 nm, 波长重复性精度为 1 nm, 分辨率为 0.01 nm。

**关键词** 外腔, 半导体激光器, 宽带调谐。

## 1 引 言

波长(频率)可调谐的激光光源一直是光电子学领域致力研究的目标和重要发展方向之一。与其它可调谐激光器相比, 外腔半导体激光器有许多突出的优点, 如体积小、效率高、寿命长, 并且光谱性能优良, 如线宽窄、波长调谐范围宽, 可产生超短光脉冲输出, 实现高频幅度和频率调制等, 使它得以在许多领域获得日益广泛的应用。

本文对外腔半导体激光器的调谐范围及连续调谐条件进行了详细的理论及实验研究。对半导体介质的增益谱采用了二次曲线线型近似, 并考虑复合腔的等效反射率, 计算了外腔激光器的最大调谐范围; 给出了偏轴条件下的连续调谐条件, 并完成了实用化的程控宽带连续调谐外腔激光器。理论计算与实验结果符合较好。

## 2 宽带调谐范围

在光栅外腔半导体激光器(ECLD)中, 光栅采用自准直方式时, 一级衍射光按原路返回, 调节光栅与光轴的夹角, 能使反馈回激光器有源区的波长变化, 从而改变激光器的谐振波长, 实现输出波长的调谐。理想情况下, 光栅外腔激光器的最大调谐范围接近半导体材料的增益谱宽, 对于短波长(0.68  $\mu\text{m}$  至 0.98  $\mu\text{m}$ )激光器约可调谐 10 到 30 nm, 长波长(1.3  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$ )激光器可调谐 60 到 120 nm, 而量子阱结构的器件调谐范围可达到 100 到 240 nm。

本文对后端面镀增透膜后的半导体激光芯片的增益谱采用了二次曲线线型近似, 考虑了在强外反馈条件下复合腔的等效反射率和激光振荡条件, 计算了外腔半导体激光器的最大单

\* 国家科委 863 高科技项目和国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-05-27; 收到修改稿日期: 1998-01-07

模调谐范围。较之以前采用洛伦兹线型所进行的处理，二次曲线近似与实际增益谱更为接近，因此理论值与实测结果吻合良好。

### 2.1 半导体增益介质的基本特性

对于一般的半导体介质，其增益系数  $g_m$  与注入载流子密度  $n$  的关系可表示为<sup>[1]</sup>：

$$g_m = a(n - n_0) - a_2(\lambda - \lambda_p)^2 \quad (1)$$

式中  $a$  和  $a_2$  为增益常数， $n_0$  为介质透明时的载流子浓度， $\lambda_p$  为峰值增益波长。 $\lambda_p$  可表示为<sup>[1]</sup>：

$$\lambda_p = \lambda_0 + (1 - n/n_{th})b \quad (2)$$

式中  $\lambda_0$  为阈值工作条件下 ( $n = n_{th}$ ) 的峰值增益波长， $b$  为常数。这种二次曲线型的增益谱近

似与实际的增益谱线非常接近。如图 1 所示。因此采用这种近似条件可以得到更接近实际的结果。为了表述的简单和方便，可以把 (1) 式改写为以下形式，其中  $g_0$  为增益谱中心的峰值增益。

$$g_m = g_0 - a_2(\lambda - \lambda_p)^2 \quad (3)$$

上述公式表明，提高激光二极管的直流偏置电流，注入载流子密度和材料增益随之升高，同时峰值增益波长向短波长方向移动。由于普通激光二极管后端面镀增透膜以后，外腔工作条件下的工作电流一般要高于原激光器的阈值，因此其增益谱会显著地移向短波长方向，当后端面残余反射率小于  $10^{-3}$ ，增益谱移动会达到 50 nm 以上。实验中观察到在外腔工作条件下，增大半导体激光的工作电流，增益谱范围展宽，调谐范围变宽，但在长波长端变化很小，整个谱线明显向短波长端扩展。因此依靠提高工作电流增大外腔的调谐范围在短波长方向比较明显，而在长波长端很难提高。所以要得到在特定范围内的激光输出，必须事先选择波长较长的管芯，这样镀膜后才能在外腔工作条件下得到需要的输出波长，如要得到在光纤放大器的增益谱 1530~ 1580 nm 范围内的可调谐激光输出，镀膜前的管芯的中心波长应在 1600 nm 左右。

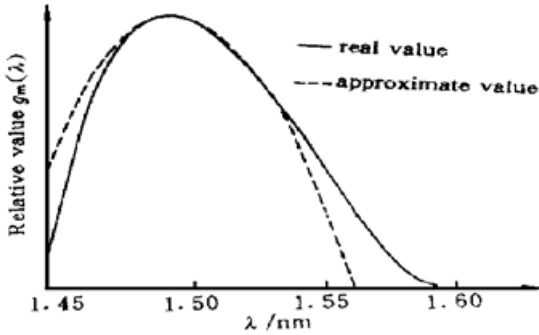


Fig. 1 Gain spectra

透膜以后，外腔工作条件下的工作电流一般要高于原激光器的阈值，因此其增益谱会显著地移向短波长方向，当后端面残余反射率小于  $10^{-3}$ ，增益谱移动会达到 50 nm 以上。实验中观察到在外腔工作条件下，增大半导体激光的工作电流，增益谱范围展宽，调谐范围变宽，但在长波长端变化很小，整个谱线明显向短波长端扩展。因此依靠提高工作电流增大外腔的调谐范围在短波长方向比较明显，而在长波长端很难提高。所以要得到在特定范围内的激光输出，必须事先选择波长较长的管芯，这样镀膜后才能在外腔工作条件下得到需要的输出波长，如要得到在光纤放大器的增益谱 1530~ 1580 nm 范围内的可调谐激光输出，镀膜前的管芯的中心波长应在 1600 nm 左右。

### 2.2 外反馈作用下的激光振荡条件及调谐范围

考虑到半导体介质中有源区光场的分布和光强的损耗，材料的净增益可表示为：

$$g = \Gamma g_m - \alpha \quad (4)$$

式中  $\Gamma$  为光场限制因子， $\alpha$  为等效损耗系数。

外腔半导体激光器的单模最大调谐范围  $\Delta\lambda_{max}$  如图 2 所示。要保证单模激光输出，无外反馈时的净增益要略小于腔内损耗，引入外反馈后由于腔内损耗降低了  $\delta g$ ，在  $\Delta\lambda_{max}$  范围内均可以满足振荡条件，即增益大于损耗。

无外反馈作用时激光振荡增益条件为：

$$\Gamma g_0 - \alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (5)$$

引入光栅外反馈后，激光振荡条件为：

$$\Gamma g_m - \alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_{eff}} \quad (6)$$

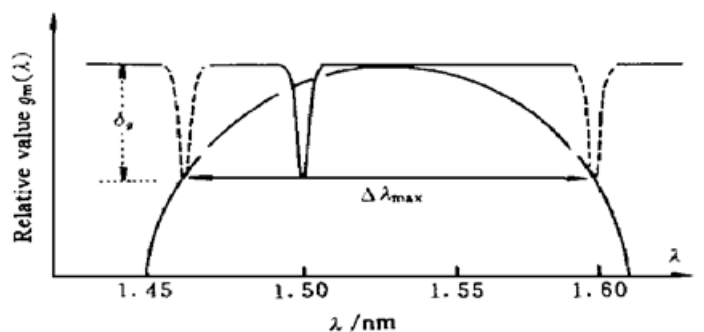


Fig. 2 The maximum tuning range

式中  $l$  为管芯腔长， $R_1$  为激光器本征腔解理面的光强反射率，约为 32%； $R_2$  为管芯另一端镀

增透膜后的残余反射率, 一般应在 1% 以下;  $R_{\text{eff}}$  为外腔等效的总光强反射率, 它与光栅的衍射效率  $R_G$ 、外腔耦合效率  $\eta$ 、镀增透膜后管芯的残余反射率  $R_2$  等因素有关, 人们从复合腔的速率方程出发, 得到  $R_{\text{eff}}$  的表示式为:

$$R_{\text{eff}} = \frac{R_2 + \eta R_G}{1 + \eta R_2 R_G} \quad (7)$$

由激光振荡条件  $g \geq 0$ , 从(3)式、(4)式、(5)式和(6)式可直接得到外腔激光器的单模最大调谐范围  $\Delta\lambda_{\text{max}}$  为:

$$\Delta\lambda_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{la_2\Gamma} \ln \frac{R_{\text{eff}}}{R_2}} \quad (8)$$

对于不同的激光器参数, 图 3 给出光栅外腔调谐特性的理论曲线。可看出最大调谐范围依赖于外腔的反馈强度与镀增透膜后的残余反射率的比值。即  $R_{\text{eff}}/R_2$  越大, 则调谐范围越宽。因此提高外腔反馈的效率和降低镀增透膜后半导体激光端面的残余反射率是宽带可调谐外腔激光器的两项关键技术。

### 3 连续调谐条件分析

在外腔调谐过程中, 若只改变光栅的反馈角度, 通常情况下调谐是不连续的, 波长只能在各纵模之间跳跃变化。而许多应用领域要求激光器能够连续调谐, 这就需要在改变光栅角度使反馈中心波长移动的同时, 还必须同步改变外腔的腔长, 使由谐振条件决定的复合腔的模谱也随之移动, 从而使激光振荡模不会跳变。连续调谐的原理如图 4 所示: 光栅反馈谱线改变  $\delta\lambda_r$  后, 由腔长决定的纵模谱也要相应变化  $\delta\lambda_m$ , 并且  $\delta\lambda_r = \delta\lambda_m$ 。

要实现外腔激光器的连续调谐, 必须考虑以下几方面因素:

1) 镀膜后激光器腔面要有良好的增透性能, 以增大内腔模的损耗, 避免由内腔决定振荡模式, 导致只能在各内腔模附近很小的范围内调谐, 甚至只能在各内腔模间跳变。

2) 调谐结构要保证谐振腔腔长  $L$  与光栅衍射角  $\theta$  同步变化, 并满足一定的条件。光栅在 Littrow 方式下连续调谐条件:  $L/\sin \theta = \text{常数}^{[2]}$ 。本文采用图 5 所示的偏轴驱动方式, 谐振腔腔长  $L$  与光栅衍射角  $\theta$  及偏轴转动半径  $R$  满足如下关系<sup>[3]</sup>:

$$L = R \tan \theta / \cos \theta \quad (9)$$

3) 提高外腔反馈的强度及其频率选择特性, 压窄光栅反馈的光谱线的宽度。一般通过采用高分辨率的光栅, 在腔内加入扩束镜等方法, 可以提高腔的色散能力, 使用衍射效率高的闪耀光栅可以提高反馈效率。

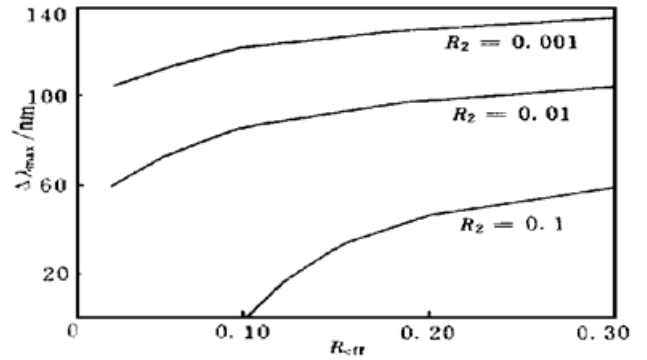


Fig. 3 The tuning characteristics of ECLD.  $l = 250 \mu\text{m}$ ,  $k = 0.05 \text{ cm}^{-1} \text{ nm}^2$ ,  $\Gamma = 0.5$

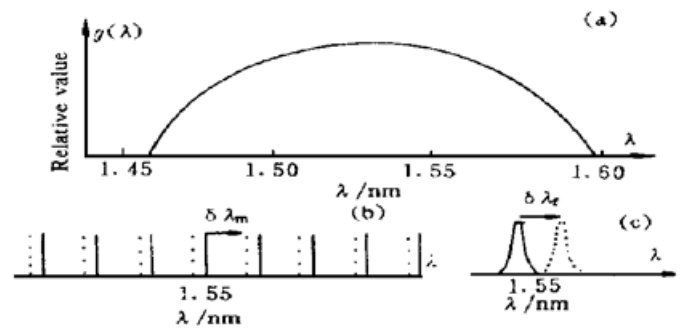


Fig. 4 The principles of continuous tuning. (a) The gain spectra of semiconductor active medium, (b) The longitudinal mode of the resonant cavity:  $\lambda_m$ , (c) The feedback spectra of the grating  $\lambda_r$

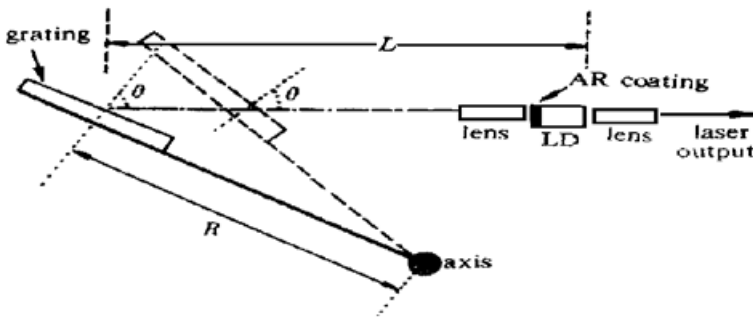


Fig. 5 Continuous tuning by off-axis method

目前比较实用的连续宽带调谐外腔激光器大体上有以下几种结构。1) 以步进马达做驱动源, 靠高倍率细分步距及精确的机械传动结构使光栅同时转动和平移, 实现光栅反馈波长与腔模波长同步移动。本文采用这种方式进行了实验研究, 取得了比较满意的结果。2) 使用三维的压电陶瓷由三路电压控制光栅

状态。3) 马达控制光栅转动, 由压电陶瓷控制腔长变化, 或在外腔中插入一平板透明介质, 靠控制平板转动改变腔长。4) 只用一个压电陶瓷平移和转动光栅<sup>[3, 4]</sup>。

### 4 程控可调谐外腔半导体激光器

本文设计了程控调谐外腔激光器结构, 采用计算机使外腔激光器的波长选择、调谐、温度、电流、功率的选择及稳定实现智能化。依靠软件开发的灵活性, 满足不同的使用要求。图6为程控调谐外腔激光器结构示意图。

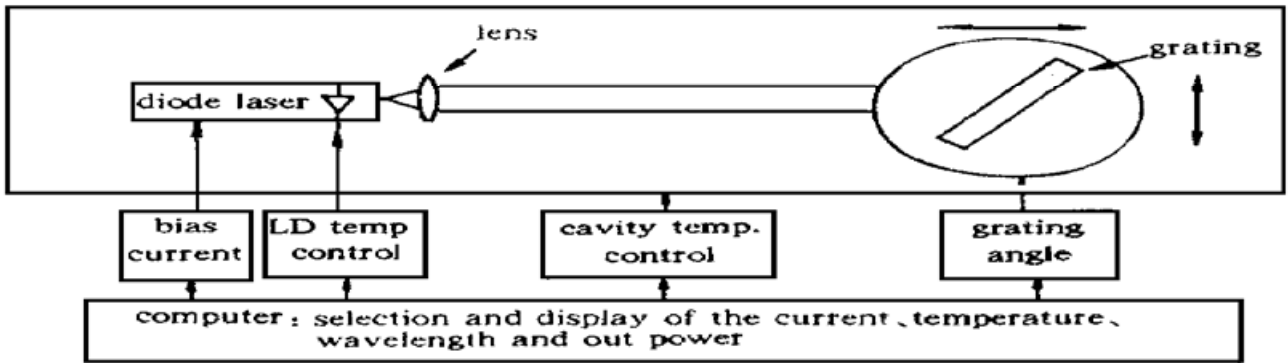


Fig. 6 The structure of programmable ECLD

器件的结构采用了偏轴调谐方式, 用单个步进马达控制光栅的转动和外腔腔长的变化。为了增加外腔的选频能力及外反馈强度, 本文使用了数值孔径较大的非球面透镜, 加大照射到光栅上的光斑尺寸, 并选择适当的管芯 PN 结平面与光栅的相对方向, 使能反馈回有源区的光谱尽可能窄; 采用衍射效率更高的闪耀光栅和精密稳定的外腔耦合技术, 实现了高效率的外腔选频和耦合。

波长调谐的关键就在于步进马达的控制。本文采用了细分驱动技术, 大大减小马达的步距角, 同时配合适当的调谐机构, 使得光栅转动的最小角度可达到 1", 相应波长调谐的分辨率达到 0.01 nm。另外通过对驱动脉冲计数, 还可以精确确定步进马达的位置, 精度为一个步距。这样光栅在任意位置时的输出光波长都可准确确定, 实现了波长的实时显示和定标。

实验使用半导体研究所研制的法布里-珀罗多模激光器管芯, 管芯腔长为 250 μm, 外腔长为 3 cm。使用 1200 l/mm 的全息光栅, 测量镀膜前、后及加入外反馈后的阈值分别为 23 mA、60 mA 和 32 mA, 相当于外腔的等效反射率约为 8.5%, 理论计算其最大调谐范围为 85 nm。实际测量结果为: 偏置电流在 45 mA 时, 调谐范围从 1450 nm 到 1527 nm, 大约为 77 nm, 提高偏置电流到 60 mA, 调谐范围达到 85 nm, 与理论计算结果符合较好。器件调谐时的波长重复性精度约为 1 nm(标定点处的波长的重复性), 调谐分辨率为 0.01 nm, 调谐过程

中模式发生跳变的间隔为 5 GHz, 相当于外腔的纵模间隔。

该器件的主要特点如下: 1) 使用偏轴调谐和压缩反馈线宽等新的技术方案, 实现了输出波长的连续调谐; 2) 采用了有限角度的二级传动结构, 使得调谐时不仅具有角度放大作用, 大大提高了调谐精度, 而且使光栅只在所需角度内转动, 保证了器件的调谐范围; 3) 光栅的传动采用了滑动配合, 经过精细调整后, 保证了器件的稳定性, 避免了调谐过程中出现的失谐问题。精细调谐每步为 1 GHz; 4) 器件具有波长显示功能; 5) 采用普通微机控制调谐, 能灵活调整工作状态, 满足了用户的不同需要。

上述的一系列创新方案提高了外腔激光器的实用化性能。

**结 论** 本文详细分析了外腔半导体激光器的调谐范围及连续调谐条件, 从理论上计算了最大调谐范围及偏轴调谐条件下的连续调谐条件, 为宽带可调谐半导体激光器的设计提供了一定的依据。实验上完成了实用化的程控宽带连续调谐外腔激光器, 取得了良好的结果。

### 参 考 文 献

- [1] I. D. Henning, M. J. Adams, J. V. Collins. Performance prediction from a new optical amplifier model. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(6) : 609~ 613
- [2] F. Favre, D. Guen, J. C. Simon *et al.*. External-cavity semiconductor laser with 15 nm continuous tuning range. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(15) : 795~ 796
- [3] 潘仲琦, 杨今强, 董启明等. 电控宽带连续调谐外腔半导体激光器. *中国激光*, 1998, **A25**(6) : 485~ 489
- [4] A. T. Schremer, C. L. Tang. External-cavity semiconductor laser with 1000 GHz continuous piezoelectric tuning range. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1990, **2**(1) : 3~ 5

## Programmable Wide Band Wavelength Tuning External-Cavity Semiconductor Laser

Pan Zhongqi    Yang Jinqiang    Ye Yabing    Zhang Hanyi  
Guo Yili    Zhou Bingkun

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, 100084)

(Received 27 May 1997; revised 7 January 1998)

**Abstract** The wide band wavelength tuning external-cavity semiconductor laser was theoretically and experimentally analyzed. The maximum tuning range and the continuous tuning condition were given. The programmable wide band tuning external-cavity semiconductor laser has been investigated. Its principle, configuration and control technical were introduced briefly. As wide as 75 nm tuning range and 0.01 nm tuning resolution were realized.

**Key words** external-cavity, semiconductor laser, wide band, wavelength tuning.