

文章编号: 0253-2239(2003)10-1220-5

# 外腔半导体激光器激光波长连续可调范围的研究\*

张 剑 陈徐宗 王义道

(北京大学电子学系, 北京 100871)

**摘要:** 在此研究了利特曼结构和利特罗结构的外腔半导体激光器激光波长连续可调范围和反射镜转轴等关键几何位置与结构的机械加工或制作误差的关系, 详细分析了由于制作工艺、技术精度等因素所造成的各种误差对激光器连续可调谐范围的影响。

**关键词:** 外腔半导体激光器; 跳摸; 连续可调范围; 闪耀光栅

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## 1 引 言

自 1962 年第一支半导体激光管问世以来, 半导体激光器有了很大的发展。由于半导体激光器具有体积小、效率高、结构简单、价格便宜、便于调谐等优点, 目前已被广泛的应用于激光光纤通信、激光测距等方面。另外在激光光谱、量子频标、原子核物理等基础研究领域半导体激光器越来越发挥重大作用。科学和技术的发展对半导体激光器的要求也越来越高, 不但要求激光有窄线宽, 而且还要求激光的波长或频率在较大范围内连续可调。外腔半导体激光器为实现大连续调谐范围提供了一种可能的途径。它的原理是利用连续改变激光器外延腔的腔长从而连续改变激光的波长或频率。但是一般情况下, 外腔激光器的波长在调谐时会出现跳模现象, 限制了激光波长或频率的连续可调谐范围。如何获得大范围的连续可调谐范围是外腔半导体激光器设计的核心问题之一。近几年一些作者对利特罗(Littrow)结构外腔的连续可调谐范围以及线宽做了研究<sup>[1~9]</sup>。目前还没有报道过利特曼(Littman)结构半导体激光器的连续可调谐范围和它的结构参量的理论分析。为此, 本文比较了利特曼结构和利特罗结构半导体激光器中由于制作工艺、技术精度等因素造成的各种误差对激光器连续可调谐范围的影响作了详细的理论分析, 并且给出了详细的计算结果。

## 2 利特曼结构半导体激光器的连续可调谐范围的研究

### 2.1 理想利特曼结构激光器

图 1 所示是利特曼结构半导体激光器, 由半导体激光器、闪耀光栅和反射镜构成了激光器的外腔。闪耀光栅的 1 级反射光被反射镜原路反射回来, 设闪耀光栅的 1 级反射波长为  $\lambda_r$ , 则有<sup>[10,11]</sup>

$$\lambda_r = d(\sin \phi + \sin \theta_0), \quad (1)$$

$d$  代表闪耀光栅的刻线密度, 本文讨论中取  $d = 1/1800 \text{ mm}$ , 即刻线密度是  $1800 \text{ g/mm}$ ,  $\theta_0$  为激光对闪耀光栅的入射角,  $\phi$  为反射光  $\lambda_r$  的反射角。由图 1 可知, 激光器的腔长

$$L = L_t + L_s, \quad L_t = \sin \phi L_s, \quad (2)$$

纵模模数为  $q$  的激光波长

$$\lambda_q = 2/(q \cdot L), \quad (3)$$

我们感兴趣的是  $\lambda_q$  和  $\lambda_r$  的差, 构造函数

$$F(\phi) = \lambda_q(\phi) - \lambda_r(\phi), \quad (4)$$

初始时刻有  $F(\phi_0) = 0$ , 当反射镜绕转动轴  $P(P_x, P_y)$ (图 1 所示) 转动时, 改变腔长  $L$ , 则反射角  $\phi$  发生变化,  $\lambda_q$  和  $\lambda_r$  也随之变化, 当  $F(\phi)$  小于激光腔的

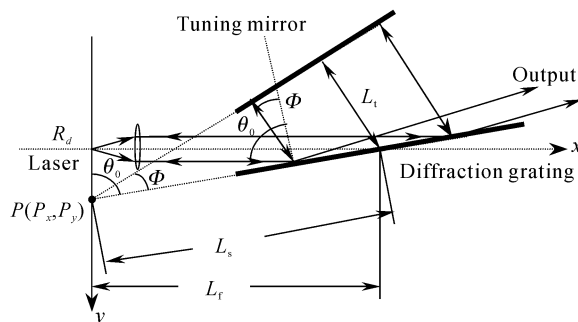


Fig. 1 Littman configuration laser model

\* 教育部重大课题 00-09 资助课题。

E-mail: lastyear@hotmail.com

收稿日期: 2002-05-10; 收到修改稿日期: 2002-10-14

纵模间距的半值时,激光腔内谐振激光的模数一直为  $q$ , 并且  $\lambda_q$  随反射镜的转动而连续变化, 当  $F(\phi)$  大于激光腔的纵模间距的半值时, 将会出现跳模现象, 出射光波长会跳到  $\lambda_q \pm 1$  而不在连续变化。所以抑制跳模的条件为

$$|F(\phi)| < (\Delta\lambda/2). \quad (5)$$

### 2.2 存在误差的利特曼外腔结构模型的研究

图 1 所示为理想的利特曼外腔结构, 但是在实际加工中各个零件的相对位置总会存在几何误差。下面将分析总结可能会存在误差的模型。

为了方便分析, 我们取半导体激光器的出射光为  $X$  轴, 垂直于出射光的出光面为  $Y$  轴, 激光对闪耀光栅入射角为  $\theta_0$ , 从激光器出光面到闪耀光栅的光程为  $L_r$ , 如图 2 所示。闪耀光栅反射面和  $Y$  轴的交点为  $P$  点。

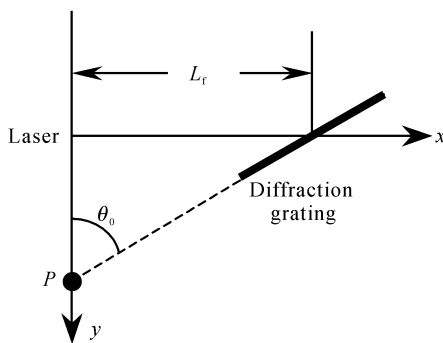


Fig. 2 The position of laser and diffraction grating in Littman configuration model

因为我们以半导体激光器及其出射光来确定坐标系, 所以半导体激光器不会存在误差情况。再考察闪耀光栅的位置, 实际上闪耀光栅的位置也可以是任意的, 我们可以这样考虑, 在确定了半导体激光器位置和坐标系以后, 并不能由此确定闪耀光栅的位置, 在实际加工中, 我们会给出  $\theta_0$  的确定值, 是为了进而确定反射镜的位置, 但是如果加工中  $\theta_0$  有一个  $\Delta\theta$  的误差, 我们可以认为激光对闪耀光栅的入射角是  $\theta_0 + \Delta\theta$  (因为入射角度可以在某个较大范围内任意选取), 而把误差归到反射镜的位置上。

在确定了激光器和闪耀光栅的位置后, 反射镜的位置就被严格确定了。设出射光波长为  $\lambda$ , 由公式(1)可确定  $\phi$ , 反射镜的转动轴为  $P$  点, 由图一所示, 由  $P$  点引一条直线, 与闪耀光栅反射面的夹角为  $\phi$ , 这条直线即是反射镜的反射面的位置, 这样会产生误差的只有反射镜的相对位置。

我们假设闪耀光栅和反射镜都是理想元件, 假设反射镜在转动时只有一个转动轴, 并且该轴在转

动时不会移动。那么, 只会由于反射镜位置和反射镜转动轴两个因素引起误差。

图 3 所示为反射镜转动轴位置存在误差的示意模型, 反射镜实际转动轴为  $P'$  点。图 4 所示为反射镜位置存在误差的示意模型, 反射镜的转动轴为  $P$  点, 反射镜实际位置与理想位置 ( $L$  平面) 存在夹角  $\Delta\delta$ , 我们用另一种比较方便处理的方式来表述这种误差, 从  $P$  点引一条平行于反射镜面的直线  $L'$ , 在  $L'$  平面上假设有一个反射镜  $M'$ , 与反射镜  $M$  的距离为  $\Delta G$ 。当反射镜转动时, 激光一直垂直入射在反射镜面上, 因此, 如果我们处理时用反射镜  $M'$  代替实际反射镜  $M$ , 转动轴保持原转动轴不变, 则实际上只相当于激光光程多增加了  $2\Delta G$ , 也就是相当于激光器外腔初始腔长增加了  $\Delta G$ , 我们知道激光器外腔初始腔长对激光波长的连续可调谐范围是没有影响的, 以上分析可以得出结论反射镜的位置误差对激光波长的连续可调谐范围是没有影响的, 而影响激光波长的连续可调谐范围的只有反射镜转动轴的位置误差。

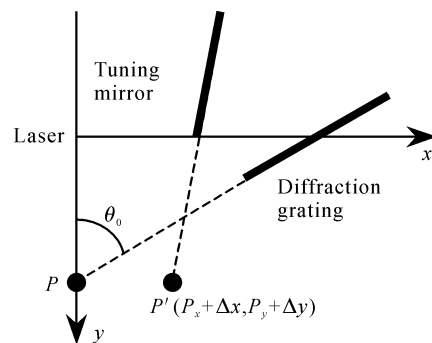


Fig. 3 The pivot of tuning mirror is in an error position

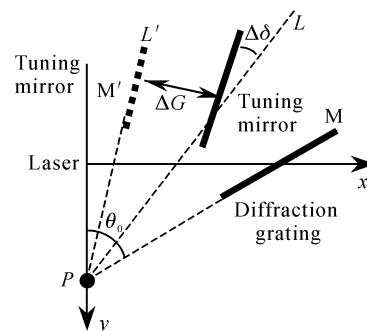


Fig. 4 Tuning mirror is in an error position

### 2.3 反射镜位置及其转动轴位置的误差对激光波长连续可调范围的影响

如图 5, 实际加工过程中, 反射镜的转轴  $P'$  点与理想位置  $P$  点总有公差。现在设  $P'$  点的位置为

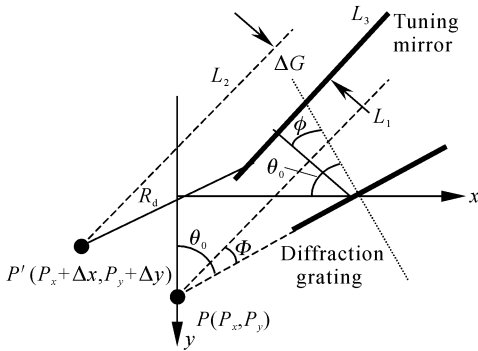


Fig. 5 The tuning mirror and its pivot are all in error positions

$P'(P_x + \Delta x, P_y + \Delta y)$ , 即  $P'$  点和  $P$  点在  $x, y$  方向分别有  $\Delta x, \Delta y$  的偏移。同时由于加工的原因, 反射镜的转轴不一定与反射镜在同一平面上, 我们用  $\Delta G$  表示实际的偏移, 平面  $L_1$  表示理想的反射镜位置, 平面  $L_2$  表示与转轴在同一平面上的反射镜的位置, 平面  $L_3$  表示实际的反射镜位置。 $L_1, L_2$  和  $L_3$  三个平面是平行的。在初始情况下,

$$F(\phi_0) = 0, \tag{6}$$

当反射镜转动时,  $F(\phi)$  的值则不再象理想模型那样一直保持为零, 此情况下仍然有

$$\lambda_r = d(\sin \phi + \sin \theta_0), \tag{7}$$

但是激光器腔长  $L$  和纵模为  $q$  的波长  $\lambda_q$  将会变为

$$L = L_f + \Delta G + L_p \sin \phi - \Delta y \sin(\theta_0 - \phi) - \Delta x \cos(\theta_0 - \phi), \tag{8}$$

$$\lambda_q = \frac{2}{q \cdot [L_f + \Delta G + L_p \sin \phi - \Delta y \sin(\theta_0 - \phi) - \Delta x \cos(\theta_0 - \phi)]}, \tag{9}$$

由(4)式、(5)式、(7)式、(9)式, 即可计算反射镜转动轴误差下的连续可调范围。由(8)式、(9)式可以看出, 反射镜位置的误差  $\Delta G$  可以与  $L_f$  合并, 相当于半导体激光器与闪耀光栅之间的光程由  $L_f$  变为  $(L_f + \Delta G)$ , 而半导体激光器与闪耀光栅之间的光程对激光波长连续可调谐范围是没有影响的, 影响连续可调范围的因素只有反射镜的转动轴位置。

图 6 所示的结果为反射镜转动轴误差对连续可调范围的影响, 计算中闪耀光栅入射角取值为  $83^\circ$ ,  $L_f \approx 5 \text{ cm}$ , 激光器中心波长  $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ 。由图 6 可看到激光波长连续可调范围存在一个极大值区域, 位置在  $\Delta x : \Delta y = 3 : 2$  的直线上, 即在相同的误差精度上, 控制  $x, y$  方向误差的比值可以得到连续可调范围的极大值。进一步计算表明连续可调范围的极大值区域位置由闪耀光栅入射角 ( $\theta_0$ ) 决定, 例如  $\theta_0 = 57^\circ, 61^\circ, 70^\circ$  分别对应的极大值位置在  $\Delta x : \Delta y =$

1:0, 10:1, 3:1 的直线上。图 6 中极大值出现锯齿状分布是由于激光器谐振腔的选频性质造成的。

### 3 利特罗结构半导体激光器的连续可调范围

#### 3.1 理想利特罗结构激光器

图 7 为利特罗结构激光器基本原理图。R 为闪耀光栅转动轴, 闪耀光栅与半导体激光器构成激光器的外腔, 闪耀光栅的 1 级反射光被反射镜原路反射回来, 设闪耀光栅的 1 级反射波长为  $\lambda_r$ :

$$\lambda_r = 2d \sin \theta, \tag{10}$$

由于闪耀光栅平面对激光的相对位移影响腔内激光的相位, 所以腔内纵模模数为  $q$  的激光波长应写为<sup>[12~14]</sup>

$$\lambda_q = \frac{2L(\theta)}{q - t(\theta)/d}, \tag{11}$$

式中  $L(\theta)$  为腔长,  $t(\theta)$  为光栅对激光的相对位移,

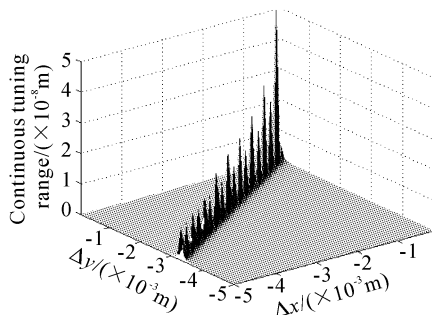


Fig. 6 Continuous tuning range of Littman configuration laser as a function of the  $\Delta y$  and  $\Delta x$

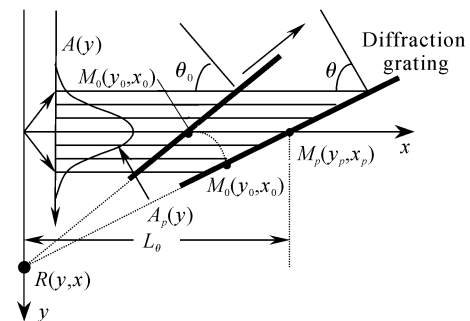


Fig. 7 Littrow configuration laser model

即图 7 中  $M_0$  与  $M_p$  之间的距离。由图 7 可得如下几 何关系：

$$L(\theta) = -y \left( \frac{\sin \theta_0}{\cos \theta} - \tan \theta \right) - x \left( \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} - 1 \right) + L_0 \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}, \quad (12)$$

$$t(\theta) = \{y[1 - \cos(\theta - \theta_0)] + (L_0 - x)\sin(\theta - \theta_0)\} / \cos \theta, \quad (13)$$

我们感兴趣的是  $\lambda_q$  和  $\lambda_r$  的差,构造函数

$$F(\theta) = \lambda_q(\theta) - \lambda_r(\theta), \quad (14)$$

初始时刻有  $F(\theta_0) = 0$ ,由前面对利特曼结构激光器

的分析可知,抑制跳模的条件为

$$|F(\theta)| < (\Delta\lambda/2), \quad (15)$$

由(10)式~(14)式可得

$$F(\theta) = 2d[L(\theta_0) + t(\theta)\sin \theta_0] \{ \cos \theta_0 \sin(\theta - \theta_0) [y \tan \theta_0 - L(\theta_0)] + x \sin \theta_0 [1 - \cos(\theta - \theta_0)] \}, \quad (16)$$

由(16)式可以看出,如果闪耀光栅转动时,  $F(\theta)$  一直保持为零,则转动轴坐标  $(y, x)$  的选择需满足如下条件:

$$x = 0, \quad y \tan \theta_0 - L_0 = 0. \quad (17)$$

### 3.2 存在误差的利特罗外腔结构模型的研究

在实际加工中各个零件的相对位置总会存在几何误差。与对利特曼外腔结构的分析相似,下面将分析总结可能会存在误差的模型<sup>[15]</sup>并将其简化。为了方便分析,我们取半导体激光器的出射光为  $X$  轴,垂直于出射光的出光面为  $Y$  轴,激光对闪耀光栅入射角为  $\theta_0$ ,从激光器出光面到闪耀光栅的光程为  $L(\theta_0)$ ,如图 8 所示。闪耀光栅反射面和  $Y$  轴的交点为  $R$  点。因为我们以半导体激光器及其出射光来确定坐标系,所以半导体激光器不会存在误差情况。再考察闪耀光栅的位置,取激光波长为  $\lambda$ ,由(10)式可以得到激光对闪耀光栅的入射角  $\theta$ ,即确定了闪耀光栅平面的斜率。因为闪耀光栅与半导体激光器的距离  $L(\theta_0)$  对激光波长的连续调谐范围没有影响,所以,我们可以任意选取  $L(\theta_0)$ ,即在  $Y$  轴上我们可以任意选取闪耀光栅的转动轴  $R$ ,转动轴  $R$  只要满足是闪耀光栅平面与  $Y$  轴的交点即可。这样有可能存在误差的

就是闪耀光栅的位置及其转动轴的位置。

我们假设闪耀光栅是理想元件,假设闪耀光栅在转动时只有一个转动轴,并且该轴在转动时不会移动。那么,只会由于闪耀光栅的位置和闪耀光栅转动轴的位置两个因素引起误差。实际上这两个因素可以合并成一个因素,我们分析如下,假设在实际加工中,闪耀光栅的位置存在误差,使激光的入射角为  $\theta_0 + \Delta\theta$ ,因为闪耀光栅是可旋转的,我们需要的激光波长为  $\lambda$ ,只有闪耀光栅旋转到激光对其的入射角为  $\theta_0$  时,我们才能得到波长  $\lambda$  的出射光,此时,闪耀光栅处在理想位置,由于转动轴的位置是由闪耀光栅平面和  $Y$  轴共同确定的,所以闪耀光栅转动到理想位置以后,相应的转动轴的理想位置也会变化,这样实际的转动轴就会出现误差,这样我们就可以把闪耀光栅的位置误差归到闪耀光栅转动轴的误差上处理。我们只需要计算出闪耀光栅的转动轴在  $Y$  轴和  $Z$  轴方向的误差对激光波长连续可调谐范围的影响也就可以相应的知道闪耀光栅位置偏差  $\Delta\delta$  对激光波长连续可调谐范围的影响了。

### 3.3 闪耀光栅转动轴误差对连续可调范围的影响

由(15)式、(16)式可得到闪耀光栅转动轴存在误差情况下激光器的连续可调范围。图 9 给出了计

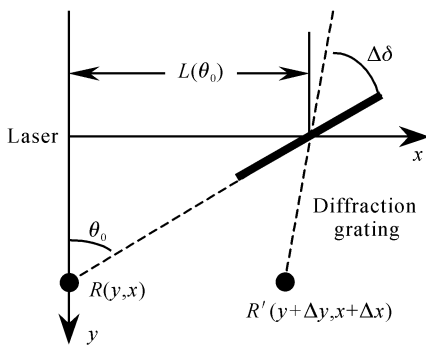


Fig. 8 The diffraction grating and it's pivot are in error positions

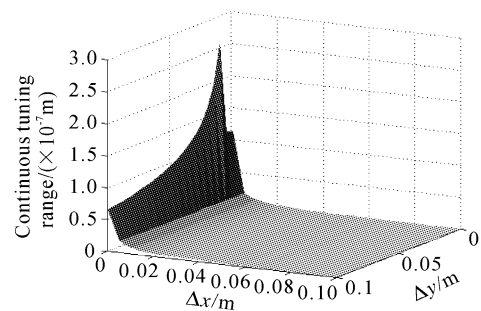


Fig. 9 Continuous tuning range of Littrow configuration laser as a function of the  $\Delta y$  and  $\Delta x$

算结果,从图可知在  $y$  方向的误差  $\Delta y$  对连续可调范围的影响比在  $x$  方向的误差  $\Delta x$  的影响要大得多。

**结论** 由上述分析可知:

1) 利特曼结构激光器的连续可调范围受到反射镜转动轴位置的限制,而  $y$  轴方向的误差对连续可调范围的影响远远大于  $x$  轴方向误差对其的影响。 $y$  轴方向 0.1 mm 的误差会使激光器的连续可调范围从 481 nm 降到 2 nm;而  $x$  轴方向 0.1 mm 的误差会使激光器的连续可调范围从 481 nm 降到 20 nm。但是,从我们的计算结果可以发现适当的控制  $\Delta x$  与  $\Delta y$  的比例,选择合适的掠入射角度,可以大大提高激光器的连续可调范围。

2) 利特罗结构激光器的连续可调范围受到闪耀光栅转动轴位置的限制,而  $y$  轴方向的误差对连续可调范围的影响远远大于轴方向误差对其的影响。 $y$  轴方向 0.1 mm 的误差会使激光器的连续可调范围降到 2 nm;而  $z$  轴方向 1 mm 的误差会使激光器的连续可调范围降到 20 nm。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Junmin, Yang Weidong, Xie Changde *et al.*. Frequency tuning characteristics of single-mode GaAlAs semiconductor laser with weak feedback from a blazing grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(4): 463~467 (in Chinese)
- 2 Chao Zhixia, Wu Jian, Ying Chunyang *et al.*. 633 nm tunable external-cavity diode laser used for beatwave Fabry-Perot interferometer. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(3):201~204 (in Chinese)
- 3 Luo G P, Peng C, Le H Q *et al.*. Grating-tuned external-cavity quantum-cascade semiconductor lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(19):2834~2836
- 4 Fermigier B, Lucas-Leclin G, Dupont J *et al.*. Self-aligned external-cavity semiconductor lasers for high resolution spectroscopy. *Opt. Commun.*, 1998, **153**(1~3):73~77
- 5 Zhou X H, Chen J G, Lu Y C. Analytical characterization of grating-tuned external-cavity semiconductor lasers. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18):4138~4141
- 6 Sivaprakasam S, Saha R, Lakshmi P A *et al.*. Mode hopping in external-cavity diode lasers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6):411~413
- 7 Kiguchi T, Uematsu A, Kitano M *et al.*. Grating external cavity diode lasers with broad tunable range and narrow spectral linewidth for high-resolution spectroscopy. *Jpn J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(11):5890~5895
- 8 Le H Q, Turner G W, Ochoa J R *et al.*. Broad wavelength tenability of grating-coupled external cavity midinfrared semiconductor lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(19):2804~2806
- 9 Trutna W R, Stokes L F. Continuously tuned external cavity semiconductor laser. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(8):1279~1286
- 10 Liu K, Littman M G. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(3):117~118
- 11 Harvey K C, Myatt C J. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12):910~912
- 12 de Labachellerie M, Passadat G. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**:269~274
- 13 Lotem H. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers: comment. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(11):3816
- 14 de Labachellerie M, Sasada H, Passadat G. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers: erratum. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(11):3817~3819
- 15 Guo Shuguang, Lu Fuyun, Ren Ming *et al.*. External Cavity Laser Diode Tuned Continuously in Large-Range by a Grating. In *Advanced Photonic Sensors: Technology and Applications*, Tang Jinfa, Xu Chaonan, Li Haizhang Editors. *Proc. SPIE*, 2000, **4220**:116~120

## Analysis on Continuous Tuning Range of Tunable Diode Lasers

Zhang Jian Chen Xuzong Wang Yiqiu

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 10 May 2002; revised 14 October 2002)

**Abstract:** A tunable diode laser is used in high-resolution spectroscopy, laser cooling of atoms, time standards, and coherent optical communications. It has a narrow linewidth, single frequency, and the wavelength is tunable. But its continuous tuning range is restricted by the mode-hop. The analysis on mode-hop suppression of the Littrow configuration and Littman configuration lasers and its continuous tuning range are presented.

**Key words:** tunable diode laser; mode-hop; continuous tuning range; grating