

文章编号: 1001-3806(2016)05-0706-05

## 外腔半导体激光器动态模稳定性的研究

郭海平, 万辰皓\*, 许成文, 严拓, 王东升

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究调谐过程中外腔半导体激光器的模稳定性, 采用多光束干涉理论推导 Littrow 结构外腔半导体激光器的腔增益, 并模拟其模结构。分析了光栅面和转臂不在同一平面的情形下, 在光栅转动调谐时, 通过匹配光栅的反馈波长变化率与外腔波长变化率, 推导出最佳的初始外腔长度, 并研究了动态模稳定(无跳模调谐)的范围; 采用严格的耦合理论和光线变换矩阵分析了准直(耦合)透镜的位置对系统后向耦合效率的影响。结果表明, 系统后向耦合效率最大可达 99%, 极大地压窄了中心波长为 780nm 半导体激光器的线宽, 外腔半导体激光器的理论线宽为未加外腔时的 0.96%, 动态模稳定范围可达 6.8nm。

**关键词:** 激光器; 半导体激光器; 模稳定性; 外腔; 多光束干涉; 耦合效率

**中图分类号:** TN248.4      **文献标志码:** A      **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.018

## Study on dynamic mode stability of external cavity diode lasers

GUO Haiping, WAN Chenhao, XU Chengwen, YAN Tuo, WANG Dongsheng

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to analyze the mode stability of an external cavity diode laser during the tuning process, its mode structure was deduced and simulated by using the original multiple-beam interference method. The optimal external-cavity length was derived under the condition of matching the grating angle tuning rate with the external cavity mode tuning rate during the grating rotation when the grating plane and pivot arm were not on the same plane. The range of mode stability, namely, mode hop during the tuning process, was also studied. The effect of the collimating lens location on the system back-coupling efficiency was analyzed by using the method of rigorous coupling theory and the ray transfer matrix. The results show that the back-coupling efficiency is up to 99%. Linewidth of diode laser with center wavelength of 780nm was narrowed extremely. Theoretical linewidth of external cavity diode cavity is 0.96% of that of diode laser without external cavity. Stable range of dynamic mode is up to 6.8nm.

**Key words:** lasers; semiconductor laser; mode stability; external cavity; multiple-beam interference; coupling efficiency

## 引言

目前, 常用的闪耀光栅反馈外腔主要分为 Littrow 和 Littman 结构。近年来, 国内外对 Littrow 结构和 Littman 结构的外腔半导体激光器的特性、调谐和线宽等方面做了广泛的研究<sup>[1-12]</sup>。其中对于 Littrow 结构外腔半导体激光器的研究主要集中在光栅面与转臂在同一平面上的情况, 还没有涉及到两者不共面的情形, 也没有涉及透镜的位置对输出线宽的影响, 实际上, 光栅反馈外腔半导体激光器(external-cavity diode laser, ECDL)系统使用商用的光学调整架决定了初始转轴位置已被固定; 其次, 光栅安装在转臂上, 光栅面和转臂

可能不在同一平面上。动态模稳定即在调谐过程中不发生跳模现象, 是 ECDL 一个重要特性。本文中推导模拟了 Littrow 结构外腔半导体激光器的模结构, 研究了光栅面和转臂不在同一平面时, 最大的动态模稳定(无跳模调谐)范围, 还分析了准直(耦合)透镜的位置对输出线宽的影响。

## 1 外腔半导体激光器的模结构

本文中采用的 Littrow 结构外腔半导体激光器如图 1 所示。激光器二极管(laser diode, LD)发射光经透镜准直入射到光栅上, 经光栅选模, 1 级衍射光沿原路返回, 作为反馈光注入 LD 有源区, 使选出来的模式在激光器内腔中的增益得到放大, 从而在模式竞争中获得优势, 最后作为光栅 0 级衍射光输出。光栅安装在转臂上,  $\theta$  为 Littrow 角(入射光束与光栅法线的夹角),  $L_{IC}$ (由半导体激光器前后端面构成)为半导体激光器的光学腔长,  $L_{EC}$ (由半导体激光器的后端面和光

作者简介: 郭海平(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事外腔半导体激光器调谐、线宽压窄方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wanchenhao@hust.edu.cn

收稿日期: 2015-06-23; 收到修改稿日期: 2015-09-11

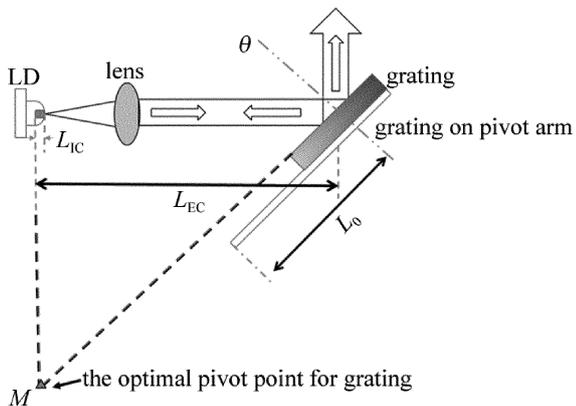


Fig. 1 Schematic diagram of Littrow configuration of ECDL

栅面构成)为外腔腔长,  $L_0$  为光栅到转轴的距离。

参考文献 [13] 中将内、外腔当做 F-P 谐振腔, 用 Airy 公式表征其模结构, 本文中考虑到由于内、外腔含有增益物质, 模结构可由腔增益表征。由多光束干涉理论推导腔增益。如图 2 所示,  $R_1, R_2$  分别为 LD 两端面反射率,  $T_2$  为 LD 前端面透射率,  $T_2 = 1 - R_2, E_n, E_{n+1}$  为两连续透射的子光场,  $E_{n+1} = G\sqrt{R_1 R_2} E_n e^{i\gamma}$  ( $\gamma$  为相位差,  $\gamma = 4\pi \frac{L_{IC}}{\lambda} + 2\pi$ , 其中  $2\pi$  是由两次端面反射引入的相位差,  $\lambda$  为波长,  $G$  为 LD 单程增益)。

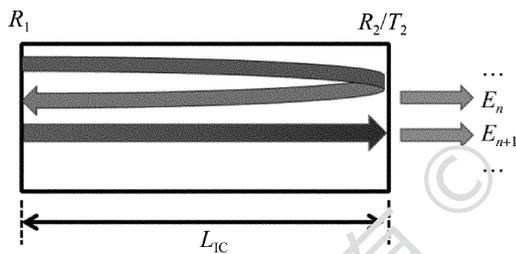


Fig. 2 Light wave of LD cavity

LD 输出光场为:

$$E_{IC} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n = \frac{E_0}{1 - G\sqrt{R_1 R_2} e^{i\gamma}} \quad (1)$$

式中, 初始透射的子光场  $E_0 = \sqrt{GT_2} A_0$  ( $A_0$  为 LD 腔内初始受激辐射场振幅)。

LD 输出光强为:

$$I_{IC} = |E_{IC}|^2 = \frac{GT_2 I_0}{1 + G^2 R_1 R_2 - 2G\sqrt{R_1 R_2} \cos\gamma} \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为 LD 腔内初始受激辐射场光强,  $I_0 = A_0^2$ 。

由(2)式可得内腔增益为:

$$G_{IC} = \frac{G}{1 + G^2 R_1 R_2 - 2G\sqrt{R_1 R_2} \cos\gamma} \quad (3)$$

类似地, 外腔半导体激光器外腔增益为:

$$G_{R_g} = \frac{T_2}{1 + G^2 T_2^2 R_1 R_g - 2GT_2\sqrt{R_1 R_g} \cos\beta} \quad (4)$$

式中, 相位差  $\beta = 4\pi L_{EC}/\lambda + 2\pi$  (其中  $2\pi$  是由两次端

面反射引入的相位差,  $\lambda$  为波长),  $R_g$  为光栅反馈的中心波长  $\lambda_c$  处最大反射率。

考虑到光栅反馈<sup>[14]</sup>效应  $R_3$ , 外腔增益修正为:

$$G_{R_3} = \frac{T_2}{1 + G^2 T_2^2 R_1 R_3 - 2GT_2\sqrt{R_1 R_3} \cos\beta} \quad (5)$$

式中,  $R_3 = R_g \exp\left\{2\left[-\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{\Delta\lambda}\right]\right\}$ ,  $\Delta\lambda$  为光栅反馈曲线的半峰全宽, 假设  $\Delta\lambda = \frac{\lambda_c}{1.66N}$ ,  $N$  为光栅被光束照射的线数。

由(3)式、(5)式可得内腔、外腔构成的复合腔增益:

$$G_0 = \frac{I_{EC}}{I_0} = G_{IC} G_{R_3} \quad (6)$$

根据(3)式~(6)式及表 1 中的参量, ECDL 模结构的模拟结果如图 3、图 4 所示。

Table 1 Simulation parameters

parameter	$L_0$ /mm	$L_{IC}$ /mm	$R_1$	$R_2$	$R_g$	$G$	$\lambda_c$ /nm	$N$
value	0.39	156	0.95	0.05	0.25	1	780	6000

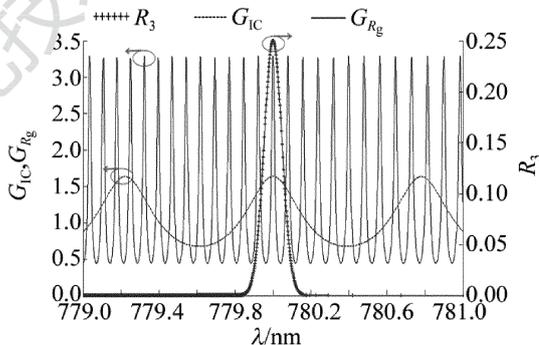


Fig. 3 Schematic diagram of grating-feedback profile and mode structure of the internal and external cavity

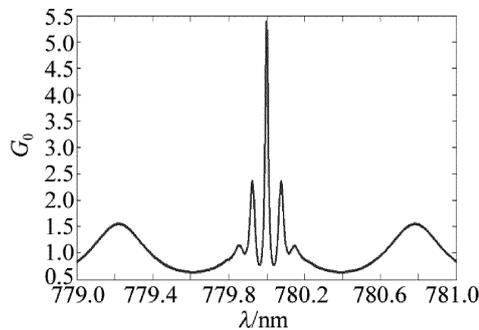


Fig. 4 Compound-cavity mode structure of ECDL

## 2 外腔模动态稳定性

要实现连续调谐, 要求转动光栅的同时改变外腔长度<sup>[15]</sup>。本文中研究光栅面与转臂不在同一平面的情形, 如图 5 所示。  $L_g$  为光栅平面到转臂的距离,  $\alpha$  为转轴逆时针转动的角度,  $L_e$  为光栅转动引起外腔长度的变化量,  $L_d$  为光栅转动引起入射光相对于光栅平面

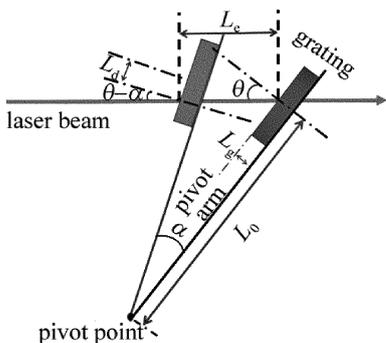


Fig. 5 Schematic diagram of grating rotation

的位移量,  $L_0$  为光栅到转臂的距离。转动光栅, 同时改变外腔长度, 即使外腔的调谐速率与光栅的调谐速率匹配。

### 2.1 光栅转动对外腔模波长的影响

光栅逆时针转动  $\alpha$ , 外腔模波长为:

$$\lambda_{EC} = \frac{2(L_{EC} - L_e)}{q} \quad (7)$$

式中,  $q$  为外腔的纵模序数, 考虑到光栅转动后入射光相对于光栅平面的位移引入的 1 级衍射光光场相位的变化,  $q$  修正为  $q = \frac{2L_{EC}}{\lambda_0} + \frac{L_d}{d}$ ,  $L_d = \frac{L_g}{\sin\alpha} - \frac{L_g \cos\alpha - L_0 \sin\alpha}{\cos(\theta - \alpha)} \frac{\cos\theta}{\sin\alpha} - L_0 - L_g \tan(\theta - \alpha)$ ,  $L_e = \frac{L_g(1 - \cos\alpha) + L_0 \sin\alpha}{\cos(\theta - \alpha)}$ , 其中,  $\lambda_0$  为光栅转动前复合腔输出的初始波长,  $\lambda_0 = 2d \sin\theta$ ,  $d$  为光栅周期。

2.2 光栅转动对光栅反馈波长的影响  
光栅逆时针转动  $\alpha$ , 中心衍射波长为:

$$\lambda_g = 2d \sin(\theta - \alpha) \quad (8)$$

(7) 式、(8) 式对  $\alpha$  求导 并令  $\alpha \rightarrow 0$ :

$$\left. \frac{d\lambda_{EC}}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = - \frac{\lambda_0^2 L_e \cos\theta - \lambda_0^2 L_0 \sin\theta + 2dL_0 \lambda_0}{2dL_{EC} \cos\theta} \quad (9)$$

$$\left. \frac{d\lambda_g}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = -2d \cos\theta \quad (10)$$

外腔调谐速率和光栅调谐速率匹配的初始条件为:

$$\left. \frac{d\lambda_{EC}}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = \left. \frac{d\lambda_g}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} \quad (11)$$

本文中光栅位置为  $L_0 = 10\text{mm}$ ,  $L_g = 15\text{mm}$ , 其它参量为: 波长  $\lambda_0 = 780\text{nm}$ , 光栅周期  $d = 1/1800\text{mm}$ , 代入(11)式中, 得初始外腔腔长  $L_{EC} = 17.3995\text{mm}$ 。如果令  $L_g = 0\text{mm}$ ,  $L_0 = L_{EC}/\sin\theta$ , 即光栅面与转臂位于同一平面, 转轴位于 LD 后端面与光栅面的交点上, 见图 1 中的 M 点,  $\lambda_{EC} = -2d \sin(\alpha - \theta) = \lambda_g$ , 将获得无限大的连续调谐范围, 这与参考文献 [12] 中的结论是一致的。

在已知  $L_{EC}$  的情况下, 讨论该系统的连续 (无跳模) 调谐范围。

无跳模调谐条件为:

$$|\nu_{EC} - \nu_g| \leq \frac{1}{2} \nu_{FSR} \quad (12)$$

式中,  $\nu_{EC}, \nu_g$  分别为由腔长决定的光频率和由光栅反馈的光频率, 自由频谱范围  $\nu_{FSR} = \frac{c}{2(L_{EC} - L_e)}$ ,  $c$  为真空中的光速, 即  $\left| \frac{1}{\lambda_{EC}} - \frac{1}{\lambda_g} \right| \leq \frac{1}{4(L_{EC} - L_e)}$ 。计算光栅逆时针和顺时针方向转动的最大角度分别为  $\alpha_+ = -4.3 \times 10^{-3} \text{rad}$  和  $\alpha_- = 4.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ , 调谐范围定义为  $\Delta\lambda = |\lambda_{EC, \alpha_+} - \lambda_{EC, \alpha_-}| = 6.8\text{nm}$ , 其中  $\lambda_{EC, \alpha_+}, \lambda_{EC, \alpha_-}$  分别为光栅顺时针转动和逆时针转动时首次发生跳模时的波长。

3 透镜位置对输出线宽的影响  
外腔 LD 的线宽与光栅的反射率 [16] 有关, 当光栅分辨率一定时, 其 1 级衍射光反射率  $R_g$  越大, 外腔 LD 的线宽越窄, 且增大光栅 1 级衍射光反射率时, 光栅的 0 级衍射光功率 (系统的输出功率) 将降低。考虑到系统的后向耦合效率  $\eta$ , 1 级衍射光实际反射率  $R$  修正为  $R - \eta R_g$ 。本文中分析在光栅的反射率和分辨率一定时, 增大系统的后向耦合效率, 降低耦合功率损耗, 减小外腔 LD 的线宽。由于输出线宽与  $R$  相关, 透镜位置对输出线宽的影响可以退化为透镜对系统后向耦合效率  $\eta$  的影响。如图 6 所示,  $E_1$  为 LD 出射光场,  $E_2$  为入射到光栅的光场经光栅反馈透镜耦合进 LD 的光场。

### 3 透镜位置对输出线宽的影响

如图 6 所示,  $E_1$  为 LD 出射光场,  $E_2$  为入射到光栅的光场经光栅反馈透镜耦合进 LD 的光场。

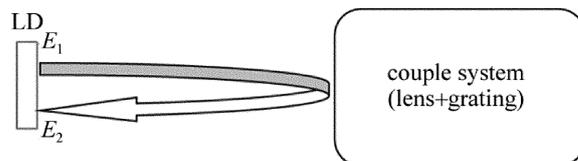


Fig. 6 Schematic diagram of coupling between output field and feedback field

在已知  $L_{EC}$  的情况下, 下面讨论准直透镜的位置对后向耦合效率的影响。

后向耦合效率为:

$$\eta = \frac{\left| \iint E_1(x, y) E_2(x, y) dx dy \right|^2}{\iint E_1^2(x, y) dx dy \iint E_2^2(x, y) dx dy} \quad (13)$$

式中,  $E_1 = A_1 \exp\left[-\left(\frac{x^2}{w_{1x}^2} + \frac{y^2}{w_{1y}^2}\right)\right] \exp\left[-jk\left(\frac{x^2}{2R_{1x}} + \frac{y^2}{2R_{1y}}\right)\right]$ ,  $A_1$  为出射光场的振幅, 出射光场波前曲率半径  $R_{1x(1y)} = 1/\text{Re}\left\{\frac{1}{q_{1x(1y)}}\right\}$ ,  $q_{1x(1y)}$  为平行 (或垂直) 于结平面方向的  $q$  参量, 出射光束光斑半径  $w_{1x(1y)} = \lambda/$

$(\pi\theta_{1x(1y)})$ , 其中  $\theta_{1x(1y)}$  为平行(或垂直)于结平面光束远场发散角的一半, 波数  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $E_2 = A_2 \times \exp\left[-\left(\frac{x^2}{w_{2x}^2} + \frac{y^2}{w_{2y}^2}\right)\right] \exp\left[-jk\left(\frac{x^2}{2R_{2x}} + \frac{y^2}{2R_{2y}}\right)\right]$ ,  $A_2$  为耦合光场的振幅, 耦合光场波前曲率半径  $R_{2x(2y)} = 1/\text{Re}\left[\frac{1}{q_{2x(2y)}}\right]$ , 耦合光束光斑半径  $w_{2x(2y)} = \sqrt{\frac{-\lambda}{\pi \text{Im}\left[1/q_{2x(2y)}\right]}}$ ,  $\text{Re}$  表示复数取实部,  $\text{Im}$  表示复数取虚部,  $q_{2x(2y)} = \frac{Aq_{1x(1y)} + B}{Cq_{1x(1y)} + D}$ ,  $A, B, C$  和  $D$  为光线变换矩阵的矩阵元。傍轴近似下, 光线变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $L$  为 LD 出光面到透镜的距离,  $f$  为透镜焦距,  $l$  为透镜到光栅平面的距离, 已知  $L_{\text{EC}} = L + l$ 。

求得系统的后向耦合效率为:

$$\eta = 4w_{1x}w_{1y}w_{2x}w_{2y} \left\{ (w_{1x}^2 + w_{2x}^2)^2 + \left[ (kw_{1x}^2w_{2x}^2)/(2R_{2x}) \right]^2 \right\}^{-1/2} \left\{ (w_{1y}^2 + w_{2y}^2)^2 + \left[ (kw_{1y}^2w_{2y}^2)/(2R_{2y}) \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (15)$$

本文中使用的 Thorlabs 公司的 L780P010 半导体激光器的相关参量进行仿真计算, 波长为 780nm, 水平和垂直方向的发散角分别为  $10^\circ$  ( $\theta_{1y} = 0.057\text{rad}$ ) 和  $30^\circ$  ( $\theta_{1x} = 0.262\text{rad}$ ), 使用的准直透镜为 Thorlabs 公司的 A230-B 非球面透镜, 有效焦距为 4.51mm, 数值孔径为 0.55, 玻璃材质为 S-NPH1, 在 780nm 处的折射率为 1.7864, 经透镜准直后的光束直径为 3mm。图 7 为后向耦合效率  $\eta$  与 LD 的透镜距离  $L$  的关系。

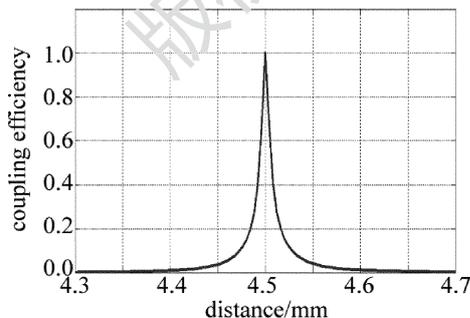


Fig. 7 Relationship between back-coupling efficiency of the system  $\eta$  and lens location  $L$

从图中可以看出, 当  $L = 4.51\text{mm}$  时, 可以得到最大的后向耦合效率 99% (当  $L$  偏离 4.51mm 时, 后向耦合效率急剧下降), 考虑到透镜的菲涅耳反射损耗, 例如本文中使用的透镜在  $\lambda = 780\text{nm}$  处的折射率  $n =$

1.7864, 两侧表面损耗的光功率表征为  $\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = 8\%$ , 假设光栅的 1 级光衍射效率为 25%, 考虑到后向耦合效率, 在外腔中往返 1 周大约剩余 17.7% 的光功率耦合进 LD, 即  $R = 0.177$ , 这是本文中实验装置耦合进 LD 最大功率比例的理论值。外腔半导体激光器的理论线宽<sup>[17]</sup>为:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 \left[ 1 + \frac{\tau}{\tau_{\text{in}}} \left( 1 - \frac{r_2}{r} \right) \right]^{-2} \quad (16)$$

式中,  $\Delta\nu_0$  为无外腔时的激光器本征线宽,  $r_2$  和  $r$  为 LD 前表面和外腔(光栅 1 级光场)的振幅反射率, 且有  $R_2 = r_2^2, R = r^2, \tau_{\text{in}}$  和  $\tau$  分别为光子在 LD 有源区和外腔中的往返渡越时间。

本文中使用的 LD 前端面镀膜后的反射率  $R_2 = 0.05$ , 外腔反射率(1 级衍射光实际反射率)  $R = 0.177$ , 内腔光学长度为 0.275mm (腔长 0.25mm, 折射率为 3.5), 外腔长 17.4mm, 注意到参考文献[17]中的外腔是由光栅面 and LD 前端面构成, 加外腔后, 理论线宽为未加外腔时的 0.96%, 极大压窄了 LD 的线宽。

## 4 结论

动态模稳定是外腔半导体激光器的一个重要特性, 在转轴位置固定的条件下, 研究了光栅面与转臂不在同一平面的情形下, 考虑了光栅转动时, 入射光相对于光栅平面的位移引起 1 级衍射光场相位的变化, 推导了给定实验参量下获得最大的动态模稳定范围的外腔长度, 最大动态模稳定范围为 6.8mm, 采用严格耦合理论和光线变换矩阵, 分析了透镜位置对输出线宽的影响, 理论上获得了该系统线宽可压窄为未加外腔时的 0.96%。

## 参 考 文 献

- [1] YANG X D, LI Sh J, CAO X M, *et al.* Grating-feedback frequency-tuning extended-cavity laser diode [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (6):645-647 (in Chinese).
- [2] LI B, TU P, XU Y Y, *et al.* Narrow linewidth diode laser with grating external cavity in 405 [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3):193-198 (in Chinese).
- [3] GONG H, LIU Zh G, ZHOU Y L, *et al.* Extending the mode-hop-free tuning range of an external-cavity diode laser by synchronous tuning with mode matching [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (33):7878-7884 (in Chinese).
- [4] RUHNKE N, MÜLLER A, EPPICH B, *et al.* 400mW external cavity diode laser with narrowband emission at 445nm [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13):3794-3797.
- [5] RUHNKE N, MÜLLER A, EPPICH B, *et al.* 400mW external cavity diode laser with narrowband emission at 445nm [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13):3794-3797.
- [6] BREGUET J M, HENEIN S, KJELBERG I, *et al.* Tunable extended-cavity diode laser based on a novel flexure-mechanism [J]. *Interna-*

- tional Journal of Optomechatronics, 2013, 7(3):181-192.
- [7] WEI F, CHEN D J, XIN G F, *et al.* A compact and rugged tunable external cavity diode laser with littman-metcalf configuration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11):1102012 (in Chinese).
- [8] HUANG K K, LI N, LU X H. 894nm external cavity diode laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11):2129-2133 (in Chinese).
- [9] ELL J F, MILLER W, WRIGHT D, *et al.* Frequency narrowing of a 25W broad area diode laser[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(5):051115.
- [10] DUTTA S, ELLIOTT D S, CHEN Y P. Mode-hop-free tuning over 135GHz of external cavity diode lasers without antireflection coating [J]. Applied Physics, 2012, B106(3):629-633.
- [11] REPASKY K S, NEHRIR A R, HAWTHORNE J T, *et al.* Extending the continuous tuning range of an external-cavity diode laser [J]. Applied Optics, 2006, 45(35):9013-9020.
- [12] de LABACHELERIE M, PASSEDAT G. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers[J]. Applied Optics, 1993, 32(3):269-274.
- [13] FÜHRER T, WALTHER T. Extension of the mode-hop-free tuning range of an external cavity diode laser based on a model of the mode-hop dynamics[J]. Optics Letters, 2008, 33(4):372-374.
- [14] YAN G Y, SCHAWLOW A L. Measurement of diode laser characteristics affecting tunability with an external grating[J]. Journal of the Optical Society of America, 1992, B9(11):2122-2127.
- [15] TRUTNA W R, STOKES L F. Continuously tuned external cavity semiconductor laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(8):1279-1286.
- [16] LOH H, LIN Y J, TEPER I, *et al.* Influence of grating parameters on the linewidths of external-cavity diode lasers[J]. Applied Optics, 2006, 45(36):9191-9197.
- [17] CHAI Y J, ZHANG H Y, ZHOU B K. Line width performance analysis of semiconductor lasers with strong feedback external[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 15(12):885-889 (in Chinese).