

准直透镜失调对 Littman-Metcalf 光栅外腔激光器线宽的影响

周平^{1,2}, 吴永前², 张蓉竹¹

(1. 四川大学电子信息学院, 四川成都 610065;
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209)

摘要: 以光栅外腔半导体激光器的理论知识为基础, 对 Littman-Metcalf 型外腔半导体激光器的工作原理进行了说明, 并详细地讨论了外腔半导体激光器的线宽压窄以及模式选择机制, 采用严格的耦合理论和光线变换矩阵推导了系统结构参数对光场耦合效率影响的计算公式。同时, 对影响 Littman-Metcalf 外腔激光器输出激光线宽的几个重要因素进行了分析, 重点讨论了系统中准直透镜位置失调导致的线宽变化规律。计算结果表明: 合理地控制 Littman-Metcalf 光栅外腔半导体激光器的外腔参数可以将中心波长为 785 nm 半导体激光器的本征线宽压窄四个数量级, 该外腔系统中准直透镜位置失调会影响系统出射光场与经外腔反馈光场之间的耦合效率, 进而影响光栅外腔半导体激光器的输出线宽。

关键词: 外腔激光器; 耦合效率; 线宽; 透镜失调; 装调容差

中图分类号: TN243 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210168

Influence of the misalignment of the collimating lens on the line-width of Littman-Metcalf grating external cavity laser

Zhou Ping^{1,2}, Wu Yongqian², Zhang Rongzhu¹

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Based on the theoretical knowledge of grating external cavity semiconductor laser, the working principle of Littman-Metcalf type external cavity semiconductor laser was explained, and the wide voltage narrow ground wire and mode selection mechanism of external cavity semiconductor laser were discussed in detail. Based on strict coupling theory and ray transformation matrix, the calculation formula of the influence of system structure parameters on the coupling efficiency of light field was derived. At the same time, several important factors affecting the output linewidth of littman-Metcalf external cavity laser were analyzed, and the variation of linewidth caused by the misalignment of collimating lens in the system was discussed. The calculation results show that the proper control of the parameters of the littman-metcalf grating external cavity semiconductor laser can narrow the intrinsic linewidth of the semiconductor laser with the central wavelength of 785 nm by four orders of magnitude. In this external cavity system, the misalignment of the collimating lens would affect the coupling efficiency between the emitted light field and the feedback light field through the external cavity. Then the output linewidth of the grating external cavity semiconductor laser is affected.

Key words: external cavity laser; coupling efficiency; line-width; lens misalignment; assembly tolerance

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-01-20

基金项目: 四川省重大科学仪器设备专项 (2019ZDZX0038)

作者简介: 周平, 男, 硕士生, 主要从事精密光学制造与检测方面的研究。

导师简介: 张蓉竹, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与光电子技术、精密光学制造与检测技术方面的研究。

0 引言

Littman-Metcalf 型光栅外腔半导体激光器 (External cavity semiconductor lasers, ECDL) 采用衍射光栅和高反镜作为反馈元件, 因其具有单纵模运转、窄线宽和输出激光波长在较大范围内能够实现无跳模连续可调等性能, 在相干光通信、高精度干涉测量技术、光纤通信波分复用技术、光外差传感和激光雷达等领域具有重要应用, 成为激光技术方向的研究热点之一^[1-3]。

对于 Littman-Metcalf 型光栅外腔半导体激光器而言, 重点关注的是其输出线宽问题, 如何获得最窄线宽输出是设计中重点考虑的问题。柴燕杰等人分析了具有强反馈外腔的半导体激光器线宽特性, 给出了强反馈条件下外腔半导体激光器的线宽压窄率表达式^[4]。龙睿等人对影响 Littrow 型光栅外腔半导体激光器线宽压缩的各种因素进行了分析, 发现外腔反馈等效于增加了端面反射率, 使得受激辐射增大, 自发辐射遭到了抑制, 从而使得线宽减小^[5]。刘大鹏等人系统研究了外腔激光器中二极管激光器增益芯片结构和尺寸、外腔光栅反射率对线宽压窄的影响, 研究表明, 通过合理设计外腔结构参数、优化外腔光栅性质和增益芯片尺寸结构, 可以显著压窄激光线宽至千赫兹量级^[6]。Huanqian Loh 等人研究了外腔光栅的分辨率以及给二极管激光器输出端面涂上减反射涂层对外腔激光器输出线宽的影响, 研究表明闪耀光栅的分辨率越高越有利于线宽的压窄^[7]。以上研究重点分析了二极管激光器有源区的参数以及外腔参数对光栅外腔半导体激光器线宽的影响, 然而, 在 Littman-Metcalf 型外腔激光器运行过程中, 最关键的环节是光场的反馈, 耦合效率是描述反馈过程有效性的关键参数, 而如何利用光场耦合效率来对 Littman-Metcalf 型外腔激光器输出线宽特性的变化进行分析还未见相关研究报道。

文中将具体分析 Littman-Metcalf 结构外腔参数对激光器输出线宽的影响, 并通过严格耦合理论和光线变换矩阵推导出 Littman-Metcalf 型外腔激光器系统原始光场与反馈光场之间的耦合效率计算公式。然后利用透镜的位置失调来改变系统耦合效率, 进而研究输出激光线宽随耦合效率变化的规律。

1 Littman-Metcalf 型光栅外腔半导体激光器的结构及工作原理

Littman-Metcalf 型光栅外腔半导体激光器用反射镜作为反馈原件, 如图 1 所示^[8]。二极管激光器发射宽带光谱以一定的角度入射到闪耀光栅, 该入射角度始终不变。由光栅方程 $d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda$ (其中 α 为入射角, β 为衍射角) 可见, 不同的衍射角决定了不同频率的光^[9]。只有与反射棱镜垂直的光波将原路返回到闪耀光栅, 再一次发生衍射, 沿着第一次入射光栅的路径原路返回二极管激光器的有源区。此时, 由二极管激光器的左端腔面和反射棱镜反射面组成新的谐振腔, 也称外腔。空间分布的各个波长单色光, 只有满足以上光路几何关系的光波才可以在新的谐振腔中形成振荡。将第一次经过闪耀光栅衍射产生的零级光做为激光输出。

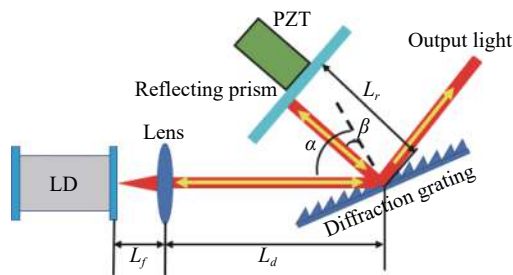


图 1 Littman-Metcalf 型外腔半导体激光器结构图

Fig.1 Structure diagram of Littman-Metcalf configuration of ECDL

二极管激光器的纵模间隔和外腔激光器的纵模间隔分别为^[10]:

$$\Delta\lambda_d = \frac{\lambda^2}{2n_g L_i} \quad (1)$$

式中: n_g 为群速度折射率; L_i 为二极管激光器有源区长度。

$$\Delta\lambda_c = \frac{\lambda^2}{2(L_f + L_d + L_r)} \quad (2)$$

式中: L_f 为激光出射点到准直透镜之间的距离; L_d 为准直透镜到闪耀光栅入射点之间的距离; L_r 为闪耀光栅入射点到调谐反射镜入射点之间的距离。

对比公式 (1) 和公式 (2), 因为外腔长度远远大于内腔, 所以外腔的纵模频率间隔比内腔的频率间隔小得多, 如图 2 中的 c 和 d 所示。调谐反射镜和闪耀光栅只允许较窄 $\delta\lambda$ 波长范围内的光波返回有源区, 在有

源区 $\delta\lambda$ 范围内的这一组外腔模式的损耗急剧下降,如图 2 中的 a 所示。通过增益饱和模式竞争, $\delta\lambda$ 范围内的波长优先激射, $\delta\lambda$ 范围外的其他波长受到抑制,如图 2 中的 d 所示。并且 $\delta\lambda$ 内的各个纵模由于模式竞争,光栅反馈 $\delta\lambda$ 范围中的峰值波长形成单一的外腔模式振荡激射,如图 2 中的 e 所示。当平面反射镜的角度在 PZT 的作用下发生改变时, $\delta\lambda$ 范围将会发生移动,此时,覆盖有源区内损耗差 $\delta\lambda$ 范围内的波长发生了改变,从而在有源区中振荡的激射波长发生了改变,可见,改变调谐反射镜的角度实现外腔激光器的波长调谐^[11]。

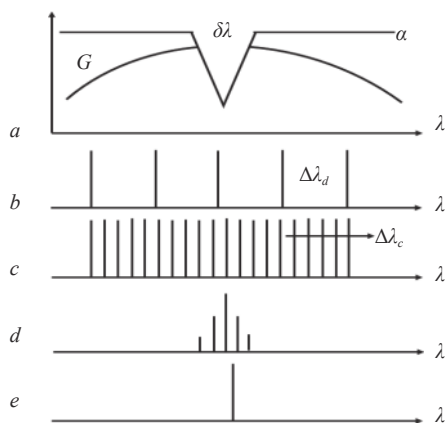


图 2 外腔激光器模式选择原理图

Fig.2 Schematic diagram of external cavity laser mode selection

2 耦合效率对激光器输出线宽的影响

强反馈条件下,即 $R_{out} > 10R_2$ 时,外腔半导体激光器的理论线宽为^[12]:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 \frac{1}{\left[1 + \tau/\tau_{in} \left(1 - \sqrt{R_0/R_{out}}\right)\right]^2} \quad (3)$$

式中: $\Delta\nu_0$ 为二极管激光器的本征线宽,后文计算 $\Delta\nu_0$ 设为 100 MHz; R_0 为激光二极管输出端面的反射率; R_{out} 为外腔的反射率。在 Littman-Metcalf 结构中,激光经过两次闪耀光栅衍射、一次反射棱镜反射作用,因此 $R_{out} = R_r R_g R_g$, R_g 为闪耀光栅的一级衍射效率, R_r 为反射棱镜的反射率, τ 、 τ_{in} 分别为光子在二极管激光器有源区和外腔往返渡越的时间,与激光器的内腔长和外腔长度有关。

由公式 (3) 可见, Littman-Metcalf 型光栅外腔半导体激光器的输出线宽与外腔长度、激光二极管输出端

面反射率、闪耀光栅一级衍射效率以及调谐反射镜反射率密切相关^[13]。

由图 3 分析可得,外腔的引入对于激光器输出线宽有很显著的影响。在一定范围内,外腔长度的增加会使得输出线宽压窄四个数量级。然而,如图 3 所示,当外腔长大于 80 mm 时,对输出线宽的影响不再明显,考虑到腔长变大会增加激光器的损耗、降低输出功率以及激光器结构紧凑性^[13],实现理想输出应合理控制 Littman-Metcalf 外腔激光器的外腔腔长。由

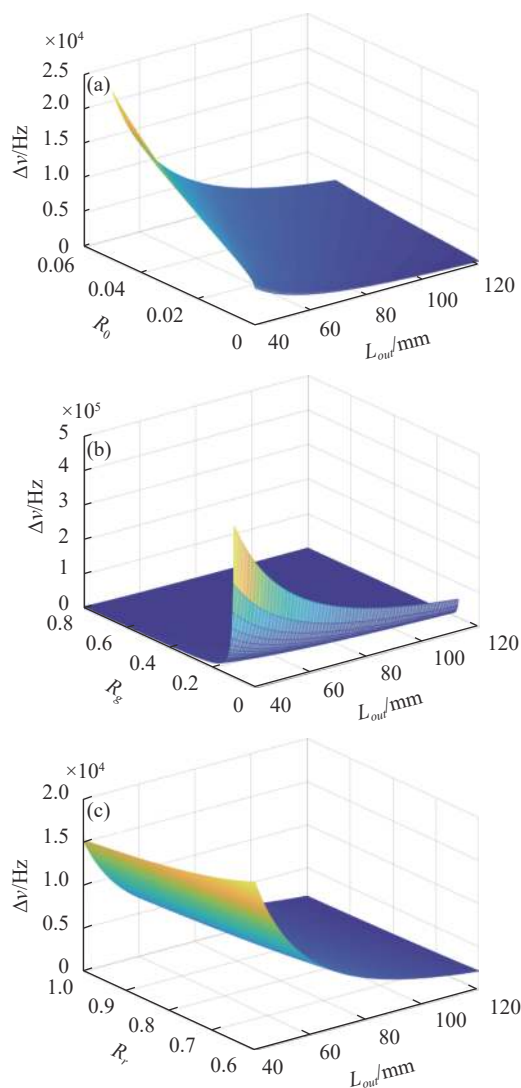


图 3 当 (a) 端面反射率、(b) 闪耀光栅衍射效率、(c) 棱镜反射率不同时,激光器输出线宽与外腔长度的关系

Fig.3 Relationship between the output linewidth of the laser and length of the external cavity while (a) the reflectivity of laser diode, (b) the diffraction efficiency of blazed grating and (c) the reflectivity of reflecting prism are different

图 3(a) 图可见, 在 LD 端面反射率从 0.01 增加到 0.05 时, 激光器的输出线宽增加了五倍, 因此窄线宽输出一般要求 LD 输出端面镀增透膜, 且透过率不低于 99%。由图 3(b) 可见, 当闪耀光栅的一级衍射效率大于 0.3 时, 激光器输出线宽近似不变, 而大的一级衍射效率会降低激光器输出功率, 因此在保证窄线宽输出的前提下, 闪耀光栅的一级衍射效率越小越好。由图 3(c) 可见, 在激光器外腔长保持不变时, 增大反射棱镜反射率有利于窄线宽输出, 因此一般采用全反镜。

外腔的作用是将出射光场反馈回二极管激光器, 这一过程称为光场的耦合。利用耦合效率来表征光场反馈的有效性, 可将 R_{out} 修正为 $R_{out} = \eta R_r R_g R_g$ 。从而得到耦合效率与输出线宽之间的表达式:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 \frac{1}{\left[1 + \tau/\tau_{in} \left(1 - \sqrt{\frac{R_0}{\eta R_r R_g R_g}}\right)\right]^2} \quad (4)$$

图 4 为系统的耦合效率 η 对激光器输出线宽的影响。计算中, R_0 取 0.002, R_g 取 0.6, R_r 取 0.99, 外腔长度为 60 mm, 二极管激光器有源区长度为 0.3 mm。

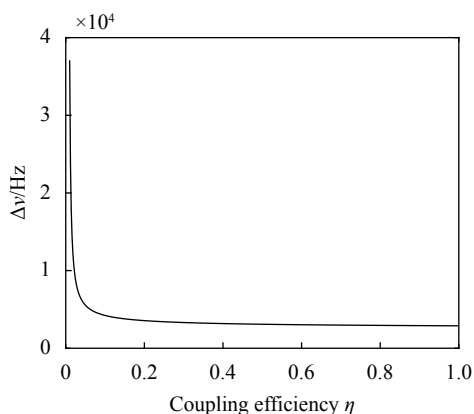


图 4 耦合效率对激光器输出线宽的影响

Fig.4 Influence of coupling efficiency on the output linewidth of the laser

二极管激光器原始输出光场和经外腔作用耦合进入激光腔的反馈光场的能量耦合效率, 也即重叠光场的积分^[14]。

设 LD 出射光光场为:

$$E_1 = E_1(x) \cdot E_1(y) = A_1 \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\omega_{1x}^2} + \frac{y^2}{\omega_{1y}^2}\right) - jk\left(\frac{x^2}{2R_{1x}} + \frac{y^2}{2R_{1y}}\right)\right] \quad (5)$$

式中: $E_1(x)$ 和 $E_1(y)$ 分别为输出光束平行和垂直于

PN 结平面的光场。经外腔反馈光光场为:

$$E_2 = E_2(x) \cdot E_2(y) = A_2 \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\omega_{2x}^2} + \frac{y^2}{\omega_{2y}^2}\right) - jk\left(\frac{x^2}{2R_{2x}} + \frac{y^2}{2R_{2y}}\right)\right] \quad (6)$$

$$\eta = \eta_x \eta_y = \frac{\left|\iint E_1(x,y) E_2(x,y) dx dy\right|^2}{\iint E_1^2(x,y) dx dy \iint E_2^2(x,y) dx dy} \quad (7)$$

公式 (5)~(7) 中, η_x 、 η_y 分别为平行和垂直于 PN 结平面的耦合效率; η 为总耦合效率; A_1 和 A_2 为光场振幅; $R_{1x(1y)}$ 为出射光波曲率半径; $R_{1x(1y)} = 1/\text{Re}\left\{\frac{1}{q_{1x(1y)}}\right\}$, $q_{1x(1y)} = i\pi\omega_{1x(1y)}^2/\lambda$ 为平行 (或垂直) 于 PN 结平面方向的 q 参量; $\omega_{1x(1y)} = \lambda/(\pi\theta_{1x(1y)})$ 为出射光束光斑半径; $\theta_{1x(1y)}$ 为平行或垂直于 PN 结平面光束远场发散角的一半; 波数 $k = 2\pi/\lambda$; $R_{2x(2y)}$ 为反馈光波前曲率半径; $\omega_{2x(2y)} = \sqrt{\frac{-\lambda}{\pi \text{Im}[1/q_{2x(2y)})}}$ 为反馈光光斑半径; $q_{2x(2y)} = \frac{Aq_{1x(1y)} + B}{Cq_{1x(1y)} + D}$; A 、 B 、 C 、 D 为光线传输矩阵的矩阵元, 傍轴近似下, Littman-Metcalf 系统的光线变换矩阵为^[15-17]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由以上分析可见, 准直透镜的位置对于系统光场的耦合效率有着较大的影响, 从而影响到系统最终输出的激光线宽。

3 透镜位置失调对线宽的影响

设激光从 LD 激射出来方向为 Z 轴, 垂直于出射光的发光面为 X 轴, 图 5 给出了透镜失调的两种主要情况, 图 5(a) 为透镜沿着 X 轴倾斜 β 角度, 图 5(b) 为

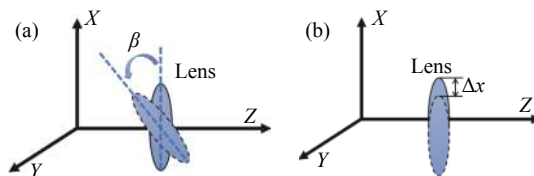


图 5 透镜沿 X 轴倾斜 (a) 或偏移 (b) 示意图

Fig.5 Schematic diagram of lens tilting (a) and decentering (b) along X-axis

透镜沿着 X 轴偏移 Δx 。

文中使用 Thorlabs 公司的 L785P090 半导体激光器的相关参数进行仿真计算,中心波长为 785 nm,该激光器的水平和垂直方向发散角分别为 $10^\circ(0.087 \text{ rad})$ 和 $30^\circ(0.262 \text{ rad})$,使用的准直透镜为 Thorlabs 公司的 C105TMD-B 非球面透镜,有效焦距为 5.5 mm。

首先分析倾斜带来的影响,当透镜在装调过程中沿着 X 轴或 Y 轴倾斜时,透镜的光线传输矩阵将会发生改变,从而影响耦合效率以及输出线宽。以 X 轴倾斜为例,此情况下,平行和垂直于 PN 结平面的光线变换矩阵分别由公式 (9) 和公式 (10) 给出:

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\cos\theta} \left(\frac{n \cos\alpha}{\cos\theta} - 1 \right) \left(\frac{-1/f}{n-1} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos\theta \left(\frac{n \cos\alpha}{\cos\theta} - 1 \right) \left(\frac{-1/f}{n-1} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将公式 (9) 和公式 (10) 代入公式 (7),可得透镜沿 X 轴微小角度倾斜时,耦合效率变化如下图 6(a) 所示,其中 η_x 为平行于 PN 结平面的耦合效率, η_y 为垂直于 PN 结平面的耦合效率, η 为总耦合效率。同理可得,透镜沿着 Y 轴倾斜微小角度时,耦合效率变化如图 6(b) 所示。

通过以上分析可得,当准直透镜存在 β 角度倾斜时,在平行或垂直 PN 结平面方向,随着倾斜角度的增大,耦合效率不断降低。且沿着不同方向发生倾斜时,变化规律也是不同的。

由图 6(a)、图 7 和表 1 数据可见,当透镜沿着 X 轴倾斜时,相比垂直 PN 结平面的耦合效率,平行于 PN 结平面的光场耦合效率受倾斜量的影响更为明显。倾斜量为 0.14 rad 时, η_x 为 0.024, η_y 为 0.243,此时总耦合效率仅为 0.006,输出线宽是未失调状态的 100 倍。

由图 6(b)、图 7 和表 2 数据可见,当透镜沿着 Y 轴倾斜时,给定相同的倾斜量,垂直于 PN 结平面的光场耦合效率变化更显著。且在很小的范围内平行于 PN 结平面耦合效率 η_x 基本不变。倾斜量为 0.14 rad 时,耦合效率 η 仅为 0.095,线宽的变化较为平稳。由于 LD 发出的光束是具有发散角的高斯光束,且垂直和平行于 PN 结平面的发散角是不同的,当准直透镜

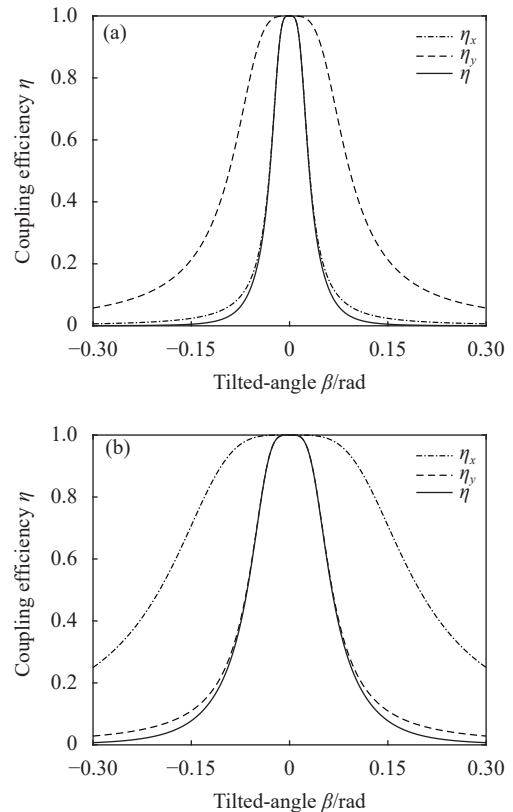


图 6 透镜沿着 (a) X 轴、(b) Y 轴倾斜对耦合效率的影响

Fig.6 Influence of lens tilted about (a) X -axis, (b) Y -axis on coupling efficiency

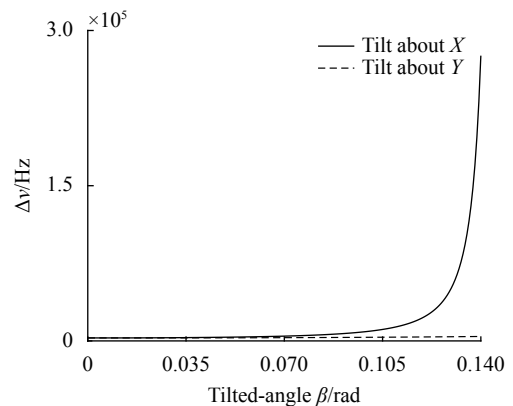


图 7 透镜倾斜对输出线宽的影响

Fig.7 Effects of lens tilted on output linewidth

倾斜时,出射光场与经过外腔返回的光场之间的重叠区域将会减小,进而导致耦合效率降低。垂直和平行于 PN 结平面的发散角度不同导致了透镜不同方向的倾斜对耦合效率的影响也是不同的。

接下来分析透镜在装调过程在沿着坐标轴发生偏移时,耦合效率以及输出线宽的变化规律。以透镜

表 1 输出线宽与 X 轴倾斜量的关系

Tab.1 Relationship between output linewidth and tilt amount of X-axis

		0	0.035	0.07	0.105	0.14
η_x	1	0.392	0.108	0.049	0.024	
η_y	1	0.968	0.701	0.404	0.243	
η	1	0.379	0.076	0.02	0.006	
$\Delta\nu/10^3$		2.88	3.19	4.64	112	281

表 2 输出线宽与 Y 轴倾斜量的关系

Tab.2 Relationship between output linewidth and tilt amount of Y-axis

		0	0.035	0.07	0.105	0.14
η_x	1	0.998	0.976	0.897	0.754	
η_y	1	0.891	0.446	0.243	0.126	
η	1	0.889	0.456	0.196	0.095	
$\Delta\nu/10^3$		2.88	2.91	3.14	3.37	5.69

沿着 X 轴偏移为例, 如图 5(b) 所示, 当透镜在装调过程中沿着 X 轴偏移 Δx 距离时, 此时平行于 PN 结平面的光场修正为公式 (11), 垂直于 PN 结平面的光场保持不变。同理, 沿着 Y 轴偏移时, 只需修正垂直于 PN 结平面的光场。

$$E_{1x} = \exp\left(-\frac{(x-\Delta x)^2}{\omega_{1x}^2}\right) \exp\left(-jk\frac{(x-\Delta x)^2}{2R_{1x}}\right) \quad (11)$$

将公式 (10) 代入公式 (6) 可得透镜沿着 X 轴或 Y 轴横向偏移时对耦合效率 η 的影响, 如图 8(a) 所示。 η_x 表示当透镜沿着 X 轴横向偏移时的耦合效率, η_y 表示透镜沿着 Y 轴横向偏移时的耦合效率。当沿着 Z 轴偏移时, 将改变激光二极管后端面与透镜之间的距离 L_f 以及透镜与闪耀光栅入射点之间的距离 L_d , 其对系统光场耦合效率的影响如图 8(b) 所示。

通过计算可得, 当准直透镜沿着坐标轴偏移 Δx 时, 不同方向的偏移对耦合效率以及输出线宽的影响也是不同的。

通过图 8(a)、图 9(a) 和表 3 数据分析可得, 当透镜沿着 X、Y 轴偏移时, 随着偏移量的增加, 耦合效率和降低, 且输出线宽逐渐增大, 相比沿着 X 轴偏移, Y 偏移给系统带来的影响更显著。

由 8(b)、图 9(b) 图和表 4 可见, 当二极管激光器

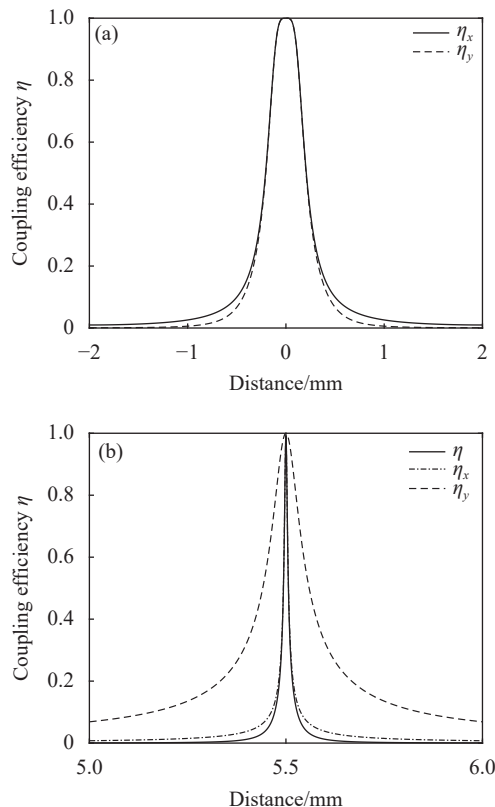


图 8 透镜沿着 (a) X、Y 轴, (b) Z 轴偏移对耦合效率的影响

Fig.8 Influence of lens decentered about (a) X and Y-axis, (b) Z-axis on coupling efficiency

表 3 输出线宽与 X、Y 轴向偏移量之间的关系

Tab.3 Relationship between output linewidth and decenter amount of X and Y-axis

		0	0.35	0.7	1.05	1.5
η_x	1	0.192	0.051	0.0236	0.014	
η_y	1	0.167	0.030	0.009	0.005	
$\Delta\nu_x/10^3$		2.88	3.58	5.39	7.78	15.9
$\Delta\nu_y/10^3$		2.88	3.68	7.41	521	1031

的后端面与透镜之间的距离 L_f 等于准直透镜的焦距 5.5 mm 时, 可以得到最大的耦合效率约 100%。当距离偏离焦距 f 时, 耦合效率急剧下降, η_x 变化更为剧烈。且激光器输出线宽增。当偏移量为 0.14 mm 时, 激光器的输出线宽是未失调状态的 200 倍。

上文分析可得, 当耦合效率大于 0.2 时, 外腔激光器输出线宽近似不变, 对各个误差项进行分析, 可得 Littman-Metcalf 外腔结构对准直透镜的装调容差如表 5 所示。

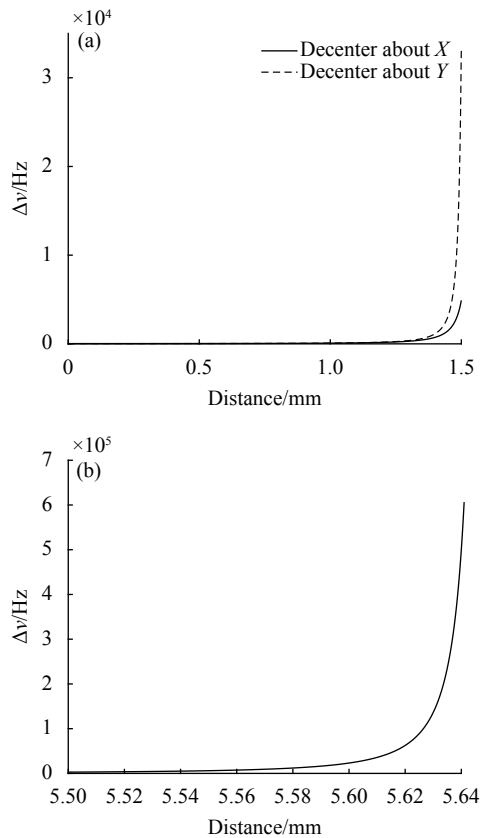


图 9 透镜沿着 (a)X、Y 轴, (b)Z 轴偏移对输出线宽的影响

Fig.9 Influence of lens decentered about (a) X and Y-axis, (b) Z-axis on output linewidth

表 4 输出线宽与 LD 的透镜距离的关系

Tab.4 Relationship between output linewidth and LD

lens location		5.5	5.535	5.57	5.605	5.64
η_x	1	0.122	0.053	0.035	0.026	
η_y	1	0.745	0.435	0.307	0.235	
η	1	0.091	0.023	0.011	0.007	
$\Delta\nu/10^3$		2.88	4.35	9.41	29.2	564

表 5 Littman-Metcalf 外腔结构准直透镜装调容差

Tab.5 Collimating lens installation tolerance of Littman-Metcalf external cavity

	T_x/rad	T_y/rad	D_x/mm	D_y/mm	D_z/mm
Assembly tolerance	0.0483	0.0881	0.3487	0.3046	0.0165

4 结 论

线宽压窄能力是 Littman-Metcalf 型光栅外腔半

导体激光器最重要的性能,文中计算了外腔参数对激光器输出线宽的影响,给出了系统光场耦合效率对输出线宽影响的表达式。从耦合原理可知装调过程中准直透镜位置产生横移、倾斜对系统的耦合效率会产生直接影响,从而导致输出线宽改变。通过计算发现,当透镜在装调过程中出现倾斜时,随着倾斜量的增大,耦合效率不断减小,平行和垂直于 PN 结平面的耦合效率对误差的敏感程度也不同。同时,输出线宽也随着耦合效率的降低不断增大。当透镜沿着 X 轴倾斜 0.14 rad 时,激光器输出线宽是未失调状态的 100 倍。透镜与 LD 出光面的距离误差相比其他两个方向的横移误差对耦合效率的影响更为明显,偏移量为 0.14 mm 时,平行于 PN 结平面耦合效率为 0.026,垂直于 PN 结平面的耦合效率为 0.235,总的耦合效率仅为 0.027。此时的输出线宽是未失调状态下的 200 倍。当耦合效率大于 0.2 时,耦合效率的变化对输出线宽的影响不再明显,由此得到了 Littman-Metcalf 外腔结构对透镜 X 倾斜的容限为 ± 0.0483 rad, Y 轴倾斜容限为 ± 0.0881 rad, XY 轴横移的容限为 ± 0.3 mm,透镜与 LD 出光面之间的距离容差仅为 ± 0.0165 mm,该结论可在一定程度上降低装调难度。

参考文献:

- [1] He Chunjiu. Study on grating external-cavity semiconductor lasers[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] Wei Fang, Chen Dijun, Xin Guofeng, et al. A compact and rugged tunable external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 68-70,73-76. (in Chinese)
- [3] Li Bing, Tu Ping, Xu Yongyue, et al. Narrow linewidth diode laser with grating external cavity in 405 nm band [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 199-204. (in Chinese)
- [4] Chai Yanjie, Zhang Hanyi, Zhou Bingkun. Linewidth performance analysis of semiconductor lasers with strong feedback external cavity [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995(12): 885-889. (in Chinese)
- [5] Long Rui, Wang Hailong, Gong Qian, et al. Optical feedback of semiconductor external cavity laser [J]. *Communications Technology*, 2013, 46(6): 142-144,151. (in Chinese)
- [6] Liu Dapeng, Chen Chao, Qin Li, et al. Study on linewidth characteristics of fiber grating external cavity semiconductor

- lasers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(2): 165-169. (in Chinese)
- [7] Huan Qian, Loh, Yu Ju, et al. Influence of grating parameters on the linewidths of external-cavity diode lasers [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(36): 9191-9197.
- [8] Zhu Yu, Liu Zhigang, Zhang Xin. Command-shaping based on impulse response function for dynamic-mode control of internal and external cavities in external-cavity diode laser [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2): 023101.
- [9] Wu Yue. Research on prism beam based grating external cavity semiconductor laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] Duarte F J. Tunable Lasers Hand Book[M]. San Digo: Academic Press. Inc, 1995.
- [11] Yang Zhanpeng. Research on 1.06 μm tunable external cavity semiconductor laser[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [12] Lei Pingshun, Xue Lifang, He Jun, et al. Output characteristics of Littrow-Type grating external cavity semiconductor lasers [J]. *Lasers and Optoelectronics Program*, 2011, 48(3): 21-25. (in Chinese)
- [13] Sun H, Menhart S, Adams A. Calculation of spectral linewidth reduction of external-cavity strong-feedback semiconductor lasers. [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(21): 4771.
- [14] Guo Haiping, Wan Chenhao, Xu Chengwen, et al. Study on dynamic mode stability of external cavity diode lasers [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 706-710. (in Chinese)
- [15] Saliba S D, Scholten R E. Linewidths below 100 kHz with external cavity diode lasers [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(36): 6961-6966.
- [16] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Huo Li, et al. Laser Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.(in Chinese)
- [17] Yuan Shifu, Riza N A. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(15): 3214-3222.