

## 浅析元件参数对外腔半导体激光器输出谱宽影响

李元栋<sup>1</sup>, 武永福<sup>2</sup>, 胡 猛<sup>2</sup>, 孙 瑞<sup>1</sup>

(1. 镇江船艇学院, 江苏 镇江 212003; 2. 陇东学院, 甘肃 庆阳 745100)

**摘 要:** 半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)需大功率窄线宽泵浦源, 但市售半导体激光器输出线宽远远大于碱金属原子吸收谱宽, 难以实现有效泵浦, 因此需采用 Littrow 外腔法压窄半导体激光器输出谱宽。Littrow 外腔系统中元件参数的选择直接影响大功率半导体激光器输出谱宽。为此文中沿入射光线方向构建外腔压窄模型, 利用球面镜替代柱面镜, 分析了微柱透镜阵列、光学系统和光栅元件对外腔输出谱宽的影响, 模拟结果为微柱透镜阵列焦距越小、光栅刻线越密、球面镜焦距越大, 外腔输出谱宽越窄, 实验结果符合理论模型。

**关键词:** 半导体激光器; 外腔; 谱线压缩

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)01-0094-04

## Influencing factors on spectral linewidth of external cavity diode laser

Li Yuandong<sup>1</sup>, Wu Yongfu<sup>2</sup>, Hu Meng<sup>2</sup>, Sun Rui<sup>1</sup>

(1. Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China; 2. Longdong University, Qingyang 745100, China)

**Abstract:** High power narrowed linewidth pump source is needed with diode pumped alkali laser developed. But the linewidth of the commercial diode laser is far exceed the absorption linewidth of the alkali atom. So the Littrow external cavity is used to narrowed the spectrum of high power diode laser array. The linewidth of high power diode laser array is directly affected by the parameters of elements in Littrow external cavity. In this paper, the model of external cavity diode laser was set up by using ray tracing method. By replacing cylindrical lens with sphere lens, the influence of micro-cylindrical lens array, beam shaping optics and grating were analysed. The results show that, to obtain narrower output laser linewidth, the focal length of micro-cylindrical lens array should be smaller, the grating grooves is denser, and the focal of spherical lens is larger. And the theoretical conclusions is demonstrated by experimental results.

**Key words:** diode laser; external cavity; linewidth narrowing

## 0 引言

半导体抽运碱金属蒸汽激光器以其量子效率高、废热少、气体介质易于流动散热、无单口径功率限制、高光束质量、有望成为下一代激光武器等优点吸引美国利弗莫尔国家实验室、通用公司、美国空军军官学校等机构投入研究<sup>[1-3]</sup>。碱金属蒸汽激光器需要窄线宽半导体泵浦源。此外窄线宽半导体泵浦源可用于光泵自旋交换极化惰性气体  $^3\text{He}$ 、 $^{129}\text{Xe}$  以实现人体肺部成像<sup>[4]</sup>,突破传统医学无法实现肺部动态成像的难题。

碱金属蒸汽激光器需窄线宽大功率半导体泵浦源,而大功率半导体激光器因发光元多、笑脸效应、时空相干性差等原因压窄难度很大<sup>[5-8]</sup>,目前仍处于研究阶段。此外光栅等元件参数直接影响外腔输出谱宽。文中构建外腔模型,理论分析并实验验证元件参数对外腔输出谱宽的影响。

## 1 外腔模型建立及模拟结果

外腔系统由激光器、光学准直系统和光栅构成。外腔压窄时入射光在快轴方向经光栅色散后将满足光栅方程特定波长的衍射光以被动方式种子注入激光器,从而实现谱宽压窄。小功率单发光元半导体激光器国内外都有成熟工业产品,但大功率线阵半导体激光器因制造工艺等原因导致发光元在衬底上弯曲状排列,呈笑脸状(笑脸效应,如图 1 所示)导致压窄难度变大。

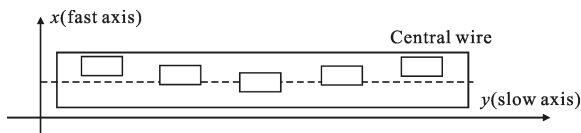


图 1 线阵半导体激光器笑脸效应

Fig.1 Smile effect of diode laser array

外腔输出谱宽公式为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = -\frac{\alpha^2}{2} - \beta \cot\theta$$

外腔输出谱宽  $\Delta\lambda$  与慢轴发散角  $\alpha^2$  和  $\beta$  成正比,为入射光与光栅法线夹角,参考文献[9]认为  $\beta$  为笑脸效应角度,而激光器笑脸效应无法改变,所以相关参考文献采用倒置柱面镜系统压窄慢轴发散角以窄化输出谱宽。但作者认为  $\beta$  应为快轴发散角,当

激光器有笑脸效应时  $\beta$  值会增大。具体分析如下:笑脸效应虽导致发光元在衬底上弯曲排列即不同发光元快轴位置略有差异,但考虑到第一各发光元长边都与光栅平行、宽边与光栅刻线垂直,第二慢轴发散角较小,快轴发散角较大,所以作者认为笑脸效应会同时增大激光器的快轴发散角和慢轴发散角,因为激光器慢轴发散角本身比较小,所以笑脸效应集中表现在对快轴发散角的拓宽,详见参考文献[10]。基于对输出谱宽公式的新理解,文中采用倒置球面镜系统同时准直激光器快慢轴发散角,期望使外腔输出谱宽更窄。外腔线阵半导体激光器每个发光元都与光栅组成独立外腔,总输出谱宽等于各个发光元输出谱宽之和,所以可用单发光元大功率半导体激光器代替线阵半导体激光器进行外腔实验,外腔模型如图 2 所示。

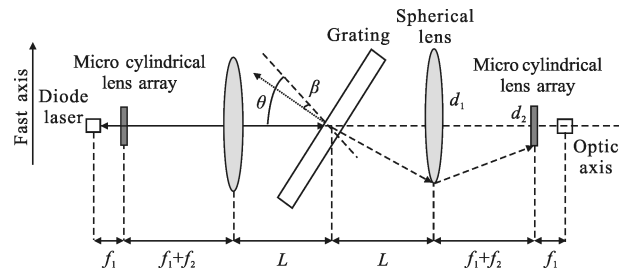


图 2 大功率半导体激光器窄线宽光学模型

Fig.2 External cavity optical model of high power diode laser output linewidth narrowed

模型将衍射光反向延伸,经球面镜在微柱透镜成像,只有像高小于微柱透镜通光孔径的衍射光才能回到激光器,从而压窄了激光器输出谱宽。模型中球面镜、微柱透镜阵列、光源以光栅为中心左右对称,微柱透镜阵列焦距  $f_1$ ,球面镜焦距  $f_2$ ,球面镜通光孔径半径  $d_1$ ,微柱透镜阵列通光孔径半径  $d_2$ ,设波长  $780.25\text{ nm}$  入射光与光栅法线夹角  $\theta$ ,波长  $780.25 + \Delta\lambda\text{ nm}$  衍射光与光栅法线夹角  $\beta$ ,根据光栅方程:

$$2d\sin\theta = 780.25 \quad (1)$$

$$d\sin\theta + d\sin\beta = 780.25 + \Delta\lambda \quad (2)$$

将  $780.25 + \Delta\lambda\text{ nm}$  衍射光沿相反方向延伸(图 2 虚线)经焦距  $f_1$  透镜后在微柱透镜上像高  $y$  为:

$$y = -(f_2 + f_1)\tan(\alpha - \beta) \quad (3)$$

当  $y \geq d_2$  时,波长  $780.25 + \Delta\lambda\text{ nm}$  以上衍射光将不能反馈回激光器,只有  $780.25\text{ nm}$  为中心,谱宽  $\Delta\lambda$  入射光才能反馈回激光器,导致外腔输出谱宽  $\Delta\lambda$ 。

根据公式(3)可模拟微柱透镜阵列通光孔径、光栅刻线、球面镜焦距不同时外腔输出谱宽。

(1) 设球面镜焦距 10 cm 时外腔输出谱宽与不同微柱透镜阵列焦距关系如图 3 所示。

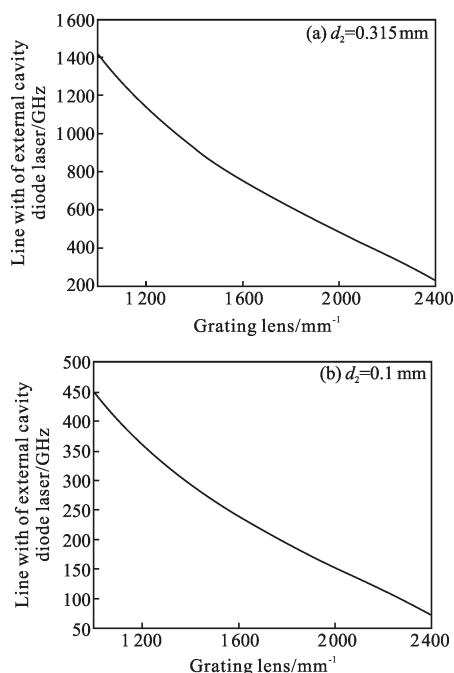


图 3 不同焦距微柱透镜外腔半导体激光器输出谱宽示意图

Fig.3 External cavity output linewidth of high power diode laser in different focal length micro cylindrical lens

由图 3 可见,微柱透镜阵列焦距越小,通光孔径越小,外腔输出谱宽越窄。当通光孔径相同时,光栅刻线越密,外腔输出谱宽越窄。

(2) 设微柱透镜阵列通光孔径为 0.315 mm 时,外腔输出谱宽与不同球面镜焦距关系如图 4 所示。

由图 4 知当光栅刻线、微柱透镜阵列焦距一定时,球面镜焦距越大,外腔输出谱宽越窄,这里没考虑快轴准直镜通光口径影响,是因为实际激光器快轴准直镜通光口径( $100 \mu\text{m}$ )远大于激光器发光元快轴长度( $1 \mu\text{m}$ ),当激光器选定后,孔径选模作用可忽略,所以作者认为此处输出谱宽压窄与快轴准直镜通光口径无关而只与球面镜焦距有关。外腔压窄实质是快轴种子被动注入,当微柱透镜阵列焦距一定时(其通光孔径也确定)球面镜焦距越大,被动注入种子越少,外腔输出谱宽越窄,此外根据参考文献[9]外腔半导体激光器输出谱宽公式,外腔输出谱宽与慢轴发散角平方倍、快轴发散角成正比,当球面镜焦距越大时准直效果越好,快慢轴发散角越小,从而外腔

输出谱宽越窄。

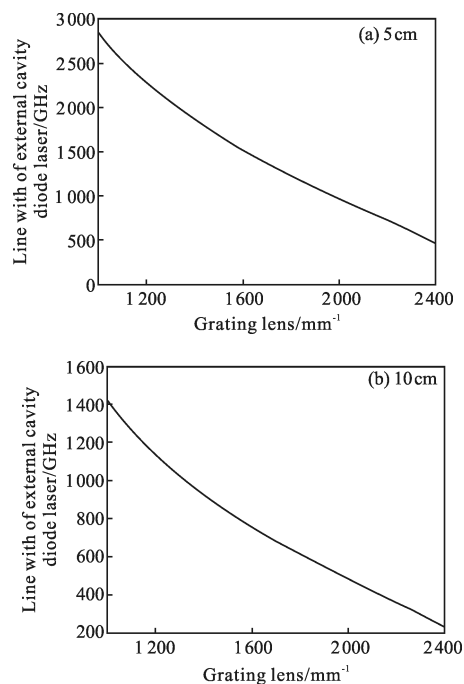


图 4 不同焦距球面镜外腔半导体激光器输出谱宽示意图

Fig.4 External cavity output linewidth of high power diode laser in different focal length spherical lens

## 2 外腔模型合理性分析

(1) 模型假设入射光  $780.25 \text{ nm}$  和  $780.25 + \Delta\lambda \text{ nm}$  以相同角度入射到光栅上,这点合理,因半导体激光器快轴出光面只有  $1 \mu\text{m}$ ,快轴输出光近衍射极限,  $M^2$  约等于 1。用软件可计算快轴输出光经过微柱透镜阵列后的准直距离,如图 5 所示。

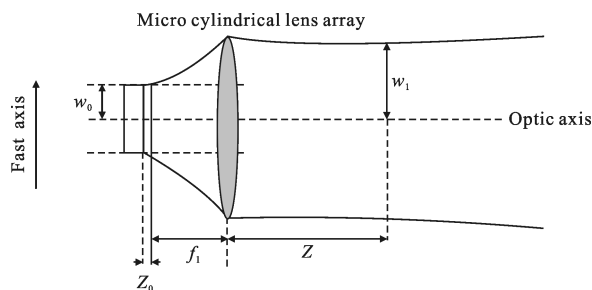


图 5 快轴输出光经过微柱透镜阵列之后的准直距离示意图

Fig.5 Collimator distance of fast axis output ray through micro cylindrical array

其中单宽面源半导体激光器快轴出射激光腰斑在快轴出光面上,腰斑半径为  $w_0 = 0.5 \mu\text{m}$ ,距离微柱透镜阵列距离等于微柱透镜焦距  $f_1 = 1 \text{ mm}$ ,假设出射

光波长为 780.25 nm,则未加微柱透镜阵列时,半导体激光器的准直距离等于:

$$Z_0=(\pi \times w_0^2)/\lambda \quad (4)$$

经计算  $Z_0=0.001$  mm,根据几何光学当快轴腰斑经过微柱透镜阵列后,其准直距离  $Z=99$  cm,如此长的准直距离可认为入射到球面镜的光是平行光,并且微柱透镜焦距越大,准直距离越大。

(2) 模型没考虑球面镜对入射光的影响,这是因为快轴出光面  $1 \mu\text{m}$ ,经扩束系统后仍远小于球面镜通光孔径,整个系统满足近轴光线条件。

(3) 外腔压窄时,光栅对不同偏振态入射光衍射效率不同,为获得最佳压窄效果,外腔中要放置半波片,模型中无半波片,是考虑到半波片通光孔径远大于入射光,不影响外腔模型,所以省略了,但外腔实验时,外腔中有半波片。

### 3 外腔实验结果及分析

实验采用 Littman 结构,实验器材有:20 W 单宽面源半导体激光器( $1 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ )、半波片、平面全息衍射光栅( $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ )、镀金反射镜尺寸( $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ )、焦距 50 mm 和 100 mm 两片球面镜、光谱仪。

实验结果如下:

(1) 球面镜焦距相同(50mm),光栅刻线不同(1 800 g/mm、2 400 g/mm),Littman 结构。2 400 g/mm 外腔输出谱宽为 20 GHz (0.04 nm),1 800 g/mm 外腔输出 30 GHz(0.06 nm),符合模型模拟结果。作者分析光栅刻线越密,光栅角色散能力越大,经光栅衍射后能被注入的波长越窄,导致外腔输出谱宽越窄。对特定波长光栅刻线上限可根据光栅方程中  $\sin\beta \leq 1$  推。

(2) 光栅刻线相同(2 400 g/mm),球面镜焦距不同(50 mm、100 mm),Littman 结构,实验结果 100 mm 平凸球面镜外腔输出谱宽 15 GHz (0.03 nm),50 mm 外腔输出谱宽 20 GHz(0.04 nm),符合模型模拟结果。作者分析球面镜焦距越大,快慢轴准直越好,快慢轴发散角对外腔输出影响越小,输出谱宽越窄。

(3) 理论上微柱透镜阵列焦距越小,外腔输出谱宽越窄,但实际中因激光器位于微柱透镜阵列焦距处,微柱透镜阵列焦距太小,会给实际操作带来很大难度,所以微柱透镜阵列焦距要适中。

### 4 结 论

文中沿光线传播方向建立外腔模型,通过理论分析、软件模拟和实验分析知道:大功率半导体激光器外腔输出谱宽与光栅参数(刻线、衍射效率)、光学系统参数(微柱透镜阵列焦距、球面镜焦距)密切相关。要获得最佳压窄效果宜选用刻线密度高的光栅和大焦距球面镜。

### 参考文献:

- [1] Zhu Qiang, Yu Jianhua, Quan Hongyan, et al. Theoretical analysis of high power diode laser pumped alkali vapor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S): 85-88. (in Chinese)
- [2] Ge Lun, Hua Weihong, Wang Hongyan, et al. Energy pooling process in rubidium vapor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 334-338. (in Chinese)
- [3] Weiback J Z. 28 W average power hydro carbon free rubidium diode pumped alkali laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1444-1450.
- [4] Nelson I A, Chann B. Spin exchange optical pumping using a frequency narrowed high power diode laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(11): 1356-1358.
- [5] Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing, et al. Linewidth narrowed, tunable laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 36(2): 751-755. (in Chinese)
- [6] Meng L S, Nizamov B, Madasamy P. High power 7GHz bandwidth external cavity diode laser array and its use in optically pumping singlet delta oxygen [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10469-10471.
- [7] Goodson B M, Whiting N. Preparation of laser polarized Xenon at high Xe densities and high resonant laser powers provided by volume holographic grating narrowed LDAs[C]// DAMOP, 2009.
- [8] Babcock E. Frequency narrowed diode array bar[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(15): 3098-3099.
- [9] Liu B, Liu Y. Linewidth reduction of a broad-area laser diode array in a compound external cavity [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(2): 365-370.
- [10] Li Yuandong, Wang Hongyan, Yang Zining, et al. Linewidth narrowing of high power diode laser for alkali vapor laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2301-2303. (in Chinese)