

光泵碱金属蒸气激光泵浦光源线宽压缩的分析

杨 静,潘佰良,王亚娟
(浙江大学物理系,浙江 杭州 310027)

摘要:分析了各种压缩光泵碱金属蒸气激光泵浦光源线宽的方法,包括在 Littrow 结构中使用全息光栅、体布拉格光栅和 F-P 标准具。分析各种方法的实验装置,比较其取得的成果和优缺点,指出优化方向,为求寻找到一种装置简单,压缩效果显著,同时将功率损耗降到最小的方法提供了指导。

关键词:近红外激光;线宽压缩;分析压缩方法;光栅;F-P 标准具

中图分类号:TN248.2 **文献标识码:**A

Analysis on compressing the line-width of the pump source of diode-pumped alkali (vapor) lasers

YANG Jing, PAN Bai-liang, WANG Ya-juan
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The approaches of compressing the line width of pump source of DPAL (diode-pumped alkali vapor lasers) have been analyzed in this paper, including employment of holographic grating, volume Bragg grating and Fabry-Perot etalon in the Littrow structure. The setup of different ways have been analyzed and their results, advantages and disadvantages have been compared, providing scientific guidance to looking for a method which has a simple setup, efficient reduction of the line-width and the least power loss.

Key words: near infrared laser; line-width reduction; analysis on methods of compressing the line-width; grating; F-P etalon

1 引言

DPAL (diode-pumped alkali vapor lasers) 是最近几年引起人们极大兴趣和快速发展的新型激光器件,兼有固体激光和气体激光的优点,有望获得具有高光束质量的高效高功率近红外激光输出。这些近红外激光在激光冷却、定向能量传输、材料处理和医疗磁共振成像、检测系统^[1]等方面有广泛的应用前景。

为获得高功率的 DPAL,需要高功率的半导体激光器泵浦,而商用近红外高功率激光二极管阵列的典型线宽为 1 THz,比碱金属原子的典型吸收线的 Doppler 展宽约 500 MHz 高出 3~4 个数量级。因此,如何使泵浦光源的线宽与碱金属原子吸收线的线宽相匹配,是实现高效高功率 DPAL 的关键问题。常用两种方法:在碱金属蒸气池中充入较高压

强的缓冲气体(乙烷和氦气混合气体)来增宽吸收线宽到 10 GHz 以上;利用激光选频技术有效压缩外腔式二极管激光的线宽至 10 GHz 量级。两种方法结合能达最优效果,即在蒸气池中充入一定压强的缓冲气体 He 和乙烷(作用分别是提供能量转移与使 D1, D2 线得到充分的碰撞加宽,使被激发到 D2 线上能级的粒子回落到激光上能级的速率远快于粒子的自发辐射速率 $3 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ^[2])同时压缩泵浦光源线宽。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10974176);浙江省自然科学基金项目(No. Y1090087)资助。

作者简介:杨 静(1986-),女,硕士,研究方向为光泵碱金属蒸气激光。E-mail: yangjing0410@zju.edu.cn

收稿日期:2010-11-23; **修订日期:**2010-12-17

用数字说明压缩线宽的重要性。对功率为 30 W, 线宽压缩到 65 GHz 的半导体激光器, 产生的泵浦速率为 $1.6 \times 10^6/s$ 。对于未经压缩的功率为 60 W, 线宽为 1000 GHz 的半导体激光器, 能够提供的泵浦速率只有 $2 \times 10^5/s$ 。也就是说上述压缩过线宽的半导体激光器(30 W)产生的泵浦速率相当于 400 W 未经压缩线宽的典型商用激光器提供的泵浦速率^[3]。可见压缩线宽对促进工作物质对泵浦光的有效吸收, 提高泵浦效率, 有着非常重要的意义。

本文重在分析各种压缩泵浦光源线宽的方法, 比较其取得的成果和优缺点, 力求寻找到一种装置简单, 压缩效果显著, 同时将功率损耗降到最小的方法。

2 泵浦光源线宽压缩的方法

注入锁定是压缩线宽的理想方法。根据注入方式区分有两种: 用相位共轭器进行相位共轭注入与用光栅、反射镜、标准具和透镜进行的直接注入。前者装置复杂昂贵, 且输出功率仅限在几百毫瓦, 后者装置简易经济, 所以一般用第二种方法, 即在 Littrow 结构中, 用带有波长选择的元件配以其他光学元件搭建一个外腔, 通过波长选择元件输出 LDA 的中心波长, 从而有效压缩泵浦光源线宽。波长选择元件, 可以是全息光栅、布拉格体光栅和 F-P 标准具等。

2.1 在光路中使用全息光栅

用到全息光栅的研究组有美国空军研究院的激光与光学研究中心 Zhdanov 带领的研究组^[4-7], Babcock^[3]、Talbot^[8] 分别带领的研究小组及其他科研组^[9]。

DABs(diode array bar) 中 bar 条的排列不是严格的直线。因为当激光二极管阵列在进行组合封装时由于二极管的材料和衬底的不同, 发光单元的排列会在一定程度上造成弯曲, 称为 smile 现象, 如图 1 所示。由于这个原因, 造成了每个发光单元发出的光照到光栅上时入射角度的不同。由光栅方程 $\lambda = 2 d \sin \theta$ 知, 入射角 θ 不同, 会造成光源线宽的增宽。

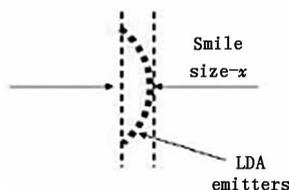


图1 LDA内发射极阵列分布示意图

基本实验装置^[5]如图 2 所示。其中 FAC 是快

轴准直柱透镜, telescope 用来扩束。激光入射方向与光栅的夹角由衍射光栅方程 $\lambda = 2 d \sin \theta$ 决定, d 是光栅常数, λ 是 LDA 的中心波长。准直了的输出光在光栅衍射, 第一级作为反馈来调谐波长, 降低线宽, 零级输出。

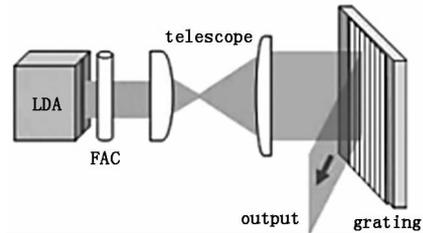


图2 外腔压缩 LDA 线宽

smile 效应带来的线宽增宽为 $\Delta \lambda = \lambda x \cot \theta / (M f_{\text{FAC}})$, 其中, x 是 smile 的大小, f_{FAC} 是快轴准直透镜的焦距, M 是 telescope 的放大倍率。由表达式 $\Delta \lambda = \lambda x \cot \theta / (M f_{\text{FAC}})$ 知道, 可以通过使用 smile 小的激光器, 同时使用放大倍数高的望远镜系统和焦距较长的长轴准直透镜来减小 smile 效应带来的线宽加宽。在试验中也确实是这么做的, 如图 2 中所用参数 $x = 1 \mu\text{m}$, $f_{\text{FAC}} = 9.7 \text{ mm}$, $M = 4$, 对 852 nm 波长的 LDA, smile 带来的线宽在 8 GHz 左右。

为调节反馈, 可加 1/2 玻片^[3], 如图 3 所示: 1/2 玻片将激光的偏振方向旋转 90° 使得反馈强度降到最小, 输出最大, 这样也保护了 LDA 不受伤害。

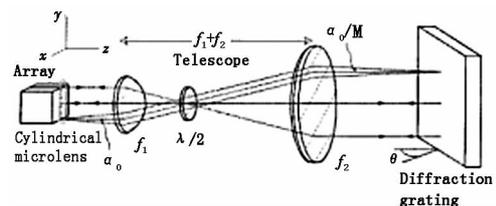


图3 加了 1/2 玻片的外腔压缩系统

同时, Talbot 等人提出了一种改进方法^[8], 如图 4 所示。

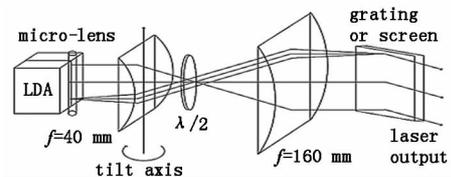


图4 一个透镜可绕图中所示的轴旋转的外腔

试验证明, 通过旋转透镜到最合适的角度^[8]中旋转 23° , 能够有效地减小 smile。由于光栅输出的光在空间很不对称, 可以通过一个光路将其耦合进蒸气池^[3]。

在外腔中使用全息光栅的压缩线宽方法适用于泵浦功率不高的情况, 随着功率的增加, 功率损耗也

增加。通过以下方法改进:优化腔的设计,进行光束整形准直,优化输出耦合,调节打到光栅上的光束使其大小与光栅大小吻合以避免光束的重叠等。

2.2 在光路中使用到体布拉格光栅

用 Littrow 结构与 VBG (Volume Bragg Grating) 相结合的外腔的研究组有:University of Central Florida, College of Optics and Photonics, Gourevitch 带领的研究小组^[10-14],以及其他研究组^[15-20]。使用体布拉格光栅压缩泵浦光源,特别是高功率泵浦光源线宽取得了非常好的结果。

将 VBG 作为二极管的外腔,在温度上下浮动 75 K 范围内,透射式 VBG 可使二极管激光器的频谱压缩到 200 pm,波长稳定在 500 pm 内;反射式 VBG 在超过 10 倍阈值温度内可将频谱压缩到 20 pm,波长稳定在 100 pm^[10]。

VBG 是在特殊光敏玻璃的一个方向上,通过激光全息技术,制作出折射率周期性调制的结构,当光波沿着该方向传输时,只有满足布拉格衍射条件的波长的光束,才会被选频反馈回 LDA 中。由于 VBG 这种对特定波长的角度选择性,使反射回去的光束发散角度远小于阵列沿慢轴方向的发散角,这样,便构成一个具有波长选择性质的外腔,即反馈回去的部分将在阵列后端面与 VBG 的前端面之间形成稳定的振荡实现波长的锁定。在外腔选频发射的作用下,激光器的输出波长就稳定在这一布拉格波长上。体布拉格光栅的滤波带宽由 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{2nd} = \frac{\Lambda}{d} = \frac{1}{N}$ 决定,其中, d 是光栅厚度; n 为折射率; λ 是布拉格波长; Λ 是光栅周期; N 是单元布拉格数目。

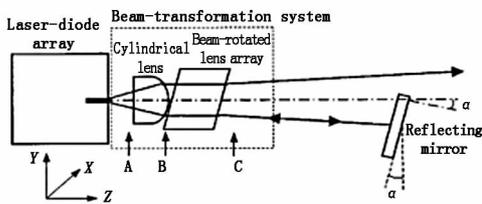


图5 离轴外腔装置

较早的离轴外腔装置^[20]如图 5 所示。将 VBG 在外腔离轴放置,作为端面镜,对满足布拉格条件的波长具有高的反射率,发光单元的前端面作为输出耦合端输出。VBG 放在激光器前,激光中的窄带部分被反射,这种自入射使 DLA 发射由 VBG 决定波长的激光,使激光器的输出波长稳定在 VBG 的布拉格波长上,从而压缩了线宽。光束变换系统由两部分组成:准直柱透镜,用来准直快轴光束;光束旋转

柱透镜组合,用来旋转空间快慢轴,避免光束重叠。光束转化系统带来的功率损耗小于 2.3%。

作为改进,Yujin Zheng 和 Hirofumi Kan 在离轴外腔装置中使用一对 VBGs^[16],如图 6 所示。两个体布拉格光栅作为输出耦合器,分别用来反馈光束的上下两部分。VBG1 和 VBG2 距 LDA 地距离分别为 7 mm 和 10 mm,而且两者的中心波长相差 0.25 nm,反射率分别为 45% 和 40%。通过调节离轴反射角 α ,使 LDA 输出的激光能够在 VBGs 中传播。光束变换系统带来的功率损耗为 5%。实验证明,使用一对体布拉格光栅明显提高了压缩效率。

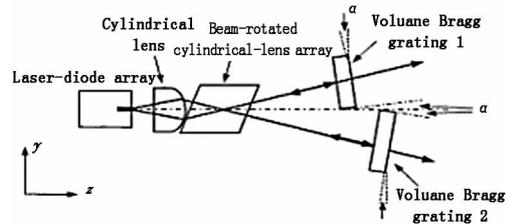


图6 使用两个 VBGs 的外腔装置

另一种试验装置^[15]如图 7 所示。FAC 为快轴准直透镜,VBG 单元组合在一起将一小部分光直接反馈回 LDA。增加 VBG 厚度^[11-14,18],能够进一步压缩线宽,如图 8 所示。

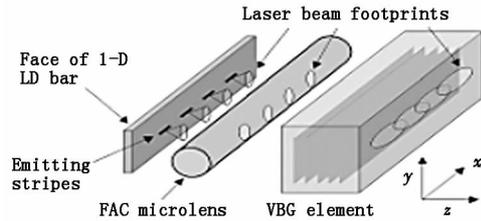


图7 使用 VBG 压缩线宽另一种装置

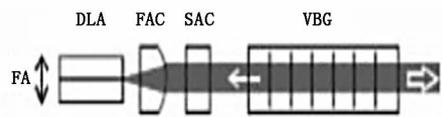


图8 采用加厚的体布拉格光栅压缩线宽

此装置首先将快轴慢轴准直,然后使用 14 mm 的 VBG,将 16 W 的 764 nm 半导体激光器线宽压缩到 7 GHz。之后,A. Gourevitch 等人用 17 mm,18 mm 厚的体布拉格光栅将更高功率的 780 nm 半导体激光器的线宽压缩到一个理想宽度。

用含有 VBG 的外腔来压缩泵浦光源线宽时,使用的 VBG 厚度从 0.8 ~ 18 mm,VBG 越厚,压缩效果越显著。使用厚体布拉格光栅,小 smile 的 LDA,在发光单元的前端涂上高质量的抗反膜,能够将线宽压缩到理想宽度,而且功率损耗相对较小,特别是对高功率的激光器。

2.3 在光路中使用 F-P 标准具

法布里-珀罗(F-P)标准具对不同波长的光束具有不同的透过率,可以用下式表示:

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}$$

其中, $F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}$ 为标准具的精细度; R 为标准具对光的反射率; d 为标准具的厚度(即两平行面的间隔); ϕ 是标准具中参与多光束干涉效应的相邻两出射光线的相位差,即: $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2nd \cos\alpha'$ 。式中, n 为标准介质的折射率; α' 为光束进入标准具后的折射角,一般很小 $\cos\alpha' \approx 1$ 。

R 取不同值时,透射率 $T(\nu)$ 与 ϕ 的变化曲线如图9所示。由图可以看出,标准具有反射率 R 越大,则透射曲线越窄,选择性就越好。F-P 标准具选纵模的优点在于标准具平行平面板间的厚度可以做得很薄,由于腔长没有缩短,输出功率仍可很大。

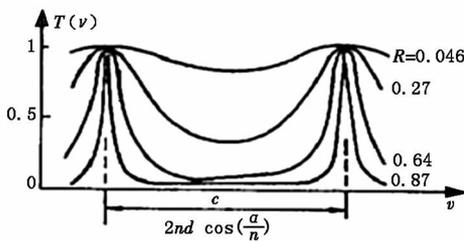


图9 F-P 标准具的透射率

用到 F-P 标准具压缩线宽的装置^[21]如图10所示。CL1, CL2 分别用来准直快慢轴, BS 反射一束弱光到光谱仪以观测纵模,反射标准具作为输出耦合。没有使用标准具时,能够压缩线宽但压缩效果不理想,而使用 140 μm 的标准具后, F-P 的反射光作为输出,线宽得到了很好的压缩。

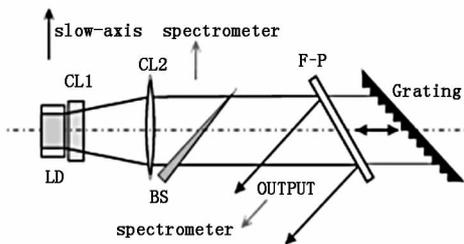


图10 使用 F-P 标准具压缩泵浦光源线宽的外腔

3 泵浦光源线宽压缩的成果

用到全息光栅的研究小组有美国空军研究院的激光与光学研究中心 Zhdanov 带领的研究组, Babcock、Talbot 分别带领的研究小组以及其他科研组。表1列举了他们取得的成果。

表1 在 Littrow 结构中使用全息光栅的压缩成果

方法	压缩后线宽/GHz	压缩倍数	压缩后功率/W	功率损耗/%	文献	备注
使用全息光栅	50	13	14	30	[9]	
	64	16	30	33	[3]	
	66	13	25	33	[8]	使用的 LDAsmile 大小为 7.6 μm
	11	90	10	83	[5]	使用的 LDA 的 smile 大小为 1 μm
	11	90	25	58	[4]	是上一项目的优化:加入了光束准直和光束整形系统,并且在 LDA 端面涂抗反膜

由表1可知,使用全息光栅能够使泵浦光源线宽和展宽了的碱金属原子吸收线很好的相匹配,从而有效地提高泵浦效率。另一方面,使用全息光栅的实验装置的功率损耗是很大的,如何减小功率损耗是以后需要努力的方向。

用到 VBG 的研究小组有 University of Central Florida, A. Gourevitch 带领的研究小组及其他研究组。表2列举了他们取得的成果。

表2 在 Littrow 结构中使用体布拉格光栅的压缩成果

方法	压缩后线宽	压缩倍数	压缩后功率/W	功率损耗/%	文献	备注
使用体布拉格光栅	0.2~0.4 nm	5~10	15~50	很小	[15]	
	0.2 nm	14	20	13	[16]	
	0.2 nm	10	1.5	97	[17]	
	13 pm	147	13.5	14	[18]	使用的 VBG 厚度为 14 mm
	14 pm	143	2	5	[11]	使用的 VBG 厚度为 17 mm
	30 pm	67	30	15	[12]	使用的 VBG 厚度为 18 mm
	20 pm	250	30	10	[13]	使用的 VBG 厚度为 18 mm
	20 pm	250	100	10	[14]	使用的 VBG 厚度为 18 mm

由表中数据知,使用 VBG 能够使泵浦光源线宽和展宽了的碱金属原子吸收线很好的相匹配,从而有效地提高泵浦效率,而且功率损耗相对较小,同时也能稳定输出波长。适用于压缩高功率的半导体激光器。

使用含有标准具的外腔的线宽压缩方法的文

献^[21]得到的结果是:将线宽从 2.2 nm 压缩到 70 pm,压缩了 31 倍,激光输出功率 2.3 W,44% 的功率损耗。近些年来研究人员很少有用到这种方法,用的方法基本上是在外腔中使用光栅。

4 探索更优的方法

在实验中可以尝试几种方法结合。使用 VBG 装置,功率损耗较小并且压缩效果比较显著,也可使用厚的 VBG 来压缩线宽,如果光栅不够厚,压缩效果不够理想的话,在光栅前加一个薄(几十至几百微米)的 F-P 标准具来更好的压缩线宽。如果使用含全息光栅的外腔,旋转 telescope 中的第一个透镜至最优角度来减小 smile 大小,同时通过在全息光栅前加入一个薄的 F-P 标准具来更好的压缩线宽。

5 结 论

本文分析了各种压缩泵浦光源线宽的方法,包括在 Littrow 结构中使用全息光栅、体布拉格光栅和 F-P 标准具,分析各种方法的实验装置,比较其取得的成果和优缺点,指出了优化方向,为求寻找到一种装置简单,压缩效果显著,同时将功率损耗降到最小的方法提供了指导。

参考文献:

- [1] Han Sumin, Wang Yuqing. Near infrared brain blood-oxygen noninvasively detecting technology[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 659 - 661.
韩素敏,王裕清. 近红外无损脑血氧检测技术[J]. *激光与红外*, 2008, 38(7): 659 - 661.
- [2] W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, et al. Resonance transition 795 nm rubidium laser[J]. *Optics Letter*, 2003, 28(23): 2336 - 2338.
- [3] E Babcock, B Chann, I A Nelson, et al. Frequency-narrowed diode array bar [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(15): 3098 - 3104.
- [4] B V Zhdanov, R J Knize. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser [J]. *Optics Letter*, 2007, 32(15): 2167 - 2169.
- [5] B V Zhdanov, T Ehrenreich, R J Knize. Narrowband external cavity laser diode array[J]. *Electronics Letter*, 2007, 43(4): 221 - 222.
- [6] B V Zhdanov, A Stooke, G Boyadjian, et al. Laser diode array pumped continuous wave Rubidium vapor laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 748 - 751.
- [7] B V Zhdanov, M K Shaffer, R J Knize. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(17): 14767 - 14770.
- [8] C L Talbot, M E J Friese, D Wang, et al. Linewidth reduction in a large-smile laser diode array [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(29): 6264 - 6268.
- [9] B Chann, I Nelson, T G Walker. Frequency-narrowed external-cavity diode-laser-array bar [J]. *Optics Letter*, 2000, 25(8): 1352 - 1354.
- [10] G B Venus, A Sevian, V I Smirnov, et al. High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback [J]. *Proc. SPIE*, 2005, 5711: 166 - 176.
- [11] A Gourevitch, G Venus, V Smirnov, et al. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser [J]. *Optics Letter*, 2007, 32(17): 2611 - 2613.
- [12] A Gourevitch, G Venus, V Smirnov, et al. High power volume Bragg laser bar for efficient pumping of alkali (Rb) lasers [J]. *OSA*, 2008.
- [13] A Gourevitch, G Venus, V Smirnov, et al. Continuous wave, 30 W laser-diode bar with 10 GHz linewidth for Rb laser pumping [J]. *Optics Letter*, 2008, 33(7): 702 - 704.
- [14] I Divliansky, V Smirnov, G Venus, et al. High-power semiconductor lasers for applications requiring GHz linewidth source [C]. *Proc. SPIE*, 2009: 7198.
- [15] B L Volodin, S V Dolgy, E D Melnik, et al. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multi-mode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. *Optics Letter*, 2004, 29(16): 1891 - 1893.
- [16] Y Zheng, H Kan. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique [J]. *Optics Letter*, 2005, 30(18): 2424 - 2426.
- [17] Y Wang, M Niigaki, H Fukuoka, et al. Approaches of output improvement for a cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled laser-diode-array [J]. *Physics Letter*, 2006, 360(2007): 659 - 663.
- [18] L S Meng, B Nizamov, P Madasamy, et al. High power 7-GHz bandwidth external-cavity diode laser array and its use in optically pumping singlet delta oxygen [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(22): 10469 - 10474.
- [19] A Jechow, V Raab, R Menzel, et al. 1 W tunable near diffraction limited light from a broad area laser diode in an external cavity with a line width of 1.7 MHz [J]. *Optics Communications*, 2007, 277(2007): 161 - 165.
- [20] Y Zheng, X Gao, H Miyajima, et al. Divergence-narrowed external-cavity broad-area laser-diode array [J]. *Applied Physics*, 2004, 95(11): 6489 - 6491.
- [21] F Wang, A Hermerschmidt, H Eichler. Narrow-bandwidth high-power output of a laser diode array with a simple external cavity [J]. *Optics Communications*, 2003, 218(2003): 135 - 139.