

# 用于抽运铯蒸气激光器的半导体激光器波长 稳定与线宽窄化研究

封建胜 袁 孝 熊宝星 高 帆 张 翔

(苏州大学现代光学技术研究所江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部/江苏省现代光学技术重点实验室,  
江苏 苏州 215006)

**摘要** 针对铯蒸气激光器对窄线宽与高稳定 852 nm 半导体激光抽运源的要求, 采用体布拉格(Bragg)光栅作为外腔输出镜, 研究了体 Bragg 光栅衍射效率对外腔半导体激光器输出光谱特性的影响。研究表明, 衍射效率为 24%、32% 与 37% 的体布拉格光栅均能够改善半导体激光器输出光谱特性; 输出光束中心波长锁定在 852 nm 附近, 输出线宽约为 0.26 nm; 外腔半导体激光器输出波长随抽运电流、温度的变化速率分别小于 10.4 pm/A、7.2 pm/°C, 优于自由运行半导体激光器; 随着光栅衍射效率增加, 全系统外腔效率从 91% 降低至 86%。

**关键词** 激光器; 波长稳定; 线宽窄化; 体布拉格光栅; 铯蒸气激光器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0514001

## Wavelength Stabilization and Linewidth Narrowing of Laser Diode for Pumping Cs Vapor Laser

Feng Jiansheng Yuan Xiao Xiong Baoxing Gao Fan Zhang Xiang

(Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province,

Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China,

Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** As referred to the laser diode with wavelength stabilization and linewidth narrowing required in pumping Cesium vapor lasers, volume Bragg gratings are employed as the external cavity output mirror and the effect of volume Bragg gratings with different diffraction efficiencies on output spectrum of external cavity laser diode is studied. It is demonstrated that the volume Bragg gratings with diffraction efficiencies of 24%, 32% and 37% can improve the laser's output spectrum apparently. The lasing central wavelength is locked at 852 nm, and the linewidth is narrowed to 0.26 nm. The output wavelength rates of pumping current and operating temperature are less than 10.4 pm/A and 7.2 pm/°C, respectively. With the increase of diffraction efficiency, the external cavity ratio of this system is reduced from 91% to 86%.

**Key words** lasers; wavelength stabilization; linewidth narrowing; volume Bragg grating; Cs vapor laser

**OCIS codes** 140.2020; 140.3425; 090.7330; 140.5560

## 1 引 言

碱(金属)蒸气激光器具有量子效率高、增益高、激光介质热性能好等优点, 以及在产生高功率输出

的同时保持良好的光束质量<sup>[1]</sup>, 在工业、医学、军事以及基础科学等领域有着广阔的应用前景。鉴于碱(金属)蒸气激光器的固有特性, 抽运源的光谱性能

收稿日期: 2013-11-05; 收到修改稿日期: 2014-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(91023009, 61275140)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ13\_0808, CXZZ12\_0813)

作者简介: 封建胜(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事微纳结构光学器件方面的研究。

E-mail: 20124039003@suda.edu.cn

导师简介: 袁 孝(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事纳米结构光学器件制备、光电材料与激光技术等方面的研究。E-mail: xyuan@suda.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zxiang@suda.edu.cn

直接决定了整个碱(金属)蒸气激光系统的效率与体积,传统的抽运方式有电极放电灯、染料激光器抽运以及固体激光器抽运等<sup>[2-5]</sup>,然而均存在效率低、体积庞大、或热管理复杂等不足。2005年,美国 Lawrence Livermore 国家实验室使用两个线宽为 2.0 nm 的半导体激光器作为抽运源,总功率为 50 W,首次实现了半导体抽运的碱(铷)蒸气激光器,输出功率约为 1 mW<sup>[6]</sup>,拉开了半导体抽运碱(金属)蒸气激光器的研究序幕。

半导体激光器插头效率高、体积小,有利于提高半导体抽运碱(金属)蒸气激光器的效率,减小其体积。然而,商品化的大功率半导体激光器线宽约为 2~4 nm,远大于碱金属原子的吸收线宽,且中心波长温度系数约为 0.3 nm/°C<sup>[7]</sup>,不利于反转粒子数的聚集。为了增强碱金属原子对抽运光的吸收,提高光光效率,必然要求稳定抽运源出射波长,且出射线宽匹配碱金属原子的吸收线宽。半导体激光器波长稳定和线宽窄化的方法主要有分布布拉格反射结构法<sup>[8]</sup>、饱和吸收光谱法<sup>[9]</sup>、注入锁定法<sup>[10]</sup>与外腔反馈法<sup>[11]</sup>等。分布布拉格反射半导体激光器工艺复杂,且商品化产品功率较低;饱和吸收光谱或注入锁定法需要稳定的外部锁频器件以及电子学反馈环路,结构复杂;外腔反馈法则相对简单,目前使用最广泛的两类外腔反馈输出镜为衍射光栅与体布拉格光栅(VBG),衍射光栅往往需要配合望远镜系统使用,不及体布拉格光栅简便,而且记录在光热敏折变玻璃<sup>[12]</sup>中的体布拉格光栅热稳定性好,布拉格波长的温度系数约为 0.01 nm/°C;光栅的衍射带宽与光栅周期成正比,与光栅厚度成反比,对于厚度 0.5~1 mm 的体布拉格光栅,其衍射带宽(半峰全宽)约为 0.2~0.4 nm;峰值衍射效率可在 20%~60%之间自由设计,采用体布拉格光栅作为外腔输出镜,利用其波长选择特性,可以锁定半导体激光器的振荡模式,将半导体激光器的输出波长稳定在布拉格波长附近,且输出波长随抽运电流或工作温度的变化速率小于自由运转时的情况<sup>[7]</sup>。因此在半导体抽运碱(金属)蒸气激光器中,越来越多使用体布拉格光栅优化抽运源的输出光谱特性<sup>[13-18]</sup>。

2006年,美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 Page 等<sup>[14]</sup>在利用多模半导体激光器抽运铷(金属)蒸气时,使用了体布拉格光栅稳定抽运源的输出光谱。2007年,美国中佛罗里达大学的 Gourevitch 等<sup>[15]</sup>在对铷(金属)蒸气进行抽运时实现了 95% 的吸收率,使用的抽运源是基于体布拉格光栅的外腔

半导体激光器,光栅衍射效率为 70%,衍射带宽为 0.03 nm。随后,美国中佛罗里达大学的 Glebov 等<sup>[16]</sup>将铷(金属)蒸气激光的半导体抽运源功率提高至 250 W,输出线宽约为 0.02 nm,采用的体布拉格光栅外腔输出镜衍射带宽约为 0.016~0.018 nm,衍射效率值未报道。

国内关于半导体抽运碱(金属)蒸气激光器的报道较少,主要研究机构有国防科技大学与中国科学院电子学研究所。2011年,王红岩等<sup>[17]</sup>实现了半导体抽运铷(金属)蒸气激光器出光,峰值功率为 600 mW,斜率效率为 1.7%,抽运源的外腔输出镜为体布拉格光栅,但是光栅衍射效率和衍射带宽均未报道。2013年,谭荣清等<sup>[18]</sup>在半导体抽运线偏振铷(金属)蒸气激光器中,使用体布拉格光栅作为抽运源的外腔输出镜,光栅衍射效率为 21%。

然而,国内外关于采用体布拉格光栅稳定半导体激光器输出光谱,并抽运碱(金属)蒸气的研究多见于铷(金属)蒸气激光器,铯蒸气激光器相关的研究较少<sup>[19-20]</sup>。而且,采用的体布拉格光栅衍射效率从 21%~70%均有报道,但是考虑到光栅的散射损耗随衍射效率增大而增大,研究外腔半导体激光器输出光谱特性随光栅衍射效率的变化,确定最佳的衍射效率,无论是对于优化外腔结构,还是指导体布拉格光栅的制备,均具有重要意义。基于此,采用 3 种不同衍射效率的体布拉格光栅,在中心波长为 852 nm 的半导体激光器上构建外腔,研究抽运电流和工作温度变化时的输出光谱以及外腔效率,为铯蒸气激光器的半导体激光抽运奠定基础。

## 2 实验原理及方案

### 2.1 实验原理

记录在光热敏折变玻璃中的体布拉格光栅具有可设计的衍射效率<sup>[12]</sup>以及良好的波长选择能力,当且仅当入射光满足体布拉格光栅的布拉格条件时才能被光栅衍射。

利用这一波长选择特性,将体布拉格光栅作为输出镜,构建外腔半导体激光器,当半导体激光器荧光光谱带宽内的众多纵模经过体布拉格光栅时,多数纵模因不满足布拉格条件而直接透射出腔外,无法形成振荡,而只有波长处于体布拉格光栅衍射带宽内的少数纵模能反馈回腔内,形成振荡,实现放大,当波长等于光栅的布拉格波长时反馈最强,如图 1 所示。作为外腔元件,体布拉格光栅的工作温度相对独立,与半导体激光器抽运电流或有源区温度无关,且体布拉格

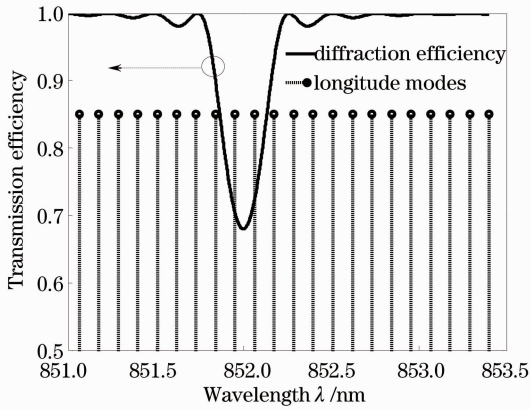


图1 体布拉格光栅对半导体激光器纵模的选择

Fig. 1 Selectivity of longitude modes of laser diodes with volume Bragg grating

光栅的热稳定性好<sup>[16]</sup>,因此,采用体布拉格光栅作为外腔输出镜,可锁定半导体激光器的工作波长,实现输出波长稳定以及输出线宽窄化。

体布拉格光栅的峰值衍射效率<sup>[21]</sup>为

$$\eta(\lambda) = \text{th}^2(\pi n_1 d / \lambda), \quad (1)$$

式中  $n_1$  为光栅的折射率调制幅度,  $d$  为光栅厚度,  $\lambda$  为布拉格波长,  $\text{th}$  为双曲正切函数。适当增大折射

表1 3块体布拉格光栅参数

Table 1 Parameters of three volume Bragg gratings

Number	Diffraction efficiency / %	Bragg wavelength / nm	Thickness / mm	Size / mm	Diffraction bandwidth* / nm
VBG-I	24	852.0	0.95	12×1.5	0.25
VBG-II	32	852.0	0.95	12×1.5	0.26
VBG-III	37	852.0	0.95	12×1.5	0.26

\*: 衍射带宽定义为体布拉格光栅波长选择性的半峰全宽(FWHM)。

实验装置如图2所示。半导体激光器固定在紫铜热沉上,使用占空比为30%的恒电流电源对其供电,采用半导体制冷片(TEC)稳定与调节工作温度,采用铂电阻温度探头对半导体激光器的工作温度进行探测,FAC紧贴半导体激光器放置,体布拉格光栅与FAC之间间距约为15 mm。为了定量对比体布拉格

率调制幅度或光栅厚度,可以获得更大的峰值衍射效率,即更大的外腔反馈。

由耦合波理论可知,体布拉格光栅的衍射效率取决于入射光波长相对布拉格波长的偏离,该偏离量由参量  $\xi$  描述

$$\xi = \frac{\pi d}{2n\Lambda^2} \cdot \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中  $\Lambda$  为光栅周期,  $n$  为光栅的平均折射率,  $\Delta\lambda$  为入射光波长与布拉格波长的差值。降低光栅厚度或增大光栅周期,可以获得更大的衍射带宽;若需要获得更小的衍射带宽、更好的波长选择能力,可增大光栅厚度或降低光栅周期。

## 2.2 实验方案

实验采用传导冷却的准连续半导体激光器(LD bar),具有19个发光单元、腔长为1 mm、中心波长为852 nm、占空比为30%、阈值电流为18 A,采用有效焦距为0.64 mm、数值孔径为0.8的非球面快轴准直镜(FAC)将半导体激光器快轴方向的发散角压缩到1°以内,而慢轴方向未做处理(发散角约为12°)。体布拉格光栅采用OptiGrate公司产品,3块体布拉格光栅的结构性能参数如表1所示。

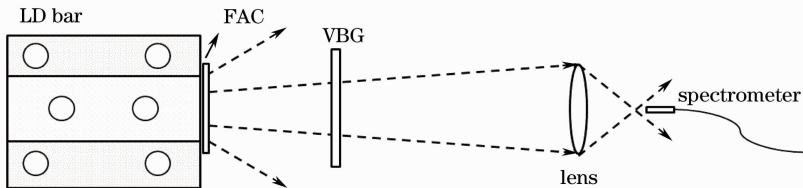


图2 基于体布拉格光栅的外腔半导体激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of LD bar with volume Bragg grating as external cavity output mirror

## 3 实验结果与分析

半导体激光器自由运转时的输出光谱特性如

图3所示。随着工作温度的增加,半导体激光器的输出光谱整体红移,波长温度系数为240 pm/°C;随

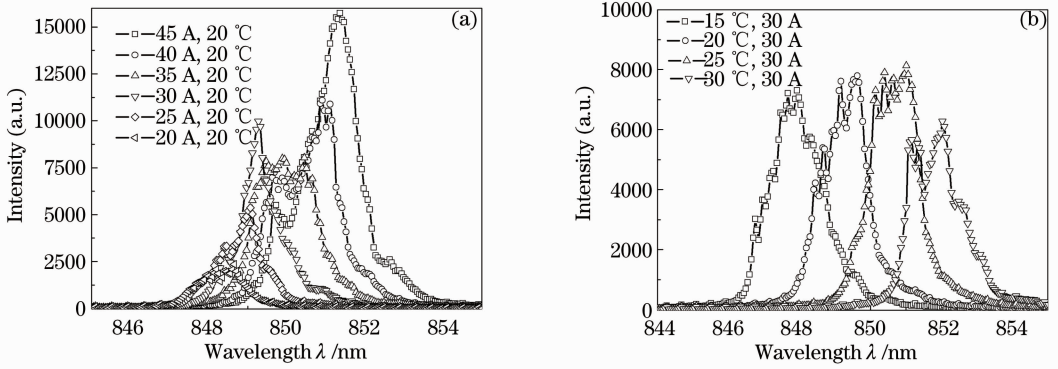


图 3 自由运行半导体激光器输出光谱。(a)不同抽运电流下的光谱;(b)不同工作温度下的光谱  
Fig. 3 Spectra of free running LD bar. (a) Spectra at different pumping currents; (b) spectra at different operating temperatures

着抽运电流的增加,输出功率增大的同时也伴随着光谱红移(速率为 120 pm/A);半导体激光器的输出光线宽约为 1.8 nm。

采用体布拉格光栅(VBG-1,衍射效率为 24%)构建的外腔半导体激光器输出光谱如图 4 所示。当半导体激光器工作温度保持在 20 °C、抽运电流从 20 A 逐步增加到 45 A 时,输出激光线宽相对自由运行时[图 3(a)]明显窄化,约为 0.6 nm,同时中心波长基本锁定在 852 nm 处,如图 4(a)所示。经体布

拉格光栅锁定后的半导体激光器输出光中心波长随着抽运电流增加仍有一定的移动。抽运电流为 20 A 时,输出光中心波长为 852.08 nm,线宽(FWHM)为 0.25 nm,与体布拉格光栅的衍射带宽相等;当抽运电流为 45 A 时,中心波长移至 852.34 nm,线宽略微增大至 0.29 nm。此时,中心波长随电流变化的速率约为 10.4 pm/A,如图 4(a)中的插图所示。值得注意的是,在 852 nm 主峰的左侧存在低峰值功率、大线宽的次峰,并随着抽运电流的增加而逐渐红移。

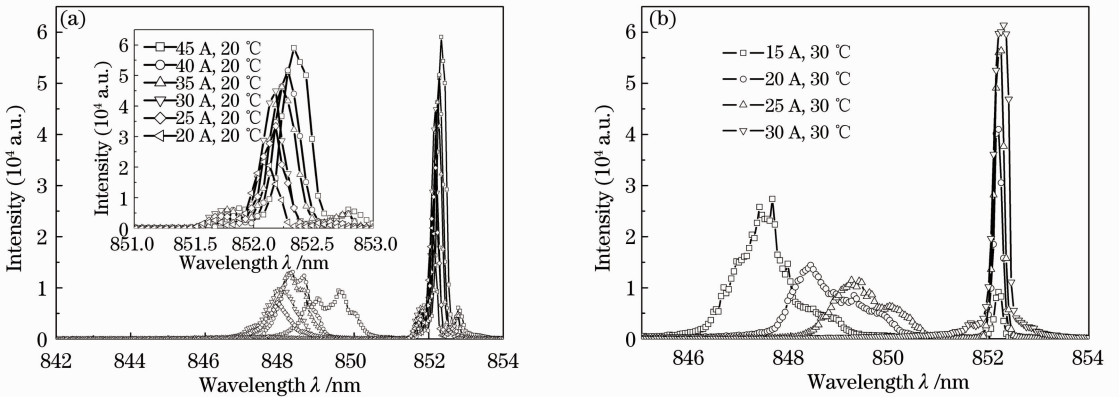


图 4 基于 VBG-I 的外腔半导体激光器输出光谱。(a)不同抽运电流下的光谱;(b)不同工作温度下的光谱  
Fig. 4 Spectra of external cavity LD bar based on VBG-I. (a) Spectra at different pumping currents; (b) spectra at different operating temperatures

抽运电流为 30 A 时,VBG-I 锁定后半导体激光器输出光频谱随工作温度的变化如图 4(b)所示。在工作温度从 15 °C 增加至 30 °C 的过程中,半导体激光器输出波长稳定在 852 nm 附近,温度系数约为 6 pm/°C。在 852 nm 处主峰的左侧,存在着低峰值功率、大线宽的次峰,随着工作温度的增加而红移,且次峰的高度逐渐降低。当工作温度为 30 °C 时,次峰几乎无法辨别,半导体激光器的输出光能量集中在 852 nm 处,但是此时 852 nm 处的光谱峰是

内腔模式与外腔模式出射光谱重叠的结果,整个峰的线宽(半峰全宽值)超出了体布拉格光栅的衍射带宽,线宽略有增加,约为 0.38 nm。

提高衍射效率至 32%,当抽运电流在 20~45 A 的范围内、或工作温度在 15 °C~30 °C 的范围内变化时,外腔半导体激光器输出波长被 VBG-II 锁定在 852 nm 附近,线宽小于 0.27 nm,中心波长随抽运电流变化的速率约为 5.2 pm/A,中心波长的温度系数为 7 pm/°C,如图 5 所示。相比衍射效率

24%时的情况(图4),852 nm处主峰左侧的次峰峰

值强度显著降低。

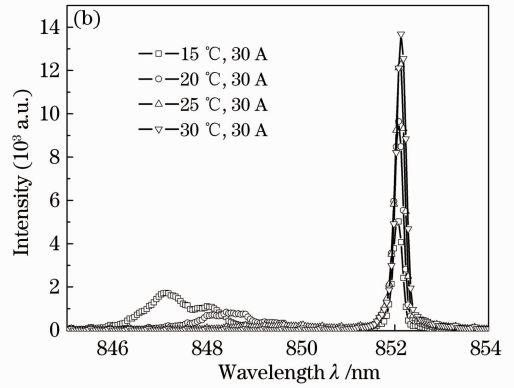
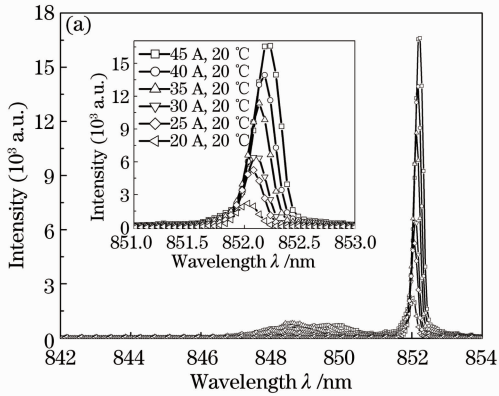


图5 基于 VBG-II 的外腔半导体激光器输出光谱。(a)不同抽运电流下的光谱;(b)不同工作温度下的光谱  
Fig. 5 Spectra of external cavity LD bar based on VBG-II. (a) Spectra at different pumping currents; (b) spectra at different operating temperatures

当衍射效率提高至 37%时,即采用体布拉格光栅 VBG-III 作为外腔输出镜,半导体激光器输出光谱随抽运电流、工作温度的变化分别如图 6(a)、(b)所示。半导体激光器输出波长仍被很好地锁定在 852 nm 附近,线宽小于 0.28 nm;输出波长随抽运

电流、工作温度的变化速率分别为 6 pm/A、6.7 pm/°C,与衍射效率 32%时的情形相仿;852 nm 处主峰左侧的次峰峰值强度进一步降低,且当抽运电流为 30 A,工作温度为 30 °C时,半导体激光器输出线宽也降低至 0.26 nm。

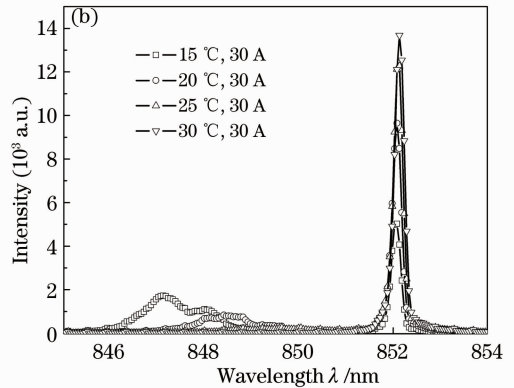
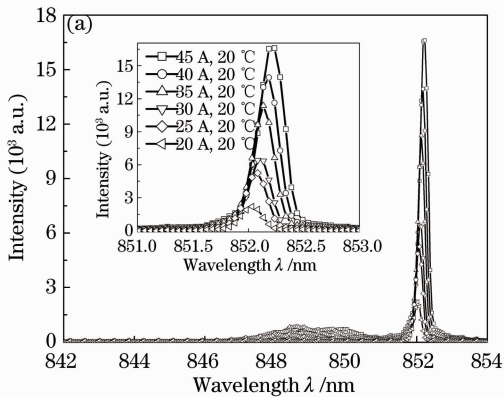


图6 基于 VBG-III 的外腔半导体激光器输出光谱。(a)不同抽运电流下的光谱;(b)不同工作温度下的光谱  
Fig. 6 Spectra of external cavity LD bar based on VBG-III. (a) Spectra at different pumping currents; (b) spectra at different operating temperatures

由上述实验结果可知,衍射效率为 24%、32%与 37%的 3 种体布拉格光栅均能够将半导体激光器输出中心波长锁定在布拉格波长(852 nm)处,且获得与体布拉格光栅衍射带宽大致相同的输出线宽;随着体布拉格光栅衍射效率的增加,输出光谱中 852 nm 主峰左侧的次峰峰值功率逐渐降低。

锁定后半半导体激光器输出光谱中的次峰来源于内腔振荡。在工作温度 20 °C、抽运电流 40 A 的条件下,自由运转半导体激光器的输出中心波长为 850.6 nm,线宽为 2.2 nm,如图 3(a)“—○—”所示,此时输出光仅仅源自内腔振荡;采用体布拉格光栅 VBG-III 锁定后,半导体激光器输出波长为 852.2 nm,

线宽窄化至 0.2 nm,如图 6(a)“—○—”所示,此时内腔振荡与外腔振荡同时存在。但是由于外腔高达 37%的反射率,外腔反馈占主导地位,内腔振荡的模式受到抑制,近 90%的能量转移到 852 nm 主峰处,只有远离 852 nm 主峰处存在小幅度的内腔振荡,且随着抽运电流增大或工作温度提高,内腔振荡模式整体向 852 nm 处接近,内腔振荡模式受到的抑制也越来越强烈,这也是图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)中随温度增加,次峰红移且峰值功率降低的原因所在。

当工作温度为 30 °C 时,次峰移至 852 nm 处,与主峰交叠,此时对内腔振荡模式的抑制作用最强,次峰几乎无法分辨。若工作温度继续提高,内腔振

荡又将与外腔振荡分离,即会在 852 nm 主峰的右侧出现大线宽的次峰,且次峰的峰值功率逐渐增大,而主峰的峰值功率逐渐降低,与图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)所示的趋势相反。究其原因,随着温度继续提高,内腔振荡对应的次峰与 852 nm 主峰之间距离逐渐增大,852 nm 处的增益系数迅速降低。

在相同工作温度、抽运电流环境下,外腔半导体激光器与自由运转半导体激光器的外腔效率实验结果如图 7 所示。当抽运电流为 40 A,随着体布拉格光栅衍射效率的增加,外腔效率逐渐降低,分别为 91%、88.5%与 86.6%。尽管较高衍射效率的体布拉格光栅有较好的波长稳定性以及线宽窄化能力,但是由于增加体布拉格光栅衍射效率将降低半导体激光器的外部微分量子效率<sup>[22]</sup>,造成整个激光系统效率的下降。因此在实际应用中,需要设计者对光束性能与效率进行折中考虑。

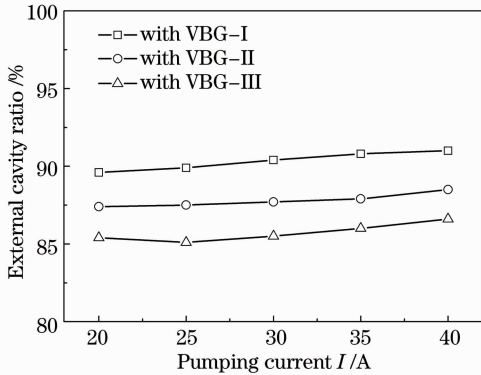


图 7 基于体布拉格光栅的外腔半导体激光器外腔效率

Fig. 7 External cavity efficiency of LD bar with volume Bragg grating

## 4 结 论

针对碱(铯)蒸气激光器抽运对半导体激光器窄线宽、高波长稳定性的要求,利用体布拉格光栅的波长选择性,分别采用衍射效率为 24%、32%与 37%的体布拉格光栅构建外腔半导体激光器,研究了体布拉格光栅衍射效率对半导体激光器输出光谱特性的影响。

衍射效率为 24%~37%的体布拉格光栅均能够有效地将半导体激光器的输出波长锁定在光栅的布拉格波长(852 nm)上、同时获得与光栅衍射带宽相当的输出线宽(约为 0.26 nm)。当体布拉格光栅的衍射效率分别为 24%、32%和 37%时,外腔半导体激光器输出中心波长随抽运电流的变化速率分别为 10.4、5.2、6 pm/A;输出中心波长的温度系数分

别为 6.0、7.3、6.7 pm/°C。

随着体布拉格光栅衍射效率的增加,外腔半导体激光器的输出波长稳定性逐渐提高,但当衍射效率高于 32%时,提升效果不明显。然而,提高光栅衍射效率将持续增强对半导体激光器内腔振荡模式的抑制作用,在更大的工作温度范围(15 °C~30 °C)内获得 0.26 nm 的理论输出线宽。

体布拉格光栅锁定的半导体激光器全系统外腔效率随光栅衍射效率的增加而降低。由于慢轴发散角造成的反馈损耗,当抽运电流为 40 A 时,体布拉格光栅衍射效率分别为 24%、32%与 37%所对应的外腔效率分别为 91%、88.5%与 86.6%。外腔效率的降低主要是由于半导体激光输出光束慢轴方向存在约 12°的发散角,引起反馈光损失,体布拉格光栅衍射效率越高,反馈光能量损失越大,导致外腔半导体激光器的外腔效率越低。可以预见,对慢轴方向进行准直将提高外腔半导体激光器的外腔效率。

值得一提的是,使用体布拉格光栅构建外腔半导体激光器,获得的窄化线宽约为 0.26 nm,仍小于铯蒸气激光在 852 nm 处的吸收线宽,但是由(2)式可知,适当增加体布拉格光栅的厚度,可以将光栅的衍射带宽降低至 0.02 nm,从而将外腔半导体激光器的输出线宽窄化至 0.02 nm,匹配铯蒸气激光在 852 nm 处的吸收峰线宽。

## 参 考 文 献

- 1 L Schawlow, C H Townes. Infrared and optical masers [J]. Phys Rev, 1958, 112(6): 1940-1949.
- 2 P Rabinowitz, S Jacobs, G Gould. Continuously optically pumped Cs laser [J]. Appl Opt, 1962, 1(4): 513-518.
- 3 A Sharma, N D Bhaskar, Y O Lu, *et al.*. Continuous-wave mirrorless lasing in optically pumped atomic Cs and Rb vapors [J]. Appl Phys Lett, 1981, 39(3): 209-211.
- 4 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser [J]. Opt Lett, 2003, 28(23): 2336-2338.
- 5 R J Beach, W F Krupke, V Keith Kanz, *et al.*. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling [J]. J Opt Soc Am B, 2004, 21(12): 2151-2163.
- 6 R H Page, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. First demonstration of a diode-pumped gas (alkali vapor) laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Optical Society of America, 2005. CMAA1.
- 7 B L Volodin, S V Dolgy, E D Melnik, *et al.*. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. Opt Lett, 2004, 29(16): 1891-1893.
- 8 T Ehrenreich, B Zhdanov, T Takekoshi, *et al.*. Diode pumped caesium laser [J]. Electron Lett, 2005, 41(7): 415-416.
- 9 Liu Tao, Lei Hongxiang, Yan Shubin, *et al.*. Third-harmonic locking of a diode laser to Cesium saturation absorption D2 line without frequency dither [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(10): 1181-1186.

- 刘涛, 雷宏香, 闫树斌, 等. 激光二极管相对于饱和吸收 D2 线的无调制扰动三次谐波锁频[J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1181-1186.
- 10 M Gertsyvolf, M Rosenbluh. Injection locking of a diode laser locked to a Zeeman frequency stabilized laser oscillator [J]. Opt Commun, 1999, 170(4-6): 269-274.
- 11 H Zhu, I C Ruset, F W Hersman. Spectrally narrowed external-cavity high-power stack of laser diode arrays [J]. Opt Lett, 2005, 30(11): 1342-1344.
- 12 Xiong Baoxing, Yuan Xiao, Zhang Xiang, *et al.*. Characteristics on the photo-thermal-refractive glass and volume Bragg gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0816001.
- 熊宝星, 袁孝, 张翔, 等. 光热敏折变玻璃及其 Bragg 体光栅特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0816001.
- 13 Yujin Zheng, Hirofumi Kan. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique [J]. Opt Lett, 2005, 30(18): 2424-2426.
- 14 R H Page, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser [J]. Opt Lett, 2006, 31(3): 353-355.
- 15 A Gourevitch, G Venus, V Smirnov, *et al.*. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser [J]. Opt Lett, 2007, 32(17): 2611-2613.
- 16 A Podvyaznyy, G Venus, V Smirnov, *et al.*. 250-W LD bar pump source with 10-GHz spectral width for rubidium vapor medium [C]. SPIE, 2010, 7686: 76860P.
- 17 Yang Zining, Wang Hongyan, Hua Weihong, *et al.*. Diode-pumped rubidium vapor laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2273-2274.
- 杨子宁, 王红岩, 华卫红, 等. 半导体抽运铷蒸气激光器国内首次出光[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2273-2274.
- 18 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, *et al.*. A linearly-polarized rubidium vapor laser pumped by a tunable laser diode array with an external cavity of a temperature-controlled volume Bragg grating [J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(3): 034202.
- 19 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, *et al.*. Laser diode with long external cavity of volume Bragg grating [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1102006.
- 李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 长腔长体布拉格光栅外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1102006.
- 20 You Wang, Minoru Niigaki, Hirotake Fukuoka, *et al.*. Approached of output improvement for a cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled laser-diode-array [J]. Phys Lett A, 2007, 360(4-5): 659-663.
- 21 Herwig Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2947.
- 22 Wang Hao, Yuan Xiao, Zhang Xiang, *et al.*. Influence of volume Bragg grating reflectivity on spectrum of external cavity laser diode array [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602004.
- 王浩, 袁孝, 张翔, 等. 体布拉格光栅反射率对外腔半导体激光阵列输出光谱的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602004.

栏目编辑: 宋梅梅