

窄线宽 776 nm 激光器的实现及对铷蒸气激光器影响

左磊 华卫红 杨子宁* 王红岩 许晓军

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)是具有潜力的新型高能激光光源,高功率抽运条件下,铷原子会发生电离,对激光器性能产生负面影响。铷原子主要电离通道之一是抽运光谱(中心波长 780 nm)和远翼 776 nm 成分引起的 $5S \rightarrow 5P \rightarrow 5D$ 的级联效应以及后续的光电离过程。为了定量测量铷 DPAL 电离度,需要搭建窄线宽 776 nm 高功率半导体光源以模拟 780 nm 抽运光的远翼光谱成分。基于 Littrow 结构实现了窄线宽 776 nm 半导体激光输出,激光线宽小于 0.15 nm,功率大于 10 W,外腔效率为 67%;利用该激光器进行了 780 nm 和 776 nm 级联抽运实验,观察到显著增强的荧光信号。

关键词 激光器; 碱金属蒸气激光器; 外腔半导体激光器; 窄线宽; Littrow

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.031402

Realization of Narrow Linewidth 776 nm Laser and Its Impact on Rubidium Vapor Lasers

Zuo Lei Hua Weihong Yang Zining Wang Hongyan Xu Xiaojun

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Diode-pumped alkali vapor laser (DPAL) is a candidate in high power laser field. Under conditions of high-power pumping, ionization process will occur in DPAL's gain medium, which has a negative impact on laser performance. One of the main rubidium atomic ionization channel is cascaded effect ($5S \rightarrow 5P \rightarrow 5D$) induced by the 776 nm far wing spectral component of the 780 nm diode pump source. In order to quantitatively measure the degree of ionization of rubidium DPAL, frequency-narrowed 776 nm high power semiconductor light source is needed to simulate the far wing of 780 nm pump light. Based on Littrow configuration, a line-narrowed 776 nm semiconductor laser output is realized, with spectral linewidth of less than 0.15 nm, output power of more than 10 W, and external cavity efficiency of 67%. By using 780 nm and 776 nm cascade pumping, a significant enhancement of fluorescence signal has been observed.

Key words lasers; alkali vapor laser; external cavity semiconductor laser; narrow linewidth; Littrow

OCIS codes 140.1340; 140.5960; 300.6210; 140.3290

1 引言

半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)兼具固体和气体激光的优势,具有高量子效率、气体介质循环使用流动散热、近红外原子谱线大气透过性好、轻质紧凑等特点,具有潜在的单口径高功率定标放大能力,近年来得到广泛关注和大力发展^[1-3]。碱金属原子核外只有一个价电子,距离电离阈值只有 4 eV,这个价电子很容易通过光电离或者碰撞电离过程激发,从而达到电离态。理论分析认为光致电离是主要的电离通道之一。

美国空军军官学院的 Knize 等^[4]通过理论分析指出,铷 DPAL 中的光电离效应会导致铷原子浓度的降低从而在很大程度上影响铷 DPAL 的性能。由于现阶段高功率半导体激光器的稳频和线宽压窄技术的限制,

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-05; 网络出版日期: 2015-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(0901070212002)

作者简介: 左磊(1991—),男,硕士研究生,主要从事碱金属激光器方面的研究。E-mail: zahyhs@163.com

导师简介: 华卫红(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: rosehua@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: diablo_3rd@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

在大功率抽运条件下抽运光的远翼会出现 776 nm 成分。而铷原子中光电离效应的通道之一是 780 nm ($5S \rightarrow 5P$)和 776 nm ($5P \rightarrow 5D$)的级联效应光激发过程以及后续的光电离过程。为了研究该级联效应和后续的光电离过程对铷 DPAL 电离度的影响,需要模拟高功率 780 nm 半导体激光器的远翼光谱成分(776 nm),因此搭建窄线宽 776 nm 半导体光源具有重要意义。

目前,对于半导体激光器线宽压窄,业界主要采用的是外腔法^[5-7]。外腔法是指在激光器腔外插入平面衍射光栅、棱镜、F-P 标准具、体布拉格光栅等色散元件。外腔压窄实质是利用色散元件的角色散性,使特定波长反馈回半导体激光器的有源区,特定波长的纵模优先起振达到饱和状态,导致半导体激光器增益曲线的下降,抑制其他纵模模式,从而使线宽压窄。本文基于平面光栅压窄大功率半导体激光器输出线宽。

2 实验装置

相比于 Littman 结构,Littrow 结构具有更高的外腔效率。虽然 Littman 结构能够实现更窄的光谱线宽^[8],但考虑到用于模拟高功率 780 nm 半导体激光器的 776 nm 远翼光谱成分,Littrow 结构可以实现的光谱线宽能够满足实验需求,因此本文采用 Littrow 外腔结构。

实验装置如图 1 所示,所用激光器为 19 发光源单 bar 条 CS 封装传导冷却线阵半导体激光器(LDA),最大驱动电流为 50 A 条件下输出功率为 50 W,此时中心波长约为 779 nm,经过慢轴(SA)准直透镜(SAC, $f=6$ cm)准直后,光斑尺寸约为 10 mm×5 mm(95%功率内);衍射光栅(2400 line/mm,光栅刻线越密,外腔输出谱线越窄^[9])刻线与激光器快轴(FA)方向平行,半导体激光入射至光栅后的一级衍射光被反馈回到激光器形成外腔,0 级光被反射作为使用激光的输出,微调光栅的转角能使反馈光的中心波长发生变化,从而改变激光器的谐振波长;半波片用于调节入射至衍射光栅的激光偏振态,以取得光谱压窄效果和输出功率之间的最优平衡,不同偏振态下衍射光栅的衍射效率如图 2 所示。

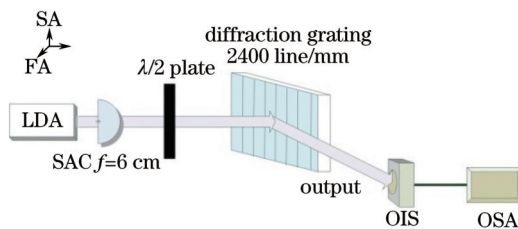


图 1 Littrow 结构 LDA 外腔实验原理图

Fig.1 Experimental schematic for Littrow structure LDA with external cavity

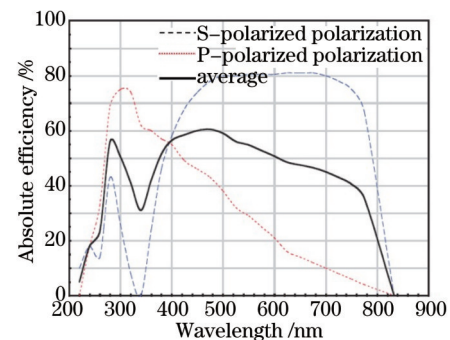


图 2 绝对衍射效率曲线

Fig.2 Curve of absolute efficiency

输出激光入射至积分球(OIS),以探测不同发光源输出激光的总体光谱强度分布,光谱测量采用傅里叶光谱仪(OSA, 86142B, Agilent)进行检测,并使用功率计进行功率检测。

3 实验结果及分析

图 3 为在驱动电流为 20 A 时激光器的自由运转以及外腔压窄光谱图。可以看出,通过添加外腔结构,对半导体激光器自由运转条件下光谱[半峰全宽(FWHM)约为 2.5 nm]实现了有效的压窄,压窄后的光谱宽度约为 0.13 nm。需要指出的是,进一步增加激光器电流,激光器的自由光谱范围将向长波方向漂移,导致压窄光谱的边模抑制比出现显著下降。

自由运转以及外腔结构下的输出功率如图 4 所示。可以看出,添加外腔后,输出功率有所下降;在驱动电流 $I=20$ A 时,外腔输出功率为 10 W,外腔效率达到 67%。

图 5 给出了外腔锁定条件下输出光谱随电流的漂移特性。此时,光谱的电流漂移系数为 0.06 nm/A,小于自由运转条件下的 0.3 nm/A,体现了外腔结构的稳频效果。

在工作电流 20 A 下,手动对光栅进行小角度的旋转,实现了激光的输出波长调谐。从图 6 中可以看出,

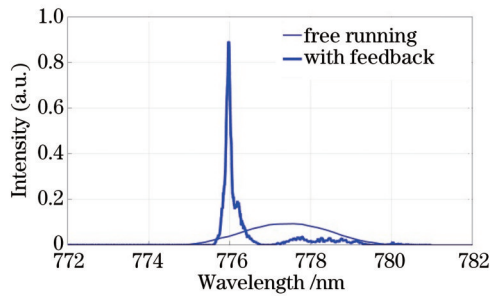


图3 线宽压窄和自由运转 LDA 光谱图

Fig.3 Spectra for the spectral narrowed and free-running LDA

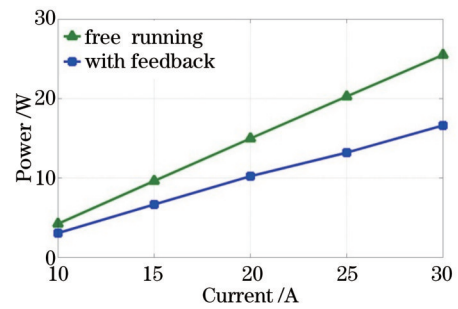


图4 自由运转与线宽压窄条件下 LDA 输出功率随驱动电流的变化曲线

Fig.4 Output powers of spectral narrowed and free-running LDA versus driving current

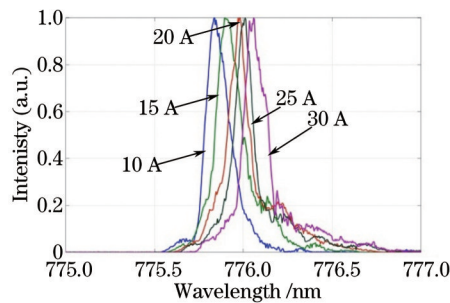


图5 外腔锁定条件下驱动电流对输出光谱的影响

Fig.5 Influence of driving current on output spectrum with external cavity lock

在边模抑制比较好的情况下,通过光栅的旋转可以实现约 5 nm 的调谐范围,覆盖了铷 DPAL 级联效应所需的抽运波长(776 nm)。同时,结合自由运转光谱位置以及压窄光谱在调谐过程中的强度分布特征,可以得到以下结论,即只有当外腔谐振波长位于自由运转光谱范围内时才能取得最佳光谱压窄效果以及最大输出功率。因此在不影响半导体激光器使用寿命的前提下,本文通过调节水温(20 ℃)尽量使激光器在 20 A 下的自由运转光谱位于 776 nm 附近,以实现激光输出的最佳压窄效果。

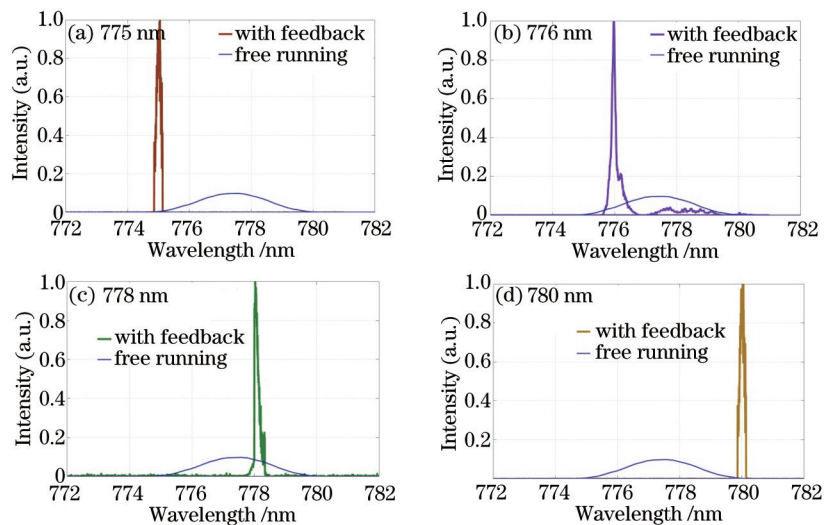


图6 光栅旋转时的调谐特性

Fig.6 Tuning properties of rotating grating

4 铷池吸收荧光验证实验

为了检验 776 nm 半导体激光对在 780 nm 抽运条件下铷池的级联激发效应,在 120 W 的 780 nm(FWHM 约为 0.1 nm)抽运条件下添加 10 W 的 776 nm 抽运光,其中铷池长为 40 mm,直径为 20 mm,充入 66661 Pa 的氩

气,加热温度为 140 ℃,结果如图 7 所示。从图 7 可以明显看出,在 780 nm 和 776 nm 级联抽运条件下铷池荧光得到显著加强,图 7(a1)、(b1)为实验中所观察到的现象,图 7(a2)、(b2)为荧光光谱仪测量得出的结果,光谱分析指出由于 776 nm 引起的级联光激发效应 $5S \rightarrow 5P \rightarrow 5D$,导致蓝紫色荧光(约 420 nm 成分^[10])得到显著加强(5D 能级弛豫到 6P 后产生的 $6P \rightarrow 5S$ 荧光成分)。对于这些高能级效应和电离过程将继续深入开展研究。

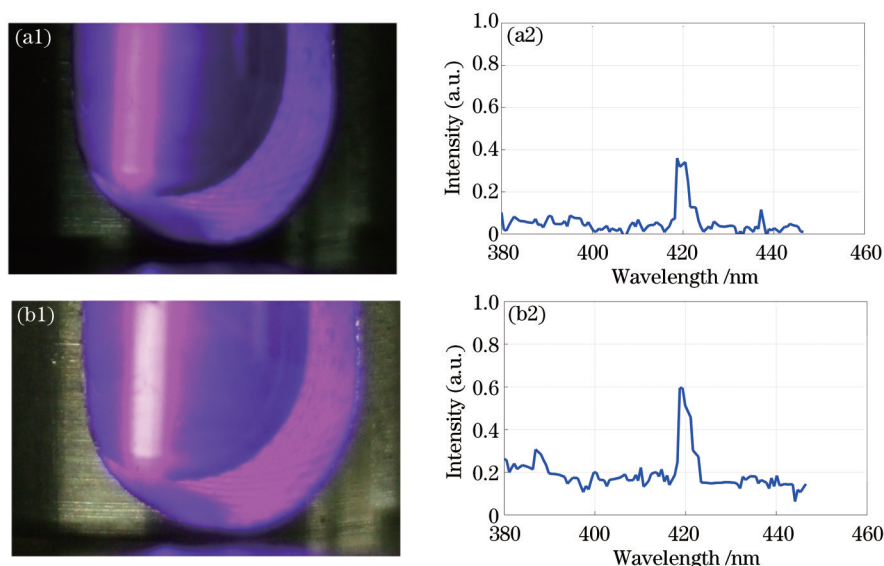


图 7 铷池荧光实验。(a) 单独 780 nm 抽运; (b) 780 nm 和 776 nm 抽运

Fig.7 Fluorescence experiment results on Rb cell. (a) Only 780 nm pumped; (b) pumped with 780 nm and 776 nm

5 结 论

基于面 Littrow 外腔结构实现了 776 nm 窄线宽半导体激光输出,光谱线宽为 0.13 nm,输出功率为 10 W,外腔效率为 67%;该激光器能够应用于铷 DPAL 光电离效应的研究实验,在 780 nm 和 776 nm 的级联抽运过程中观察到显著增强的荧光信号。

参 考 文 献

- 1 W Krupke. Diode-pumped alkali lasers aim for single-aperture power scaling[OL]. SPIE Newsroom, Lasers and Sources 2008. [2014-12-23]. <http://spie.org/x31447.xml?ArticleID=x31447>.
- 2 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5): 051405.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(5): 051405.
- 3 Que Yiqin, Wang Hongyan, Yang Zining, *et al.*. Measurement of alkali concentration in diode pumped alkali vapor lasers by 100 GHz spectral scanning[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0515001.
阙义钦, 王红岩, 杨子宁, 等. 100 GHz 光谱扫描测量碱金属蒸气激光器增益介质浓度[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0515001.
- 4 R J Knize, B V Zhdanov, M K Shaffer. Photoionization in alkali lasers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7894-7902.
- 5 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing. Linewidth reduction of a laser diode array using an external cavity with two feedback mirrors[J]. *Chinese Physics Letter*, 2007, 25(9): 2587-2589.
- 6 E Babcock, B Chann, I A Nelson, *et al.*. Frequency-narrowed diode array bar[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(15): 3098-3104.
- 7 Li Yuandong, Hua Weihong, Wang Hongyan, *et al.*. Research development of linewidth narrowing of high power diode lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 091405.
李元栋, 华卫红, 王红岩, 等. 谱宽压窄大功率半导体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 091405.
- 8 M G Littman, H J Metcalf. Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(14): 2224-2227.
- 9 R Wyatt. Spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers with strong, frequency-selective feedback[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(15): 658-659.
- 10 Tan Yannan, Li Yimin, Gong Faquan, *et al.*. 420 nm alkali blue laser based on two-photon absorption[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002011.
谭彦楠, 李义民, 公发全, 等. 双光子吸收 420 nm 碱金属蒸气蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002011.

栏目编辑: 史 敏