

# 半导体抽运铷蒸气输出 2.8 W 线偏振铷激光

徐程<sup>1,2</sup> 谭荣清<sup>1</sup> 李志永<sup>1,2</sup> 李琳<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院电子学研究所高功率气体激光技术部, 北京 100190; <sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)是一种具有广阔应用前景的激光器,近年来发展迅速。使用碱金属铷所需要的中心波长为 780 nm 的半导体激光器线阵作抽运源,采用平面衍射光栅搭建 Littrow 外腔将线宽压窄至 0.13 nm,并使用斩波器将半导体激光变为脉冲输出形式。采用透镜组合对窄线宽半导体激光进行光束扭转整形,整形后光斑近似为方形。半导体激光经线宽压窄和光束整形后,被聚焦进铷蒸气泡,泡内充入 79 kPa 甲烷作为缓冲气体。控制铷蒸气泡温度为 145 °C,注入谐振腔的抽运光峰值功率为最高 13 W 时,获得了峰值功率 2.8 W 的线偏振铷激光输出,光-光转换效率达 21%。

**关键词** 激光器;半导体抽运碱金属蒸气激光器;铷激光;Littrow 外腔

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0102009

## 2.8 W Linearly Polarized Output of Rubidium Vapor Laser with Diode Pumping

Xu Cheng<sup>1,2</sup> Tan Rongqing<sup>1</sup> Li Zhiyong<sup>1,2</sup> Li Lin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China  
<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Diode pumped alkali vapor laser (DPAL) has applications in many areas and is developed rapidly in recent years. A diode laser array with center wavelength of 780 nm is used as the pump source for the Rb laser, and a Littrow external cavity is built with a plane diffraction grating to narrow the linewidth of the diode laser to 0.13 nm. A chopper is used to change the continuous diode laser to pulsed laser. The diode laser is beam shaped, a lens group is used to twist the beam to nearly square shape. After linewidth narrowing and beam shaping, the diode laser is focused on a Rb vapor cell which is filled with Methane as buffer gas at the pressure of 79 kPa. With the maximum peak power of 13 W injected into the Rb laser resonator and the temperature of the cell kept at about 145 °C, the linearly polarized Rb laser with peak power of 2.8 W is obtained, and the optical to optical efficiency is 21%.

**Key words** lasers; diode pumped alkali vapor laser; rubidium laser; Littrow external cavity

**OCIS codes** 140.3480; 140.1340; 140.3300; 050.1950

## 1 引 言

半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)是一种应用前景广阔的新型激光器,常用作激光物质的碱金属有钾、铷、铯。2003 年美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室使用掺钛蓝宝石激光器替代半导体激光器作为抽运源开展原理实验研究,获得了铷激光输

出<sup>[1]</sup>,2005 年该实验室实现了基于半导体抽运源的铷激光输出<sup>[2]</sup>。之后国际上各研究单位相继报道了 DPAL 的实验研究并获得了快速进展,比如日本相关的实验研究<sup>[3,4]</sup>获得了 12 W 的铯激光输出;美国空军学院最高获得了 17 W 的铷激光<sup>[5]</sup>和 48 W 的铯激光输出<sup>[6]</sup>,铯激光最高光-光转换效率为 49%,

**收稿日期**: 2012-09-13; **收到修改稿日期**: 2012-10-20

**作者简介**: 徐程(1987—),男,博士研究生,主要从事半导体抽运碱金属蒸气激光器方面的研究。

E-mail: xucheng0104@sina.com

**导师简介**: 谭荣清(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事气体激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: rongqingtan@163.com

并采用侧面抽运方式获得了最高 31 W 的铯激光<sup>[7,8]</sup>。近年来 DPAL 的实验研究逐渐向高功率发展,2010 年美国通用原子公司获得了 207 W 的铯激光输出<sup>[9]</sup>,光-光转换效率接近 10%;有报道称 2011 年俄罗斯实现了近千瓦的铯激光输出<sup>[10]</sup>。国内对 DPAL 的实验研究起步较晚,2011 年国防科学技术大学实现了出光<sup>[11]</sup>,输出铯激光功率为 600 mW,斜率效率为 1.7%;2012 年中国科学院电子所获得了功率 17.5 mW 的基模铯激光输出<sup>[12]</sup>,光-光转换效率约 1%,在这一实验基础上,使用更高功率的半导体激光器作抽运源,改进抽运源的线宽压窄系统和光束整形系统,研究并优化了抽运光与谐振腔的模式匹配,实验中获得了 2.8 W 的线偏振铯激光输出,光-光转换效率为 21%,斜率效率为 32%。

## 2 实验装置

实验中的半导体激光器线阵(LDA)中心波长

为 780 nm 左右,有 19 个发光单元,采用微通道水冷结构,加载驱动电流为 55 A 时输出最大功率 60 W。分别用快轴准直镜(FAC)和慢轴准直镜(SAC)对激光器准直,激光器为连续激励,使用斩波器将其变为脉宽 1 ms,重复频率 100 Hz 的重复脉冲形式。采用焦距为 40 mm 和 200 mm 的圆透镜组扩束,再用 2400 line/mm 的平面全息衍射光栅搭建 Littrow 外腔压窄线宽,外腔输出的窄线宽半导体激光进入光束整形系统,线形的光斑被扭转为近似方形。用焦距为 75 mm 的双胶合透镜对半导体激光聚焦,光束经偏振分光棱镜(PBS)反射后进入长约 7 mm 的铯蒸气玻璃泡,焦点位于泡体中心附近,铯泡充入 79 kPa 的甲烷作为缓冲气体。抽运光相对于 PBS 为 s 偏振,铯激光为 p 偏振。谐振腔为腔长约 105 mm 的稳定腔,输出镜为平面镜,全反镜为球面镜,曲率半径  $R_{oc}$  为 200 mm。整体实验装置如图 1 所示。

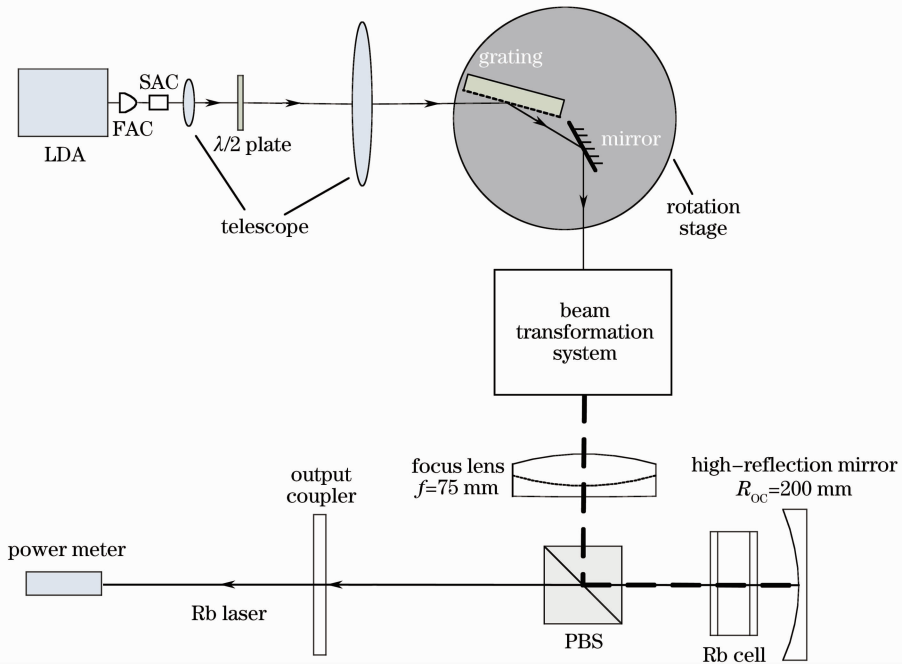


图 1 激光器系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of laser system

## 3 实验结果

### 3.1 线宽压窄和光束整形

实验系统的铯蒸气室对抽运光的吸收线宽较窄,需要压窄半导体激光线宽以提高蒸气室对抽运光的吸收率。使用平面光栅压窄线宽是较常用的方法<sup>[13~15]</sup>,使用平面全息光栅搭建 Littrow 外腔将 LDA 输出激光线宽从自由运转时的约 2.5 nm 压窄

至 0.13 nm,测量线宽时均采用分光片对 LDA 所有发光单元采样,再聚焦进积分球,最后进入光纤光谱仪测量光谱。图 2 是线宽压窄前后光谱对比图。

实验中需旋转半波片将平面光栅的一级衍射效率调节至 25% 左右,在光栅旋转台上安放一反射镜以保证调节窄线宽激光中心波长时输出光传播方向不变。由于除光栅一级衍射的损失外还有各透镜以

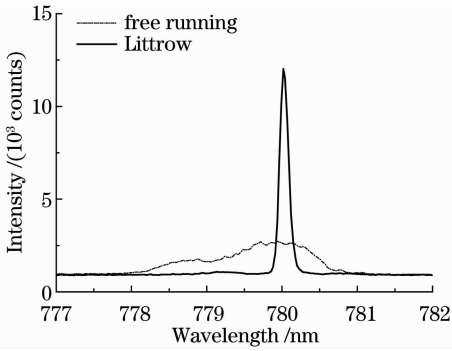


图 2 线宽压窄前后的 LDA 光谱图

Fig. 2 Spectra of LDA before and after linewidth narrowing

及反射镜的镜面损失,窄线宽半导体激光经反射镜后的输出功率约降为自由运转时功率的 62%。图 3 是 Littrow 外腔获得的窄线宽激光的输出功率和自由运转时功率随电流的变化。

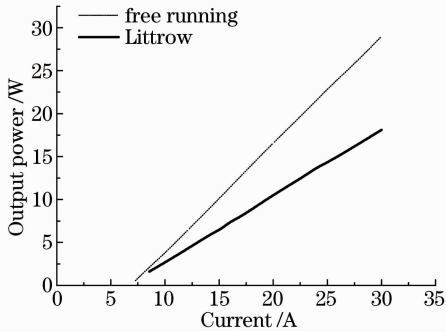


图 3 线宽压窄前后 LDA 输出功率随电流变化

Fig. 3 Output power of LDA versus current before and after linewidth narrowing

半导体线阵激光经压窄线宽后进入光束整形系统,整形方案为先用透镜组调节半导体激光快慢轴方向的束腰位置和瑞利长度,再用柱透镜组进行光束扭转,扭转后的光束截面光斑接近方形,在原半导体激光快慢轴的两个方向上光斑尺寸和发散角均接近。图 4 为 LDA 在整形前后的光斑图样。

### 3.2 铷激光输出

实验获得了稳定的线偏振铷激光输出,输出模式为低阶横模,测得中心波长为 794.77 nm(空气中波长),线宽为 0.08 nm,图 5 是输出铷激光光谱图。

实验系统中抽运光焦点位于铷蒸气泡中心附近,铷蒸气泡摆放位置较靠近谐振腔的全反镜。抽运光经聚焦后在垂直于光轴的截面上光斑近似为方形,光斑在水平和垂直两方向上的大小比较接近。在反复调整抽运光与谐振腔腔模大小后,得到了使输出铷激光功率最高的模式匹配结果。在半导体激光器电流为 30 A 时测量了抽运光焦点附近的光斑

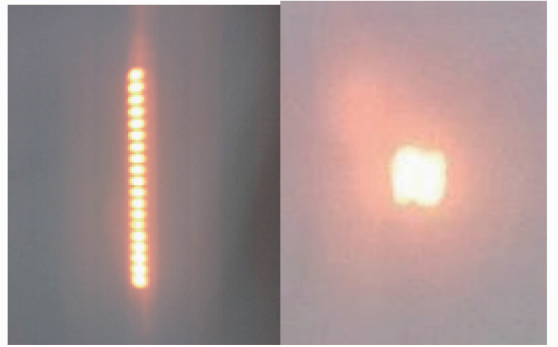


图 4 整形前后 LDA 的光斑对比

Fig. 4 Comparison of beam spots of LDA before and after beam shaping

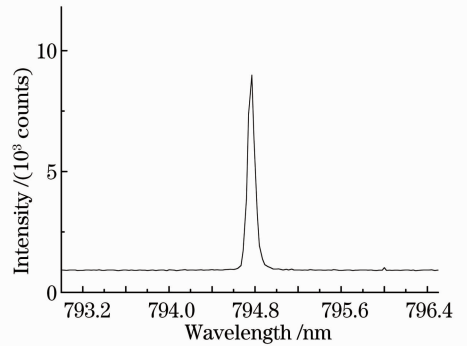


图 5 铷激光光谱图

Fig. 5 Spectrum of Rb laser

尺寸,分别以  $w_x$  和  $w_y$  表示抽运光在水平和垂直两方向上的光斑半径,以  $w$  表示谐振腔基模光斑半径的理论值,图 6 为铷蒸气泡位置处的抽运光与谐振腔腔模大小对比。与美国空军学院在半导体抽运钾激光实验中的模式匹配方案<sup>[16]</sup>不同的是,本系统中抽运光尺寸在整段增益介质中都大于谐振腔腔模尺寸。

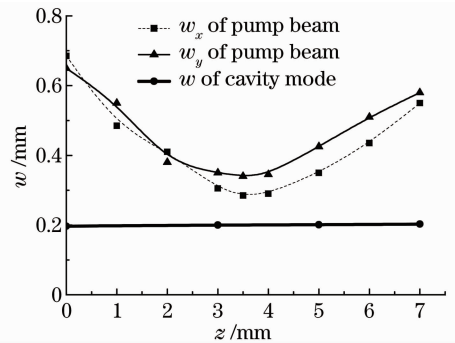


图 6 铷蒸气泡内抽运光光斑半径与谐振腔腔模光斑半径大小对比

Fig. 6 Radii comparison of pump beams and laser cavity mode along the Rb vapor cell

实验中半导体激光器最高电流加到 30 A,经斩波器变为脉冲输出的形式进行抽运实验(下文提到

的功率均指斩波后的峰值功率)。碱金属激光输出的斜率效率与谐振腔输出耦合率有着直接关系<sup>[17]</sup>,以经 PBS 后注入谐振腔的半导体激光功率作为抽运光功率,图 7 是在铷蒸气温度 145 °C,谐振腔输出耦合镜的反射率  $R$  分别为 80%,50%,30% 时,铷激光输出功率与抽运光功率的对比图。反射率为 30% 时获得最高 32% 的斜率效率。

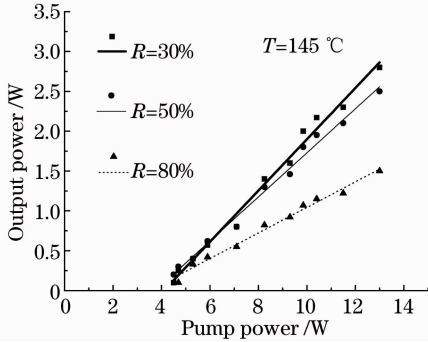


图 7 铷激光输出功率随抽运光功率的变化

Fig. 7 Output power of Rb laser versus pump power

在电流为 30 A 时, LDA 自由运转时的功率约为 29 W, 外腔获得的窄线宽激光在进入光束整形系统前功率为 18.1 W。由于镜面反射损失, 经光束整形后抽运光功率降为 16.1 W。抽运光相对于 PBS 为 s 偏振, 透过聚焦透镜后入射到 PBS, 由于 PBS 偏振分光面的接收角有限, 加上各镜面反射损失, 抽运光经 PBS 分光面反射后注入谐振腔的功率降为 13 W。此时获得了最高 2.8 W 的线偏振铷激光, 光-光转换效率为 21%。

铷原子的饱和蒸气压随铷蒸气泡的温度升高而迅速上升, 提高铷蒸气泡温度即提高铷蒸气中铷原子数密度。在 LDA 电流为 30 A, 输出耦合镜反射率为 30% 时, 改变铷蒸气泡的温度, 测得泡侧壁温度与铷激光输出功率的关系, 如图 8 所示, 可知温度为 145 °C 左右时铷激光输出功率最大。实验系统可

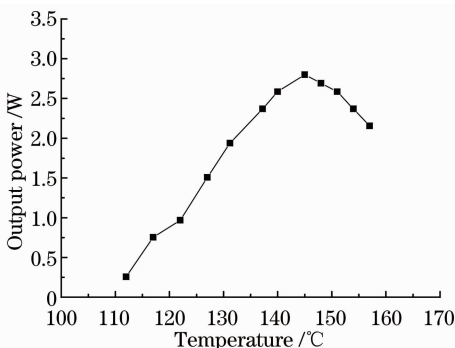


图 8 铷激光输出功率随泡体温度的变化

Fig. 8 Output power of Rb laser versus cell temperature

以在电流 30 A, “泡壁”温度 145 °C 的条件下长时间工作, 输出铷激光功率波动较小。

## 4 结 论

该 DPAL 的实验系统与前期已报道的铷激光系统<sup>[12]</sup> 相比, 使用了更高功率的半导体抽运源, 改进了线宽压窄系统和光束整形系统, 优化了抽运光与谐振腔的模式匹配。实验中获得了最高 2.8 W 的线偏振铷激光, 光-光转换效率达 21%。经初步测量和估算, 铷激光输出功率约为吸收的抽运光功率的 50%, 铷蒸气泡对抽运光的吸收效率不到 50%, 加上抽运源在线宽压窄过程中功率损失较大, 这些都限制了铷激光输出的整体效率(电光转换效率)。在下一步的实验中, 将继续提高抽运光功率, 并针对上述问题对实验系统做出改进。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 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, Baltimore, 2005. 467~469
- 3 Y. Wang, T. Kasamatsu, Y. Zheng *et al.*. Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser-diode array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(14): 14112
- 4 Y. Wang, M. Niigaki, H. Miyajima *et al.*. High-efficiency 894-nm laser emission of laser-diode-bar-pumped cesium-vapor laser[J]. *Appl. Phys. Express*, 2009, **2**(3): 032051
- 5 B. V. Zhdanov, A. Stooke, G. Boyadjian *et al.*. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(5): 414~415
- 6 B. V. Zhdanov, J. Sell, R. J. Knize. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. *Electronics Lett.*, 2008, **44**(9): 582~583
- 7 B. V. Zhdanov, M. K. Shaffer, J. Sell. Transverse pumped Cs vapor laser[C]. *SPIE*, 2009, **7196**: 71960F
- 8 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
- 9 J. Zweiback, A. Komashko, W. F. Krupke. Alkali vapor lasers [C]. *SPIE*, 2010, **7581**: 75810G
- 10 A. V. Bogachev, S. G. Garanin, A. M. Dudov *et al.*. Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J]. *Quantum Electron.*, 2012, **42**(2): 95~98
- 11 Yang Zining, Wang Hongyan, Bi Weihong *et al.*. Diode pumped rubidium vapor laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(9): 2273~2274
- 12 Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong *et al.*. Diode pumped rubidium vapor laser with linearly polarized fundamental mode output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2269~2270

- 徐程, 谭荣清, 李志永等. 半导体泵浦铷蒸气激光实现线偏振基模输出[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(10): 2269~2270
- 13 B. V. Zhdanov, T. Ehrenreich, R. J. Knize. Narrow band external cavity laser diode array[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(4): 221~222
- 14 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Linewidth narrowed, tunable laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 751~754
- 苏宙平, 楼祺洪, 董景星等. 激光二极管阵列的窄线宽, 可调谐输出[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 751~754
- 15 Zining Yang, Yuandong Li, Hongyan Wang *et al.*. Frequency-narrowed external cavity broad-area-diode for rubidium laser pumping[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(6): 061401
- 16 B. V. Zhdanov, M. K. Shaffer, R. J. Knize. Demonstration of a diode pumped continuous wave potassium laser[C]. *SPIE*, 2011, **7915**: 791506
- 17 B. V. Zhdanov, A. Stooke, G. Boyadjian *et al.*. Laser diode array pumped continuous wave rubidium vapor laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 748~751

栏目编辑: 张腾