

激光二极管抽运铯蒸气激光实现高效率瓦级输出

陈 飞¹ 高 飞^{1,2} 徐 艳^{1,2} 谢冀江¹ 李殿军¹ 杨贵龙¹ 郭 劲¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用中心波长为 852.3 nm、线宽为 0.17 nm 的光纤耦合半导体激光器作为抽运源, 室温下充入 60 kPa 氦气和 20 kPa 乙烷、5 mm 长的铯蒸气池作为激光增益介质开展了端面抽运铯蒸气激光实验研究。蒸气池工作温度为 107.6 °C 时, 改变输出镜反射率优化铯激光输出性能, 获得最佳输出镜反射率为 48.79%。连续抽运模式下, 注入抽运功率为 4.76 W 时获得 1.16 W 的 894.57 nm 连续激光输出, 斜效率为 28.8%, 光光转换效率达 24.4%; 脉冲抽运模式下, 注入抽运功率为 14.1 W 时获得了 2.5 W 稳定铯激光输出。

关键词 激光器; 半导体抽运激光器; 碱金属蒸气激光器; 铯激光

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102011

Diode-Pumped Cesium Vapor Laser with High Efficiency Output

Chen Fei¹ Gao Fei^{1,2} Xu Yan^{1,2} Xie Jijiang¹ Li Dianjun¹ Yang Guilong¹ Guo Jin¹

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Employing a fiber-coupled diode-laser with a center wavelength of 852.3 nm and a linewidth of 0.17 nm as the pump source, and using a 5 mm long cesium vapor cell with 60 kPa helium and 20 kPa ethane as laser medium, an experimental investigation of LD-end-pumped cesium vapor laser is carried out. Under an operating temperature of 107.6 °C, the laser output performance is optimized by changing the reflectivity of output coupler. Using an optimized reflectivity of 48.79%, 1.16 W 894.57 nm laser is obtained at an incident continuous-wave pump power of 4.76 W, corresponding an optical-optical efficiency of 24.4% and a slope-efficiency of 28.8%, respectively. Steady cesium laser with an output power of 2.5 W is obtained under 14.1 W pulsed pump power.

Key words laser; diode-pumped laser; alkali vapor laser; cesium laser

OCIS codes 140.1340; 140.3480; 140.6810

1 引 言

半导体激光抽运的碱金属蒸气激光器(DPAL)具有量子效率高、光束质量好、气体介质折射率扰动小以及易于热管理等优点, 具有实现高能、高效率激光输出的潜力, 有望在军事和民用等多领域获得广泛的应用^[1-2]。DPAL于2003年由美国里弗莫尔国家重点实验室提出, 并于2005年首次获得激光输出^[3-4]。自此之后, DPAL引起了广泛的关注和研究。目前, 国际上已实现激光二极管(LD)抽运钾(770.1 nm)、铷(795.0 nm)、铯(894.6 nm)激光输出。2010年, 美国通用原子公司采用LD抽运有烃和无烃环境下的铷蒸气, 分别获得

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(61308050)、激光与物质相互作用国家重点实验室自主及开放研究项目(SKLLIM1210-01, SKLLIM1210-02)

作者简介: 陈 飞(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光技术及其应用方面的研究。E-mail: feichenny@126.com

145 W 和 28 W 的铷激光^[5-6],前者的斜效率达到 28%。2011 年,美国空军学院采用 LD 抽运无烃环境下的钾蒸气,获得了 240 mW 的连续钾激光,斜效率为 25%^[7]。2012 年,俄罗斯实验物理研究所报道了目前功率最高的千瓦级铯激光输出,光光转换效率为 48%^[8]。国内对 DPAL 的研究主要集中于理论设计,仅开展了初步的实验研究。2011 年,国防科学技术大学报道了 LD 抽运铷蒸气激光输出,峰值功率为 600 mW,斜效率为 1.7%^[9]。2013 年,中国科学院电子学研究所报道了输出功率为 2.8 W 铷激光输出,斜效率为 32%,光光转换效率为 21%^[10]。2014 年,中国科学院电子学研究所又报道了 LD 抽运铯激光输出,峰值功率为 394 mW,斜效率为 11.2%,光光转换效率为 7.4%^[11]。

本文采用光纤耦合输出的 852.3 nm 窄线宽 LD 作为抽运源,通过望远镜耦合系统抽运铯蒸气,优化了蒸气池工作温度和输出镜反射率。实验中,在连续抽运功率 4.76 W 时,获得 1.16 W 铯激光输出,光光转换效率为 24.4%,斜效率为 28.8%;在脉冲抽运模式下,获得了功率为 2.5 W 的铯激光稳定输出。

2 实验装置

LD 端面抽运铯蒸气激光器是一种三能级激光器,其利用铯原子外层价电子的能级跃迁实现抽运吸收和激光发射,即通过碱金属原子的 D2 跃迁($^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$)实现 852.3 nm 的抽运吸收,激光发射通过 D1 跃迁($^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$)实现 894.6 nm 的激光发射,电子在能级 $^2P_{3/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 的转移通过碰撞弛豫实现。LD 端面抽运铯蒸气激光实验装置原理图如图 1 所示。LD 抽运源的中心波长为 852.3 nm,线宽为 0.17 nm,抽运光由光纤耦合输出,光纤芯径为 400 μm 、数值孔径为 NA=0.22。抽运光通过望远镜耦合系统会聚入蒸气池中央位置,准直镜和聚焦镜都为平凸非球面透镜,其中准直镜的焦距为 20 mm,聚焦镜的焦距为 50 mm,在蒸气池中央位置获得的抽运光斑半径约为 500 μm 。透镜表面镀有 852.3 nm 波长处的增透膜,透射率大于 98%。蒸气池直径为 15 mm,内部光程长为 5 mm,两端的通光窗口外侧镀有 852.3 nm 和 894.6 nm 波长处的增透膜,透射率大于 99.5%。蒸气池内在真空环境下充入固态铯,并充入 60 kPa 氦气和 20 kPa 乙烷的缓冲气体。为防止铯蒸气在通光窗口上凝结,加热炉对窗口单独进行加热并保持窗口温度略高于池体温度约 2 $^{\circ}\text{C}$ 。激光器谐振腔由平面二色片和凹面输出镜组成平凹稳定腔,腔长约为 120 mm,输出镜的凹面曲率半径为 200 mm,谐振腔内的基模振荡光束腰约为 167 μm 。二色片镀有 852.3 nm 波长处的增透膜,透射率为 97.5%;以及波长 894.6 nm 处的高反膜,反射率为 99.9%。

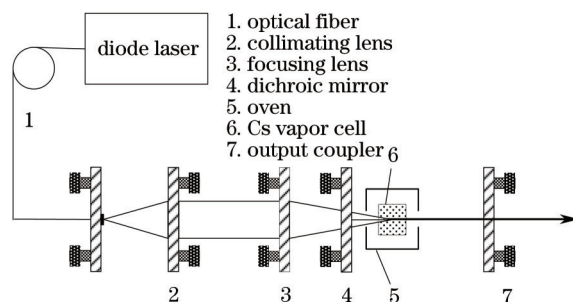


图1 铯 DPAL 实验装置

Fig.1 Schematic of Cs DPAL

3 实验结果及分析

3.1 铯激光光谱

实验中,对蒸气池两端窗口的温度设定在 110 $^{\circ}\text{C}$,中央部分池体的实测温度为 107.6 $^{\circ}\text{C}$ 。在该条件下对铯蒸气进行连续抽运,调节输出镜的角度在荧光显影板上获得输出铯激光的圆形光斑,如图 2 所示。采用光纤光谱仪(Ocean Optics),HR4000 进行光谱测试,获得输出铯激光以及抽运光的光谱,如图 3 所示。其中测得输出铯激光的中心波长为 894.57 nm。进一步采用分辨率为 0.01 nm 的光谱仪(ANDO,AQ6317B)测得铯激光的输出线宽为 0.032 nm,这与计算得到的碰撞展宽后的铯原子 D1 线线宽相符(0.035 nm),其中 D1 线的碰撞展宽系数为 194.4 MHz/kPa^[12]。



图2 铯激光光斑

Fig.2 Cs laser beam spot

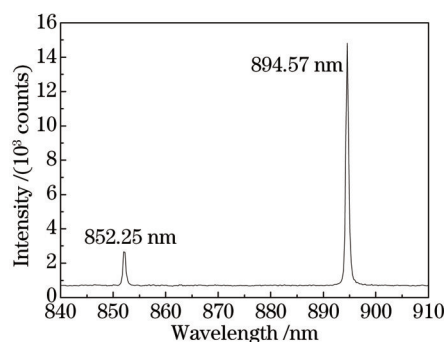


图3 LD抽运光和铯激光光谱

Fig.3 Spectrum of LD-pump laser and Cs laser

3.2 输出镜反射率和工作温度优化

图4给出了铯蒸气工作温度为107.6℃,输出镜反射率为20.84%、48.79%和94.92%时,铯激光输出功率随抽运功率的变化情况。当抽运功率为4.76 W时(抽运功率密度约为606 W/cm²),在输出镜反射率为48.79%时获得最高输出功率为1.16 W,相应的光光转换效率为24.4%。对测试的数据点进行线性拟合,得出输出镜反射率为20.84%、48.79%和94.92%时对应的斜效率分别为21.3%、28.8%和15.9%。因而,得到此条件下最佳输出镜反射率为48.79%。通过在端面抽运铯蒸气激光模型中对输出镜反射率进行优化,得到在相同实验条件下铯蒸气激光的最佳输出镜反射率为53.4%,这与实验中所得到的结果接近。

图5给出了输出镜反射率为48.79%时,铯激光的输出功率随蒸气池工作温度的变化关系。可以看出,随着温度的升高,铯激光输出功率逐渐增大,当温度升至117.4℃时获得的铯激光输出功率为1.43 W。同样在端面抽运铯蒸气激光模型中对运行温度进行优化,得到在蒸气池长5 mm的条件下,激光器运行的最佳温

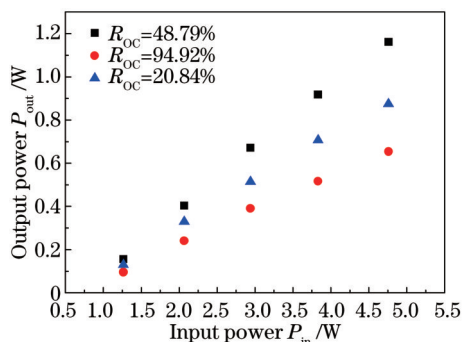


图4 连续抽运下铯蒸气激光输出功率随抽运功率的变化

Fig.4 Output power of Cs laser versus the incident continuous-wave power

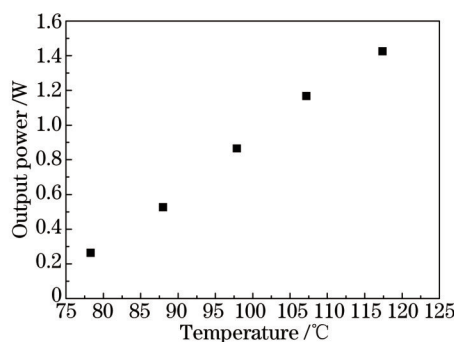


图5 输出功率随温度的变化

Fig.5 Dependence of output power on the temperature

度为133℃。实验中,为防止蒸气池内铯与乙烷发生反应,其工作温度没有继续升高。

3.3 脉冲抽运

在连续输出模式中,当抽运功率进一步升高时,受热效应影响输出功率不能按斜效率继续增长,因此采用脉冲抽运模式,实验验证了铯激光的输出性能。图6为注入连续抽运功率为4.76 W时,连续铯激光输出功率随时间的变化,此时的温度为107.6℃,输出镜反射率为48.79%。可以看出随着时间的增长,输出功率受热效应影响而逐渐降低。

为减小铯蒸气池内的热效应,选择脉冲抽运模式对铯蒸气进行抽运。抽运光脉冲为矩形脉冲波,重复频率从1~1000 Hz连续可调,占空比也连续可调。图7给出了相同工作温度和输出镜反射率条件下,重复频率为76 Hz,占空比为38.5%,注入抽运功率为14.1 W时铯激光的输出功率随时间的变化趋势。可以看出,铯激光的输出功率随时间增加的浮动已经不明显,基本能够达到稳定输出,输出功率约为2.5 W。

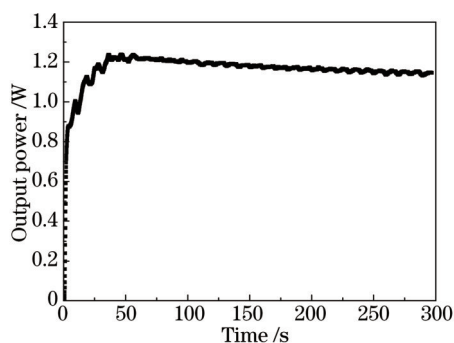


图6 连续铯激光输出功率稳定性测试

Fig.6 Output power stability test of continuous-wave Cs laser

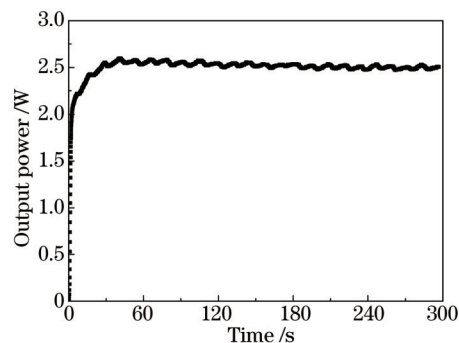


图7 脉冲抽运模式下铯蒸气激光输出功率稳定性测试

Fig.7 Output power stability test of Cs laser under pulsed pump

4 结 论

报道了 852.3 nm 窄线宽 LD 端面抽运铯蒸气激光器实现高效率瓦级稳定输出。在固定实验条件下,优化得到了铯激光器最佳输出镜反射率为 48.79%。在 1~5W 的连续抽运模式下,获得斜效率为 28.8%、光光转换效率为 24.4% 的铯激光输出;为减小激光器工作中热效应的影响,采用脉冲模式抽运铯蒸气,重复频率为 76 Hz、占空比为 61.5% 时获得最大功率为 2.5 W 的铯激光稳定输出。下一步的工作中,拟通过优化激光器的蒸气池长度、工作温度、热管理以及模式匹配,以期实现更高的激光转换效率和输出功率。

参 考 文 献

- 1 Que Yiqing, 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.
阙义软, 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.
- 2 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Influence of fine structure mixing rate on laser diode pumped alkali laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2502-2507.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 精细结构混合速率对激光二极管抽运碱金属蒸气激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2502-2507.
- 3 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.
- 4 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), 2005, 1: 467-469.
- 5 J Zweiback, A Komashko, W F Krupke. Alkali vapor lasers[C]. SPIE, 2010, 7581: 7581G.
- 6 J Zweiback, W F Krupke. 28 W average power hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser[J]. Opt Exp, 2010, 18(2): 1444-1449.
- 7 B V Zhdanov, M K Shaffer, R J Knize. Demonstration of a diode pumped continuous wave Potassium laser[C]. SPIE, 2011, 7915: 791506.
- 8 Bogachev A V, Garanin S G, Dudov A M, *et al.*. Diode-pumped caesium vapour laser with linearly polarized fundamental mode output[J]. Quantum Electronics, 2012, 42(2): 95-98.
- 9 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. 半导体泵浦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.
- 10 Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong, *et al.*. 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102009.
徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出 2.8 W 线偏振铷激光[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102009.
- 11 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, *et al.*. Diode pumped cesium vapor laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 010102.
李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 半导体泵浦铯蒸气实现激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 010102.
- 12 Andalkar, R B Warrington. High-resolution measurement of the pressure broadening and shift of the Cs D1 and D2 lines by N₂ and He buffer gases[J]. Phys Rev A, 2002, 65(3): 032708.

栏目编辑: 胡冰