

文章编号 1004-924X(2015)10-2755-06

LD 端面泵浦铯蒸气激光器的模式匹配

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

王春锐¹, 张 阔¹, 郑长彬¹, 高 飞^{1,2}

(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:以光纤耦合半导体激光器作为泵浦源, 5 mm 长的铯蒸气池作为激光增益介质, 开展了端面泵浦铯蒸气激光器的模式匹配实验研究。分析了泵浦光聚焦光斑半径和聚焦位置对铯激光输出性能的影响。以激光器的工作斜效率和光光效率为指标对各模式匹配参数进行了优化, 同时对激光器的阈值泵浦功率进行了研究。结果表明: 在一定的激光振荡模束腰下, 存在最佳的泵浦光聚焦光斑半径使斜效率最大。此外, 聚焦位置在蒸气池中央时有利于提高斜效率和光光效率。对阈值泵浦功率的研究显示, 阈值泵浦功率随泵浦光聚焦光斑半径的减小而减小, 而且当泵浦光聚焦于蒸气池前端时有利于降低阈值泵浦功率。基于以上研究, 获得了一组最佳模式匹配参数, 即泵浦光聚焦光斑半径为 333 μm , 激光振荡模束腰为 167 μm , 泵浦光聚焦位置位于蒸气池中央。

关键词: 半导体泵浦碱金属蒸气激光器; 铯蒸气; 端面泵浦; 模式匹配

中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2755

Mode matching of LD-end-pumped cesium vapor laser

XIE Ji-jiang^{1*}, XU Yan^{1,2}, CHEN Fei¹, YANG Gui-long¹, LI Dian-jun¹,

WANG Chun-rui¹, ZHANG Kuo¹, ZHENG Chang-bin¹, GAO Fei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: laserxjj@163.com

Abstract: By employing a fiber-coupled diode-laser as the pump source and a 5 mm long cesium vapor cell as laser media, the experiments on the mode-matching of a LD-end-pumped cesium vapor laser were investigated. The effects of the focus spot radius and the position of focused pump light on the output characteristics of cesium laser were analyzed. Then, the different mode-matching parameters were optimized to allow the slope efficiency and optical-to-optical efficiency to be maximal. Furthermore, the threshold pump power of the laser was studied. Results show that there is an optimal focused spot radius to allow the slope efficiency to be the highest when the laser resonant mode beam is constant. Moreover, it is beneficial to improve the efficiency when the focused spot position is in the

收稿日期: 2014-10-15; **修订日期:** 2014-11-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61308050); 激光与物质相互作用国家重点实验室自主及开放研究基金资助项目 (No. SKLLIM1210-01, No. SKLLIM1210-02)

center of vapor cell. The threshold pump power was also researched, which shows the power can decrease with decreasing the focus spot radius of pump light, and when the pumping light focuses on the front of the vapour cell, the pumping power can be reduced. Finally, a series of parameters were optimized at the laser mode waist of $167\ \mu\text{m}$, and they are focused spot radius of $333\ \mu\text{m}$, spot position of $2.5\ \text{mm}$ and the focusing position of pumping light on the center of the vapour cell.

Key words: Diode-pumped Alkali Vapor Laser(DPAL); cesium vapor; end-pumped; mode-matching

1 引言

近几年,半导体(Laser Diode, LD)泵浦碱金属蒸气激光器(Diode-Pumped Alkali-vapor Laser, DPAL)因具有高效率、高功率和高光束质量输出的潜在优势,而成为激光研究领域的一大热点。与固体激光器相比,碱金属蒸汽介质可流动,DPAL的热管理性能更佳;与化学气体激光器相比,DPAL可以全电操作,无需充排放有毒气体;与光纤激光器相比,DPAL可以有效地避免一些非线性效应。因而它在工业、医疗、军事和科研等多个领域具有广阔的应用前景。DPAL通常采用钾、铷、铯蒸气作为增益介质,原理是在碱金属原子的 D_2 线($^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$)实现泵浦跃迁,然后通过碰撞弛豫过程使原子由能级 $^2P_{3/2}$ 转移到能级 $^2P_{1/2}$,实现能级 $^2P_{1/2}$ 与 $^2S_{1/2}$ 之间的粒子数反转,最后通过 D_1 线跃迁($^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$)实现激光发射。基于该原理,采用钾、铷和铯所实现的激光的发射波长分别为 770.1 、 795.0 和 $894.6\ \text{nm}$ 。

2003年,美国利弗莫尔国家重点实验室使用掺钛蓝宝石激光器端面泵浦铷蒸气,首次实现了铷激光输出,输出功率和全光效率分别为 $30\ \text{mW}$ 和 16% ^[1]。2005年,该实验室使用多模输出的LD端面泵浦铷蒸气,实现了输出功率和斜效率分别为 $1\ \text{W}$ 和 10% 的铷激光输出,这是DPAL的首次成功运转^[2]。2007年,美国空军军官学院的研究小组使用发射谱宽小于 $10\ \text{GHz}$ 的LD泵浦铯蒸气,获得了 $10\ \text{W}$ 输出的铯激光,其光光效率为 62% ^[3];同时采用两个同样谱宽的LD双路泵浦铷蒸气获得了 $17\ \text{W}$ 的铷激光,其光光效率为 46% ^[4]。2009年,该研究小组继续使用同样谱宽的LD侧面泵浦铯蒸气池,结合非稳腔技术获得了 $49\ \text{W}$ 的铯激光,其光光效率为 31% ^[5]。

2010年,通用原子的研究小组报道了 $145\ \text{W}$ 的铷激光输出,其光光效率为 28% ^[6]。2012年,俄联邦实验物理研究所采用多个LD阵列端面泵浦介质可闭合循环的铯蒸气池,获得了输出功率近千瓦的铯激光,其光光效率达到了 48% ^[7]。近年来,DPAL在国内也得到了较快发展。2011年,国防科技大学的杨子宁等人报道了铷激光在国内的首次输出,他们通过外加斩波器将LD连续泵浦光转换为脉冲模式,泵浦 $5\ \text{mm}$ 长的铷蒸气池获得了峰值功率为 $600\ \text{mW}$ 的铷激光,全光效率为 1.7% ^[8]。2013年,中国科学院电子学研究所的徐程等人报道了线偏振基模输出的铷激光,其峰值输出功率为 $2.8\ \text{W}$,全光效率为 21% ^[9]。2014年,该所又报道了半导体泵浦铯蒸气实现铯激光输出,峰值功率为 $394\ \text{mW}$,斜效率为 11.2% ,光光效率为 7.4% ^[10]。

DPAL属于三能级激光器,其激光下能级($^2S_{1/2}$,也是基态能级)上的粒子会对振荡激光形成再吸收损耗,从而对激光器产生不利影响^[11]。优化泵浦光与振荡激光的模式匹配是减少再吸收损耗的有效途径,不仅能降低激光阈值,而且能提高激光斜效率和输出功率。本文以铯蒸气为激光增益介质,开展了对LD端面泵浦铯蒸气激光器中模式匹配的实验研究,探索了不同泵浦聚焦光斑大小和泵浦聚焦位置对铯激光输出性能的影响,最终获得了一组使铯激光高效、高功率输出的最佳模匹配参数。

2 实验装置

本文所采用的LD端面泵浦铯蒸气激光器装置的原理如图1所示。其中,LD采用外置布拉格光栅进行线宽压窄和波长锁定,中心波长为 $852.3\ \text{nm}$,线宽为 $0.17\ \text{nm}$ 。然后由光纤耦合输

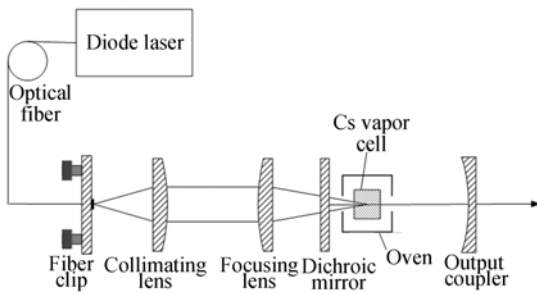


图 1 LD 端面泵浦铯蒸气激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic of LD-end-pumped cesium vapor laser

出,输出光纤芯径为 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径 NA 为 0.22,采用 CCD 采集到泵浦光在漫反射板上的光强呈高斯对称分布。泵浦光首先通过准直透镜变换为平行光,然后再通过聚焦透镜汇聚入铯蒸气池中。聚焦透镜焦距为 $50\ \text{mm}$,并安装在三维精密调整台上,可以调节聚焦透镜在光轴上的纵向位置,从而改变泵浦光斑在蒸气池中的聚焦位置。为了消除球差,准直透镜和聚焦透镜都为非球面透镜,且表面都镀有 $852.3\ \text{nm}$ 的增透膜,透过率大于 98%。铯蒸气池直径为 $15\ \text{mm}$,内部光程长为 $5\ \text{mm}$,两端窗口的外侧镀有 $852.3\ \text{nm}$ 和 $894.6\ \text{nm}$ 的增透膜,透过率大于 99.5%。蒸气池在室温下充入 $60\ \text{kPa}$ 氦气和 $20\ \text{kPa}$ 乙烷。在实验过程中,保持蒸气池的池体温度为 $107.8\ ^\circ\text{C}$,相应的铯原子密度为 $2.49 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ 。为防止铯蒸气在窗口上凝结,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 $2\ ^\circ\text{C}$ 左右。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,谐振腔长为 $120\ \text{mm}$,凹面输出镜的曲率半径为 $200\ \text{mm}$,在波长 $894.6\ \text{nm}$ 处的反射率为 48.79%。二色片分别镀有透过率为 97.5% 的 $852.3\ \text{nm}$ 增透膜,以及反射率为 99.9% 的 $894.6\ \text{nm}$ 高反膜。为了减少热效应对激光器的影响,实验中采用矩形波脉冲光泵浦铯蒸气,占空比为 38.5%,重复频率为 $76\ \text{Hz}$,实验所记录的功率均换算为脉冲内峰值功率。图 2 为光谱仪测到的铯激光光谱,测量显示铯激光中心波长为 $894.57\ \text{nm}$,其中 $852.23\ \text{nm}$ 光为泵浦光波长。图中左上角为荧光板显示的铯激光光斑,可以看出输出的铯激光具有较好的光斑均匀性。

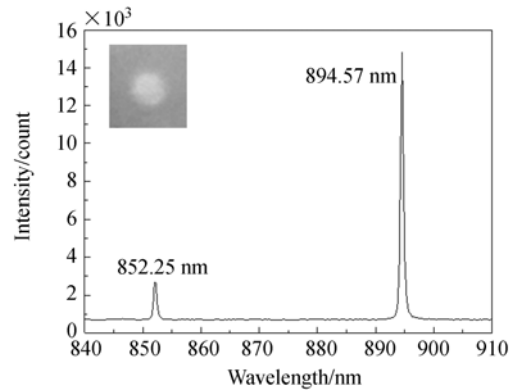


图 2 输出铯激光光谱和铯激光光斑

Fig. 2 Spectrum and spot of Cs laser

3 结果与分析

3.1 泵浦光斑半径

振荡光与泵浦光的光斑半径比是影响激光器模式匹配的重要参量。在一定的腔型结构下,激光振荡模束腰一定,泵浦聚焦光斑越小越有利于降低抽运阈值,但是泵浦光的抽运模体积的减小会导致与激光振荡模失配,不利于获得高效率的激光输出;而泵浦聚焦光斑越大,虽然抽运模体积增大了,但是与激光振荡模的失配也不利于高效率的激光输出,而且当光斑增大到一定程度后,泵浦功率密度无法达到抽运阈值。

图 3 所示为在一定腔型结构下改变泵浦光聚焦光斑半径时,输出功率随泵浦功率的变化情况。其中谐振腔长为 $120\ \text{mm}$,计算得到理想情况高斯基模下的激光束腰值为 $167\ \mu\text{m}$,泵浦光聚焦于蒸气池中央。实验中使用的准直透镜焦距分别为 $20, 30, 40$ 和 $50\ \text{mm}$,计算得到泵浦光的聚焦光斑半径分别为 $500, 333, 250$ 和 $200\ \mu\text{m}$,由此得到的振荡光与泵浦光斑的半径比分别为 $0.33, 0.50, 0.67$ 和 0.84 。泵浦光聚焦光斑半径的计算公式为:

$$r = \frac{f_2}{f_1} \frac{D}{2}, \quad (1)$$

其中: r 为泵浦光聚焦光斑半径, f_2 为准直透镜焦距, f_1 为聚焦透镜焦距, D 为光纤芯径。

由图 3 可见,当聚焦光斑半径为 $333\ \mu\text{m}$ 时,激光器输出功率随泵浦功率变化的斜率最大,拟合得到的斜率约为 26.38% (如图中实线所示),而 $500, 250$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 光斑拟合曲线的斜率而分别为 22.45%, 20.83% 和 18.16%,表明泵浦光聚

焦光斑尺寸对斜效率有着明显的影响。实验结果显示,泵浦光的最佳聚焦光斑尺寸远大于理想振荡激光的束腰,其原因可能是蒸汽池内的热透镜效应改变了原来的谐振腔结构,使激光束腰的位置和大小都发生了变化。同时,在改变聚焦光斑半径时发现荧光板上的铯激光光斑没有发生明显的变化。

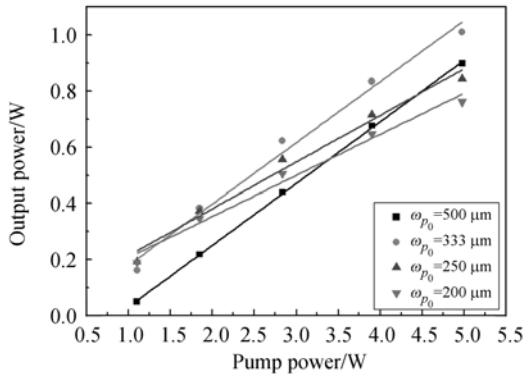


图 3 不同泵浦光聚焦光斑半径下输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 3 Dependence of output power on pump power with different focused pump spot radii

3.2 泵浦光聚焦位置

泵浦光的聚焦位置也是影响模式匹配的重要参量。图 4 给出了在泵浦聚焦光斑半径为 333 μm 时,拟合实验数据得到的不同聚焦位置时激光器的斜效率变化情况。图中横坐标表示泵浦光聚焦位置距离蒸汽池前端的距离。由图可知,当泵浦光聚焦于蒸汽池的中央区域时,激光器输出功率随泵浦功率变化的斜率最大。因此,铯激光以最高斜效率工作的最佳聚焦位置在蒸汽池中央,但是总体来看聚焦位置对斜效率的影响并不

是很突出,在整个蒸汽池的长度范围内,斜效率的变化约为 1.6%。值得注意的是,图 4 中的斜效率低于图 3 中的斜效率,其原因可能是前后调腔误差以及蒸汽池内的介质状态不同引起的。

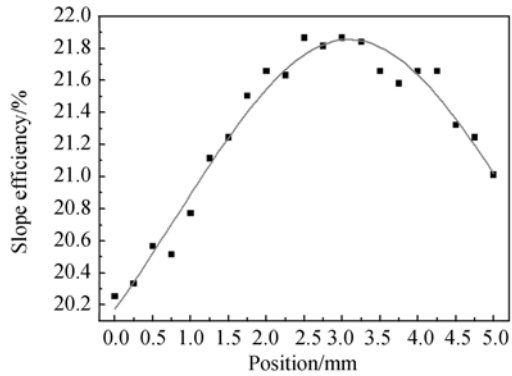
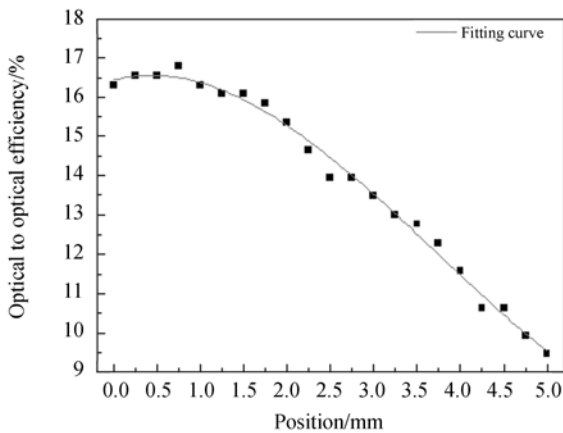


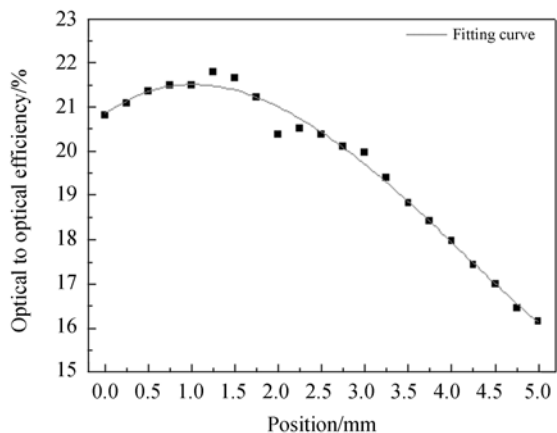
图 4 斜效率随聚焦位置的变化

Fig. 4 Dependence of slope efficiency on focused position

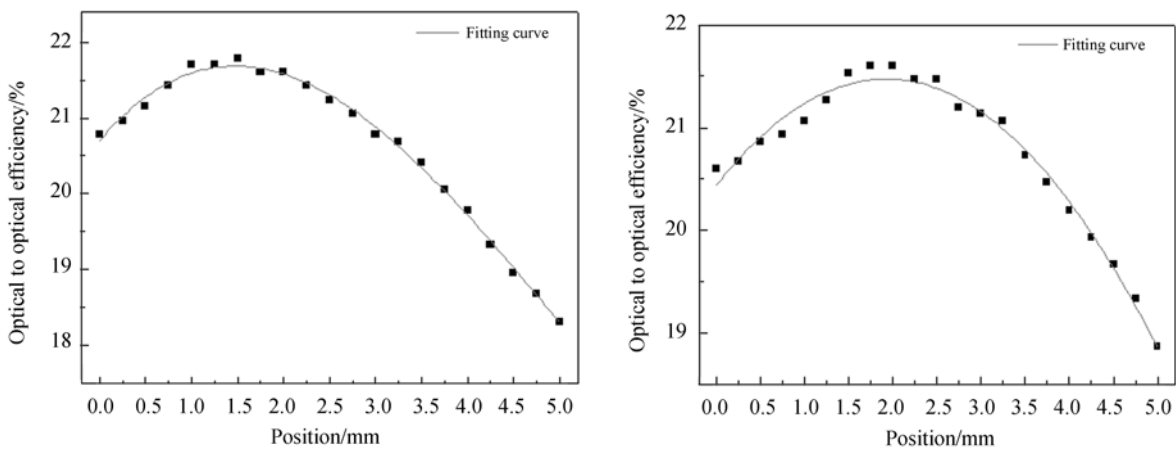
此外,实验结果显示在一定的泵浦功率下,获得最高光光效率输出的聚焦位置会随着泵浦功率的增大而逐渐向蒸汽池后端移动。图 5 是泵浦功率分别为 1.10, 1.85, 2.84 和 3.90 W 时,不同聚焦位置下输出功率的变化情况。对应最大光光效率的聚焦位置分别为 0.75, 1.25, 1.5 和 1.75 mm。由图可见,随着泵浦功率的增大,聚焦位置对光光效率的影响程度越来越弱。因而,在高功率泵浦的情况下,将泵浦光聚焦于蒸汽池中央附近有利于获得高的光光效率。此时测量得到铯激光的远场发散角约为 0.81 mrad, M^2 因子约为 2.41。 M^2 因子较大的原因是铯蒸汽池内的热效应较为明显,导致光束质量发生退化。



(a) $P_m = 1.10$ W



(b) $P_m = 1.85$ W



(c) $P_{in} = 2.84 \text{ W}$

(d) $P_{in} = 3.90 \text{ W}$

图 5 光光效率随聚焦位置的变化

Fig. 5 Dependence of optical to optical efficiency on focused position

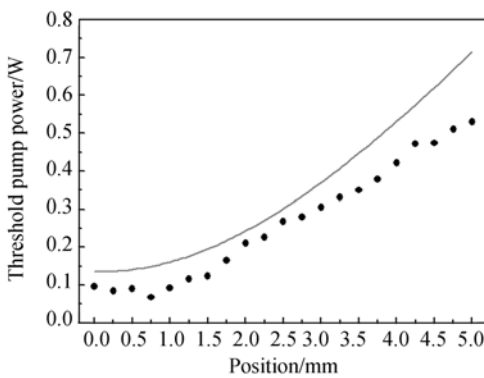


图 6 阈值泵浦功率随聚焦位置的变化

Fig. 6 Dependence of threshold pump power on focused position

拟合图 5 中的数据得到阈值泵浦功率随聚焦位置的变化情况,如图 6 中的实验数据点所示。由图可见,随着聚焦位置向蒸气池后端移动,阈值泵浦功率先减小后增大,最小阈值泵浦功率的聚焦位置距离蒸气池前端约 0.75 mm。在相同的实验条件下,阈值泵浦功率随聚焦位置的变化趋势的模拟结果如实线所示。结果显示,模拟趋势与实验数据的变化趋势基本一致,其中阈值泵浦功率的表达式为:

$$P_{th} = \frac{h\nu_p \delta + l\sigma_{D1} N_0}{\eta_a} \frac{1}{l} \frac{1}{\sigma_{D1} \tau_f J_1}, \quad (2)$$

其中: η_a 为铯蒸气对泵浦光的吸收效率, δ 为谐振腔的固有损耗, l 为蒸气池长, N_0 为铯原子密度,

σ_{D1} 是发射截面, τ_f 为模型中定义的铯原子精细结构能级寿命(61.2 ns), J_1 是表征振荡光与泵浦光的空间重叠程度的积分^[12]。公式(2)说明,除了损耗、蒸气池长度、碱金属原子密度等参量外,振荡激光与泵浦光的模式匹配也是影响阈值泵浦功率的重要参量,即模式匹配越好,阈值越低。因而,从降低激光器的抽运难度考虑,泵浦光应尽可能聚焦到靠近蒸气池的位置。

4 结 论

本文对 LD 端面泵浦铯蒸气激光器的模式匹配进行了实验研究,分析了泵浦光聚焦光斑半径和聚焦位置对铯激光输出性能的影响。实验结果显示:在一定的激光振荡模束腰下,存在最佳的泵浦光聚焦光斑半径使激光器的斜效率最大,本实验中所获得的最佳聚焦光斑半径为 333 μm 。当泵浦光聚焦于蒸气池中央时,激光器工作的斜效率最大,有利于在高功率泵浦时也获得高的光光效率。此外,随着泵浦光聚焦光斑的减小,阈值泵浦功率不断降低,最小阈值泵浦功率的泵浦光聚焦位置位于蒸气池前端 0.75 mm 左右处。考虑到热透镜效应的影响,本文更侧重于模式匹配的定性实验研究和预测,下一步工作会通过改善热透镜效应对模式匹配进行更细致的定量研究。

参考文献:

- [1] KRUPKE W F, BEACH R J, KANZ V K, *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(23): 2336-2338.
- [2] PAGE R H, BEACH R J, KANZ V K, *et al.*. First demonstration of a diode-pumped gas (alkali vapor) laser[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Baltimore, Maryland, USA, 2005, (UV and Visible Lasers)*, pp. CMAA1.
- [3] ZHDANOV B V, KNIZE R J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(15): 2167-2169.
- [4] ZHDANOV B V, STOOKE A, BOYADJIAN G, *et al.*. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(5):414-415.
- [5] ZHDANOV B V, SHAFFER M K, KNIZE R J. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(17): 14767-14770.
- [6] ZWEIBACK J, KOMASHKO A, KRUPKE W F. Alkali vapor lasers [J]. *SPIE*, 2010, 7581: 75810G.
- [7] BOGACHEV A V, GARANIN S G, DUDOV A M, *et al.*. Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(2): 95-98.
- [8] 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.
- [9] YANG Z N, WANG H Y, HUA W H, *et al.*. Diode pumped rubidium vapor laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2273-2274. (in Chinese)
- [9] 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.
- XU CH, TAN R Q, LI ZH Y, *et al.*. 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1):0102009. (in Chinese)
- [10] 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.
- LI ZH Y, TAN R Q, HUANG W, *et al.*. Diode pumped cesium vapor laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 010102. (in Chinese)
- [11] ZHDANOV B V, EHRENREICH T, KNIZE R J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, 260: 696-698.
- [12] 徐艳, 陈飞, 谢冀江, 等. 半导体抽运铯蒸气激光器阈值特性分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 174201.
- XU Y, CHEN F, XIE J J, *et al.*. Analysis on threshold characteristics of a diode-pumped Cs vapor laser [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(17): 174201. (in Chinese)

作者简介:



谢冀江(1950—),男,江苏镇江人,学士,研究员,硕士生导师,1983年于哈尔滨科学技术大学获得学士学位,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。Email: laserxjj@163.com



徐艳(1988—),女,陕西西安人,硕士研究生,2012年于西北工业大学获得学士学位,主要从事碱金属蒸气激光器方面的研究。Email: 18792410097@163.com