

# 高功率半导体激光抽运铷蒸气激光器的优化设计

赵晓红<sup>1,2</sup> 王世红<sup>2</sup> 刘万发<sup>1</sup> 谭彦楠<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)  
<sup>2</sup> 北京邮电大学理学院, 北京 100876)

**摘要** 为提高半导体激光抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的输出功率,用三能级速率方程理论对端面抽运半导体激光抽运碱金属铷激光器的输出特性进行了模拟,得到了抽运功率、抽运光带宽、介质温度、长度等参数对激光器输出功率的影响,模拟结果与已有文献的出光实验结果相符,在此基础上提出了抽运光参数确定的条件下,以提高激光输出功率及光-光转换效率为目标的 DPAL 增益池的优化设计参数。

**关键词** 激光器; 半导体激光抽运碱金属蒸气激光器; 激光速率方程; 光-光转换效率

**中图分类号** O432.1+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s102008

## Optimization Design of Laser Diode Pumped Rubidium Vapor Laser for High Output Power

Zhao Xiaohong<sup>1,2</sup> Wang Shihong<sup>2</sup> Liu Wanfa<sup>1</sup> Tan Yannan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)  
<sup>2</sup> School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** The diode pumped alkali rubidium laser is investigated by the three level rate equations for improving the laser output power of diode pumped alkali vapor laser (DPAL). The systemic conditions are considered, including pump power, pump bandwidth, gain medium cell temperature and length. The simulation results are essentially coincident with the existing experiment results. Furthermore, we put forward the optimal design parameters of gain cell for high output power and optical-optical conversion efficiency with a definite pump condition.

**Key words** lasers; diode pumped alkali vapor laser; laser rate equations; optical-optical conversion efficiency

**OCIS codes** 140.1340; 140.3460; 140.3480; 140.3430

## 1 引 言

半导体激光抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)以碱金属(锂、钠、钾、铷、铯等元素)饱和蒸气作为激光介质,综合了传统气体激光器介质流动散热和固体激光采用高功率的半导体激光器阵列(LDA)作抽运源的优势,结构紧凑、量子效率高、介质可循环使用,这些优点使 DPAL 成为有潜力实现高功率输出的激光系统。现阶段 DPAL 研究较多的为铷和铯,激光波长分别为 795 nm 和 895 nm,两种波长均位于大气窗口,大气传输性能好,能满足很多高功率激光应用领域的需要。

2003 年,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)Krupke 等<sup>[1]</sup>提出 DPAL 理论并使用掺钛蓝宝石激光作为抽运源获得了铷激光输出,2004 年,该实验室 Beach 等<sup>[2]</sup>报道了掺钛蓝宝石激光抽运铯蒸气激光器的实验和理论研究。2005 年,该实验室首次实现了真正的半导体激光(LD)抽运铷激光输出<sup>[3]</sup>。各国研究单位相继报道了 DPAL 的实验及理论研究,如美国空军学院获得了 17 W 的铷激光<sup>[4]</sup>和 48 W 的铯激光<sup>[5]</sup>输出,后者光-光转换效率达到了 49%,2012 年,俄罗斯 Bogachev 等<sup>[6]</sup>实现了近千瓦的连续波铯激光输出,光-光转换效率

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-17

基金项目: 中国科学院化学激光重点实验室开放课题基金

作者简介: 赵晓红(1964—),女,博士,教授,主要从事激光物理及非线性光学等方面的研究。

E-mail: x\_zhao@bupt.edu.cn

为 48%。

随着国外 DPAL 研究的发展,国内也展开了对 DPAL 的理论研究<sup>[7-11]</sup>,但实验研究起步较晚。2011 年,国防科学技术大学<sup>[12]</sup>实现了 LD 抽运铷激光出光实验,输出激光功率为 600 mW,斜率效率为 1.7%。2012 年,中国科学院电子所<sup>[13]</sup>获得了功率 2.8 W 的线偏振铷激光输出,光-光转换效率为 21%,斜率效率为 32%。为了进一步提高 DPAL 的输出功率,需要使用更高功率、更窄带宽的 LDA 作抽运源,并改进抽运源光束整形系统,优化抽运光与谐振腔的模式匹配,这方面需要更深入的理论和实验研究。

本文根据中国科学院电子所的实验参数,用速率方程理论对该激光系统的输出特性进行了模拟,模拟结果与该实验结果符合较好,验证了理论分析模型的正确性,在此基础上,对常压缓冲气体增益池及抽运光功率一定的条件下,提出了提高 DPAL 输出功率的优化设计参数。

## 2 DPAL 三能级速率方程模型

DPAL 为三能级结构,对于铷原子, $5^2S_{1/2}$  态为基态能级,激光上能级  $5^2P_{1/2}$  和激发态能级  $5^2P_{3/2}$  为由于自旋-轨道相互作用而产生的精细结构能级<sup>[1]</sup>。常温下  $5^2P_{3/2}$  能级多普勒线宽很窄,为 0.00116 nm,

通常充入缓冲气体氦气使跃迁谱线加宽以实现铷原子对抽运光的有效吸收,基态铷原子在抽运光作用下被有效抽运到  $5^2P_{3/2}$  能级 ( $D_2$  线,波长为 780 nm), $5^2P_{3/2}$  能级的粒子通过与缓冲气体(乙烷或烃类小分子气体)的碰撞和自旋耦合,迅速弛豫到激光上能级  $5^2P_{1/2}$  态上,在  $5^2P_{1/2} - 5^2S_{1/2}$  间形成粒子数反转,产生激光( $D_1$  线,波长为 795 nm)。根据 Beach 三能级系统的速率方程模型<sup>[2]</sup>,其稳态时各能级粒子数方程可表示为

$$\frac{dn_1}{dt} = 0 = -\Gamma_P + \Gamma_L + n_2/\tau_{D1} + n_3/\tau_{D2}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = 0 = -\Gamma_L - n_2/\tau_{D1} + \gamma_{\text{mix}} \left[ n_3 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) n_2 \right], \quad (2)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = 0 = \Gamma_P - n_3/\tau_{D2} - \gamma_{\text{mix}} \left[ n_3 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) n_2 \right], \quad (3)$$

式中  $n_1, n_2, n_3$  分别为  $5^2S_{1/2}, 5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  能级的粒子数密度,总粒子数密度  $n_0 = n_1 + n_2 + n_3$ ,  $\tau_{D1}$  和  $\tau_{D2}$  分别为  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  能级的寿命,  $\Delta E = 237.5 \text{ cm}^{-1}$ , 为  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  的能级差,  $T$  为绝对温度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $\gamma_{\text{mix}}$  为精细结构混合速率,  $\Gamma_P$  为抽运速率,通过对抽运光光谱范围积分给出:

$$\Gamma_P = \frac{\eta_{\text{mode}} \eta_{\text{del}}}{V_L} \int d\lambda \frac{1}{hc/\lambda} \frac{dP_P}{d\lambda} \{1 - \exp[-(n_1 - 0.5n_3)\sigma_{D2}(\lambda)l]\} \{1 + R_P \exp[-(n_1 - 0.5n_3)\sigma_{D2}(\lambda)l]\}, \quad (4)$$

式中  $\eta_{\text{mode}}$  为抽运光与激光的模式匹配因子,  $\eta_{\text{del}}$  为抽运能量到增益介质的传递效率,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为波长,  $\frac{dP_P}{d\lambda}$  为单位波长的抽运功率,考虑抽运光谱线为高斯线型,  $\sigma_{D1}(\lambda)$  和  $\sigma_{D2}(\lambda)$  分别为  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  能级展宽后的散射截面和吸收截面,  $R_P$  为抽运光通过增益池的单程反射率,  $l$  为增益介质长度,  $t$  为介质的单程透射率,  $V_L$  增益介质内激光模体积。(1)式和(2)式中  $\Gamma_L$  为与激光光子数密度有关的激光发射速率,与激光功率的关系为

$$\Gamma_L = \frac{1}{V_L} \frac{P_L}{h\nu_L} \frac{R_{\text{oc}}}{1 - R_{\text{oc}}} \left( \frac{1}{\sqrt{t^2 R_{\text{oc}}}} - 1 \right) \left( 1 + \sqrt{\frac{t^2}{R_{\text{oc}}}} \right), \quad (5)$$

式中  $P_L$  为激光输出功率,  $R_{\text{oc}}$  为耦合输出镜反射率。激光稳定输出时,  $\Gamma_L$  为

$$\frac{d\Gamma_L}{dt} = 0 = \{R_{\text{oc}} t^2 \exp[2l(n_2 - n_1)\sigma_{D1}(\lambda)l] - 1\} \cdot \frac{\Gamma_L}{\tau_{\text{RT}}} + n_2 c^2 \sigma_{D1}(\lambda) h\nu_L / V_L, \quad (6)$$

式中  $\tau_{\text{RT}}$  为谐振腔寿命,  $\nu_L$  为激光频率。

## 3 模拟计算结果

根据抽运光、谐振腔和增益池的参数,数值求解(1),(2),(3),(6)式组成的微分方程组,解出稳态时各能级粒子数和激光发射速率  $\Gamma_L$ ,即可计算激光输出功率,改变参数可以定量分析抽运光带宽、介质增益池温度、长度和输出镜反射率等对激光输出功率和光-光转换效率的影响,在此基础上根据抽运光参数设计增益池的 DPAL 优化参数。

### 3.1 2.8 W 的线偏振铷激光实验的模拟结果

2012 年,中国科学院电子所<sup>[13]</sup>报道了功率为 2.8 W 的线偏振铷激光输出实验,光-光转换效率为 21%,斜率效率为 32%,激光光斑半径为 0.2 mm。该系统实验条件如下:增益池介质温度为 145 ℃,介质长度为 7 mm,注入甲烷为 79 kPa,耦合输出镜反射率为 0.3,注入增益池介质的抽运光功率为 13 W,带宽为 0.13 nm,抽运光光腰处的面积为 0.42 mm<sup>2</sup> (0.6 mm×0.7 mm),由文献[13]中图 6 所示的增益池内抽运光光斑与谐振腔腔模光斑大小分布可以估计出抽运光和激光模式匹配率约为 0.45,文中未提供抽运光单向损耗率,通过估算,假设抽运光单向透射率为 0.95(增益池两端界面等损耗)。

按上述实验参数,在不同抽运功率下对三能级系统的速率方程(1),(2),(3),(6)式进行数值计算求解,得到激光输出功率和光-光转换效率随抽运功率的变化,如图 1 所示。图中对应实验中的抽运光功率为 13 W,激光功率约为 2.8 W,光-光转换效率为 23%,与实验结果基本相符。在数值计算中抽运光功率计算到 50 W,激光功率随着抽运功率的增加近似呈线性增加趋势。激光功率输出功率随介质温度变化的计算结果如图 2 所示,在该实验参数下,模拟得到输出功率在 145 ℃附近达到极大值,与文献[13]中图 8 的实验结果相符。图 3 为不同耦合反射率下输出功率随抽运光功率变化的计算结果,耦合反射率在 30% 时,斜率效率达到最佳值,以上计算结果与文献[13]中图 7 的实验结果及文献[2]中图 4 的实验测量和理论计算结果一致。

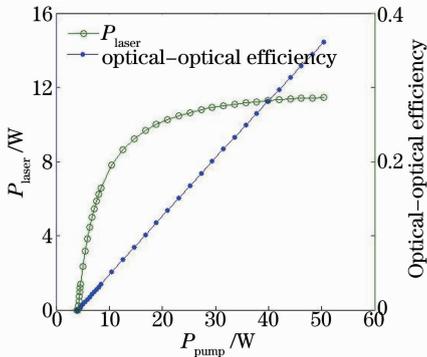


图 1 激光输出功率及光-光转换效率随抽运功率的变化  
Fig. 1 Laser output power and optical-optical conversion efficiency as a function of incident pump power

### 3.2 增益池长度对激光转换效率的影响

由于介质对抽运光的吸收,抽运光随增益池长度增加而衰减,理论上在一定的抽运光功率下,对于

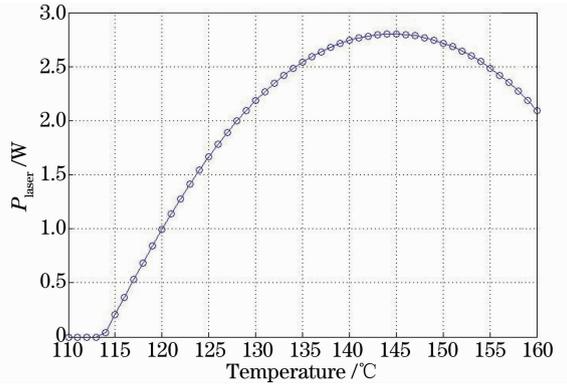


图 2 激光输出功率随介质温度的变化  
Fig. 2 Laser output power as a function of gain media temperature

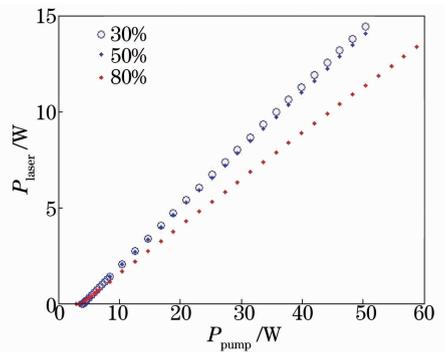


图 3 激光输出功率随耦合输出镜反射率的变化  
Fig. 3 Laser output power as a function of input pump power for output coupler reflectivity

吸收效率,增益池长度有最佳值,增加抽运光功率,最佳值随之增加,图 4 为不同抽运光功率下光-光转换效率随增益池长度的变化,其他条件为:增益池介质温度为 145 ℃,注入甲烷为 79 kPa,耦合输出镜反射率为 0.3,抽运光带宽 0.13 nm。由图可知,功率为 2.8 W 的铷激光出光实验<sup>[13]</sup>选用的介质长度

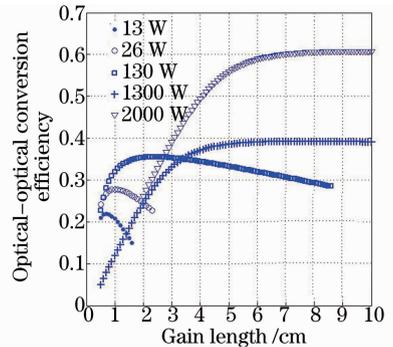


图 4 不同抽运光功率下光-光转换效率随增益池长度的变化

Fig. 4 Optical-optical conversion efficiency as a function of gain media length for different incident pump powers

7 mm 在该实验所用功率为 13 W 的抽运光下可以获得最大光-光转换效率,增加介质长度光-光转换效率开始下降,表明此时大部分抽运光已被消耗。增加抽运光功率是实现高功率激光的最直接手段。模拟结果表明,随着抽运光功率的增加,最大光-光转换效率对应的介质长度随之增加,抽运光功率达到 2000 W 时,介质长度为 6 cm 时可达最大光-光转换效率,因此设计激光器时需要根据抽运光功率选择适当的增益池长度。

### 3.3 抽运光带宽对激光转换效率的影响

目前作为抽运源的高功率半导体激光器带宽为 0.5~2.0 nm,以往文献的实验和理论证明,压缩 LD 线宽和加入缓冲气体通过碰撞使  $5^2P_{3/2}$  能级展宽是提高激光转换效率的有效手段,但 LD 线宽的进一步压缩要以提高成本为代价,而碰撞展宽一方面可以增加介质对抽运光的吸收,但另一方面使吸收截面减小,实验中需要合理选择缓冲气体气压。利弗莫尔国家实验室 Krupke 等<sup>[1]</sup>采用窄线宽(1 MHz)的钛宝石激光器模拟 LD 抽运得到 81%斜率效率,美国空军学院 Zhdanov 等在实验中用带宽 10 GHz(0.02 nm)LD 抽运光,增益池中加入缓冲气体氦和甲烷,得到 53%的斜率效率<sup>[4]</sup>,用 0.35 nm 带宽 LD 抽运光,得到 28%的斜率效率<sup>[14]</sup>。在计算抽运光带宽对激光输出功率影响时,根据已有文献<sup>[3,13]</sup>中常压的实验和计算结果,缓冲气体氦气压选择 87.8 kPa,甲烷气压选择 13.3 kPa,共 100.1 kPa,输出耦合镜反射率  $R_{oc}$  为 0.3,增益池长度为 5 cm,温度 145 °C,图 5 为不同抽运光带宽下激光输出功率随抽运功率的变化曲线,抽运光功率大于阈值抽运功率后,激光功率随抽运功率近似线性增加,斜率效率随抽运带宽增大而减小,抽运功率

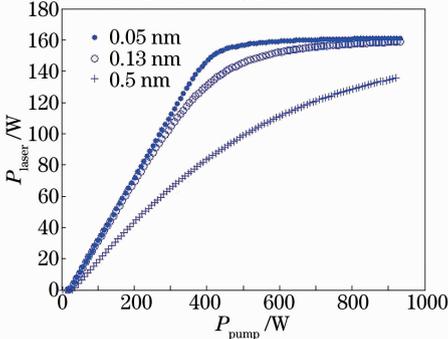


图 5 介质长度 5 cm 时不同抽运光带宽下激光输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 5 Laser output power as a function of pump power with gain media length of 5 cm

继续增加斜率效率明显减小,并随抽运带宽增大逐渐达到饱和。

### 3.4 在高功率抽运光下铷蒸气激光器参数优化

针对功率 1000 W 和带宽为 0.5 nm 的抽运光,以得到最大输出功率为目标,通过理论计算得到了温度和介质长度的优化参数。图 6 为介质长度 5 cm 时激光输出功率随温度的变化曲线,缓冲气体气压等参数同图 5,温度较低时,铷蒸气饱和蒸气压决定的铷原子粒子数密度较低,导致激光输出功率很低。随着温度增加,铷原子粒子数密度明显增加,并且  $5^2P_{3/2}$  能级碰撞展宽增加,激光输出功率明显增加,但随着吸收截面随温度增加而减小,最佳温度为 190 °C~200 °C,光-光转换效率达到 68%左右,温度高于 200 °C 时,激光输出功率开始减小。图 7 为温度 190 °C 时激光输出功率随介质长度的变化曲线,介质长度为 5~6 cm 时对应最大的激光输出功率,介质长度继续增加,由于之前抽运光的消耗,激光输出功率开始下降。综合以上结果确定的该抽运

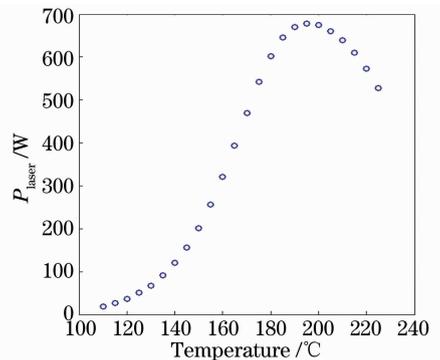


图 6 介质长度为 5 cm 时激光输出功率随介质温度的变化曲线

Fig. 6 Laser output power as a function of gain media temperature with gain media length of 5 cm

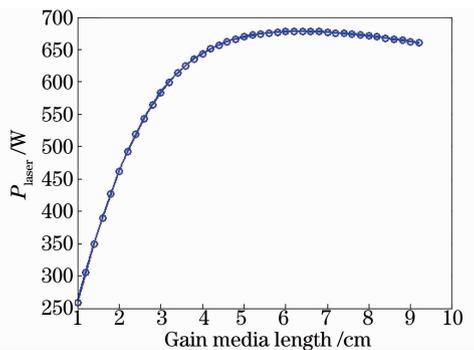


图 7 介质温度为 190 °C 时激光输出功率随介质长度的变化曲线

Fig. 7 Laser output power as a function of gain media length at temperature of 190 °C

条件下的铷蒸气激光器优化参数如表 1 所示。图 8 为该优化参数下激光输出功率和光-光转换效率随抽运功率的变化,抽运光功率为 1000 W 左右,光-光转换效率达到最大,约为 70%,抽运光功率为 1200 W 时,光-光转换效率有减小趋势,因此当抽运光功率有较大变化时,需要重新计算优化参数。

表 1 铷蒸气激光优化参数

Table 1 Atomic Rb vapor laser optimized parameters

Parameter	Parameter value
Cell temperature / °C	190
Cell length / cm	5.0
Rb number density / $\text{cm}^{-3}$	$6.14 \times 10^{14}$
Hepressure at room temperature / kPa	87.8
Methane pressure at room temperature / kPa	13.3
FWHM of $\text{D}_2$ line / nm	0.043
Peak cross section of $\text{D}_2$ line / $\text{cm}^2$	$5.52 \times 10^{-13}$
Peak cross section of $\text{D}_1$ line / $\text{cm}^2$	$2.86 \times 10^{-13}$

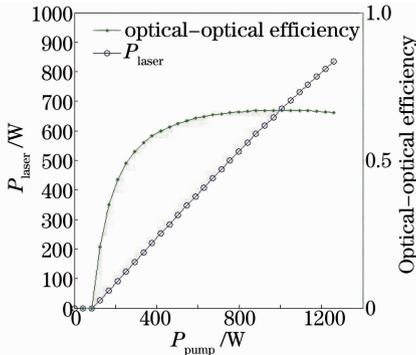


图 8 优化参数下激光输出功率及光-光转换效率随抽运功率的变化

Fig. 8 Laser output power and optical-optical conversion efficiency as a function of input pump power with the optimized parameter

## 4 结 论

以速率方程模型为基础,研究了 三能级结构 DPAL 铷蒸气激光器系统运转过程中抽运功率、介质长度与温度等对激光输出功率和光-光转换效率的影响,计算结果表明以高输出功率为目标的 DPAL 的设计,需要考虑抽运功率、抽运光线宽等条件,在抽运源一定的情况下,对增益池长度、温度、缓冲气体气压及谐振腔等参数进行优化,才能达到最大的激光功率和光-光转换效率。

## 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 J Beach, W F Krupke. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling[J]. *Journal of the Optical Society of America B (Optical Physics)*, 2004, 21(12): 2151-2163.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 A V Bogachev, S G Garanin, A M Dudov, *et al.*. Diode-pumped cesium vapor laser with closed-cycle laser-active medium circulation[J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(2): 95-98.
- 7 Zhu Qiang, Yu Jianhua, Quan Hongyan, *et al.*. Theoretical analysis of high-power diode laser pumped alkali vapor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 85-88.
- 8 祝强, 余建华, 全鸿雁, 等. 高功率半导体激光抽运碱金属蒸气激光器的理论模拟[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S): 85-88.
- 9 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): 2052-2057.
- 10 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): 2052-2057.
- 11 Zhu Qi, Pan Bailiang, Chen Li, *et al.*. A kinetic model for optical pumped cesium vapor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1797-1801.
- 12 朱琦, 潘佰良, 陈立, 等. 光泵铯蒸气激光器的动力学模型[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1797-1801.
- 13 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 43(7): 46-51.
- 14 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, 43(7): 46-51.
- 15 Xie Xiying, Lei Hong, Zhang Xiang, *et al.*. Key technologies of alkali lasers and its future development[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3): 582-590.
- 16 谢希盈, 雷甸, 张翔, 等. 碱金属激光器问题分析与研究展望[J]. *应用光学*, 2011, 32(3): 582-590.
- 17 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.
- 18 杨子宁, 王红岩, 毕卫红, 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.
- 19 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, *et al.*. 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0102009.
- 20 李志永, 谭荣清, 徐程, 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.
- 21 J Zweiback, A Komashko, W F Krupke. Alkali vapor lasers[C]. *SPIE*, 2010, 7581: 75810G.

栏目编辑:殷建芳