

半导体激光端面抽运碱金属蒸气放大器的理论研究

蒋志刚 王 澈 蔡 和 韩聚洪 高 明 安国斐 薛亮平 张 伟 周 杰 王宏元

西南技术物理研究所, 四川 成都 610000

摘要 简要概述了半导体激光器抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的研究背景与独特优势,介绍了DPAL主振荡功率放大器(MOPA)在国内外的发展现状。构建了基于碱金属原子三能级受激吸收-受激辐射理论的端面抽运DPAL-MOPA系统的速率方程模型并进行了系统的理论计算,分析了DPAL-MOPA的输出功率和提取效率随蒸气池温度、蒸气池长度、抽运功率和抽运光束的束腰半径的变化特性。与已发表的实验结果对比后发现,理论计算结果和实验数据十分吻合,验证了该理论模型的有效性。该研究对构建定标放大的DPAL系统具有理论指导意义。

关键词 激光器;主振荡功率放大器;三能级系统速率方程;半导体抽运碱金属激光器;定标放大

中图分类号 TN248.2; TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202007

Theoretical Analyses of an Alkali Vapor Amplifier End-Pumped by Diode Lasers

Jiang Zhigang Wang You Cai He Han Juhong Gao Ming An Guofei

Xue Liangping Zhang Wei Zhou Jie Wang Hongyuan

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract After the introduction of technical background and unique merits of a diode-pumped alkali laser (DPAL), the present research conditions are described in development of master oscillator power-amplifier (MOPA) for DPALs. The systematic calculation is carried out after construction of a rate-equation model of an end-pumped DPAL-MOPA system using the three-level stimulated absorption-stimulated emission theory of an alkali atom. The output power and extraction efficiency are analyzed when the temperature, cell length, pump power, and waist radius are varied, respectively. Compared with the experimental data, the calculated results are in coincident with them, which demonstrates the developed model is effective. The research is thought to be useful in realization of the power scaling of a DPAL system.

Key words lasers; master oscillator power-amplifier; rate-equation of the three-level system; diode-pumped alkali laser; scaling magnification

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.1340; 140.3430

1 引 言

近年来,随着国防和民用领域对高功率激光器需求的不断增加,高功率激光技术得到了迅速的发展。但是,在目前常见的几种高功率激光器中,化学激光器有着介质危险、体积庞大等缺点,固体激光器存在较为严重的热致物理效应,而光纤激光器中的非线性效应和端面损伤则影响了其输出功率的提高^[1-4]。面对这样的现状,美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)的 Krupke 等^[5-7]提出了半导体激光器抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的概念。作为一种新型高效的激光器,DPAL具有饱和增益大、斯托克斯效率高、光-光转换效

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26

作者简介: 蒋志刚(1989—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光抽运碱金属激光等方面的研究。

E-mail: 741777293@qq.com

导师简介: 王澈(1966—),男,博士,研究员,主要从事激光物理、激光技术、导波光学以及光学工程等方面的研究。

E-mail: youwang_2007@aliyun.com(通信联系人)

率高、热效应小、激光介质无毒、结构简单和重量轻等显著优点,得到了越来越广泛的关注^[8-18]。

高功率化是 DPAL 自诞生之日起就被密切关注的问题。与常规固体和光纤激光器相比, DPAL 的饱和增益系数较高,因此一些研究人员考虑把已经广泛应用于固体激光器的主振荡功率放大器(MOPA)技术扩展到高功率 DPAL 领域来实现激光功率的定标放大^[19-21]。由于采用 MOPA 结构获得的高能量脉冲激光与种子激光光源的波长和重复频率相同,而且时域脉冲的形状和宽度也可大体维持不变^[22],因而 MOPA 技术在实现 DPAL 的高脉冲能量、高平均输出功率时是较为理想的选择。

迄今为止,世界范围内只有美国空军研究院(USFA)的 Zhdanov 等^[20-21]开展过 DPAL-MOPA 的实验研究,但均未进行过理论方面的分析研究。国内开展 DPAL-MOPA 理论研究的科研团队相对较少。国防科技大学 Yang 等^[23-25]对侧面抽运的 MOPA 系统进行了理论分析;另外,浙江大学的 Pan 等^[26]还对端面抽运 DPAL 的 MOPA 结构进行过相应的理论计算,但是在精细结构混合速率的计算中碱金属和缓冲气体的原子质量出现了混淆,在激光模体积和抽运吸收截面的表达上亦存在着一定的偏差。本文通过建立精细的激光放大器动力学模型,对端面抽运的 DPAL-MOPA 系统进行了系统的理论计算和分析,并将模拟结果和文献[21]中的实验数据进行了比较,验证了所构建的理论模型的有效性。

2 DPAL-MOPA 模型的构建

因为 MOPA 放大过程和激光振荡的动力学过程有着一定的相似性,所以以文献[27]中所描述的 DPAL 激光动力学模型为基础构建 DPAL-MOPA 的理论模型。由于乙烷兼有展宽抽运吸收线宽和加快精细结构碰撞速率的效应,在理论模拟中,仅使用乙烷作为缓冲气体,而省略 DPAL 研究中经常使用的氦气。为了简化计算,可以假设:

- 1) 抽运光强在与光轴垂直的方向上呈高斯分布且在光轴方向上保持不变;
- 2) 蒸气池内激光介质的温度分布均匀;
- 3) 蒸气池端窗损耗和传输损耗对光强没有影响;
- 4) 种子光传输时其光束半径不变。

由于 DPAL 的振荡过程和 MOPA 的增益过程有所不同,所以用 Γ_A 来代替文献[27]速率方程中的 Γ_L , 碱金属原子三能级受激吸收-受激辐射过程的速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= -\Gamma_p + \Gamma_A + \frac{n_2}{\tau_{D_1}} + \frac{n_3}{\tau_{D_2}}, \\ \frac{dn_2}{dt} &= -\Gamma_A + \gamma_{2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}}(T) \left\{ [n_3 - n_2] - \left[2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) - 1 \right] n_2 \right\} - \frac{n_2}{\tau_{D_1}}, \\ \frac{dn_3}{dt} &= \Gamma_p - \gamma_{2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}}(T) \left\{ [n_3 - n_2] - \left[2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) - 1 \right] n_2 \right\} - \frac{n_3}{\tau_{D_2}}, \\ n_{\text{tot}} &= n_1 + n_2 + n_3, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 τ_{D_1} 和 τ_{D_2} 分别为碱金属原子 $P_{1/2}$ 和 $P_{3/2}$ 能级的寿命, k_B 为玻尔兹曼常数, T 是密闭蒸气池的温度, ΔE 表示能级间隔, n_{tot} 为腔内碱金属蒸气总粒子数密度, n_1 , n_2 和 n_3 分别为 $S_{1/2}$, $P_{1/2}$ 和 $P_{3/2}$ 能级的粒子数分布密度, $\gamma_{2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}}$ 表示精细结构混合速率, 为

$$\begin{aligned} \gamma_{2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}} &= n_{\text{ethane}} \sigma_{2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}}^{\text{ethane-X}} \nu_r^{\text{ethane-X}}, \\ \nu_r^{\text{ethane-X}} &= \left[3k_B T \left(\frac{1}{m_X} + \frac{1}{m_{\text{ethane}}} \right) \right]^{1/2}, \quad X = K, Rb, Cs, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, n_{ethane} 表示蒸气池内乙烷的粒子数密度, $\sigma_{2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}}^{\text{ethane-X}}$ 为精细结构混合速率, $\nu_r^{\text{ethane-X}}$ 为碱金属原子与缓冲气体粒子的平均相对热运动速率, m_{ethane} 和 m_X 分别表示乙烷分子和碱金属原子的质量, Γ_p 和 Γ_A 分别表示抽运吸收速率和激光放大速率, 满足

$$\Gamma_p = \frac{\eta_{\text{mode}} \eta_{\text{del}}}{V_A} \int_0^{+\infty} \frac{\lambda}{hc} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(n_1 - \frac{n_3}{2} \right) \sigma_{D_2}(\lambda) L \right] \right\} P_p d\lambda, \quad (3)$$

$$\Gamma_A = \frac{1}{V_{\text{seed}}} \frac{P_{\text{seed}} \left\{ \exp \left[(n_2 - n_1) \sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}} L \right] - 1 \right\}}{h\nu_{\text{seed}}}, \quad (4)$$

其中, η_{del} 为单程介质损耗率, $\sigma_{D_2}(\lambda)$ 为不同波长对应的吸收截面, L 表示蒸气池的长度, c 为真空中的光速, λ 表示抽运光束的波长, h 为普朗克常数, P_{seed} 为种子光功率, ν_{seed} 是种子光频率, V_A 为放大后激光的模体积, V_{seed} 为种子光模体积, 由模型假设条件可知, V_A 与 V_{seed} 在数值上相等, η_{mode} , P_p 和 $\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}$ 分别是模式匹配效率^[28], 光谱呈高斯分布的抽运激光和缓冲气体碰撞加宽后的原子截面, 分别表示为

$$\eta_{\text{mode}} = \frac{\frac{\omega_A^2 \left(\frac{\omega_A^2}{\omega_p^2} + 2 \right)}{\omega_p^2 \left(\frac{\omega_A^2}{\omega_p^2} + 2 \right)}}{\left(1 + \frac{\omega_A^2}{\omega_p^2} \right)^2}, \quad (5)$$

$$P_p = P_{\text{pump}} \sqrt{4 \frac{\ln 2}{\pi}} \frac{1}{\Delta\lambda_p} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{\Delta\lambda_p^2} \right], \quad (6)$$

$$\sigma^{\text{ethane-broadened}} = \frac{\Delta\nu_{\text{FWHM}}^{\text{radiative}}}{\Delta\nu_{\text{FWHM}}^{\text{ethane-broadened}}} \sigma^{\text{radiative}}, \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} \Delta\nu_{\text{FWHM}}^{\text{radiative}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{radiative}}} \\ \Delta\nu_{\text{FWHM}}^{\text{ethane-broadened}} = \Gamma^{\text{ethane-X}} P_{\text{ethane}}, \quad X = \text{K, Rb, Cs} \end{cases}, \quad (8)$$

ω_A 和 ω_p 分别表示放大后激光和抽运光的束腰半径, λ_p 和 $\Delta\lambda_p$ 分别表示抽运光的中心波长和线宽, (8) 式中的 $\sigma^{\text{radiative}}$ 为原子自然辐射截面, $\Gamma^{\text{ethane-X}}$ 为相应碰撞截面的能量转移参数^[29], P_{ethane} 为蒸气池内乙烷气体的压强, $\Delta\nu_{\text{FWHM}}^{\text{radiative}}$ 和 $\Delta\nu_{\text{FWHM}}^{\text{ethane-broadened}}$ 分别表示原子自然谱宽和原子加宽后谱宽, $\tau_{\text{radiative}}$ 为原子的能级寿命。将(8)式代入(7)式, 可得到吸收截面 $\sigma_{D_2}^{\text{ethane-broadened}}$ 和发射截面 $\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}$ 的表达式, 即

$$\sigma_{D_2}^{\text{ethane-broadened}} = \frac{\sigma_{D_2}^{\text{radiative}}}{2\pi\tau_{D_2} P_{\text{ethane}} \Gamma_{D_2}^{\text{ethane-X}}}, \quad (9)$$

$$\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}} = \frac{\sigma_{D_1}^{\text{radiative}}}{2\pi\tau_{D_1} P_{\text{ethane}} \Gamma_{D_1}^{\text{ethane-X}}}. \quad (10)$$

(3) 式中的 $\sigma_{D_2}(\lambda)$ 可表示为

$$\sigma_{D_2}(\lambda) = \frac{\sigma_{D_2}^{\text{ethane-broadened}}}{1 + 4 \left(\frac{\lambda - \lambda_{D_2}}{\Delta\lambda_{D_2}^{\text{FWHM}}} \right)^2}, \quad (11)$$

式中 λ_{D_2} 和 $\Delta\lambda_{D_2}^{\text{FWHM}}$ 分别表示抽运吸收线的中心波长和线宽。

选取处于饱和状态下的铷金属蒸气作为 MOPA 密闭蒸气池内的增益介质, 其饱和浓度受温度影响的表达式为^[30]

$$n_{\text{tot}} = \begin{cases} 133.32237 \frac{N_A}{RT} 10^{-94.04826 - \frac{1961.2581}{T} - 0.037716877T + 42.57526 \lg T}, & T \leq 38.89 + 273.15 \\ 133.32237 \frac{N_A}{RT} 10^{15.88253 - \frac{4529.635}{T} + 0.000586637T - 2.99138 \lg T}, & T > 38.89 + 273.15 \end{cases}, \quad (12)$$

式中 N_A 是阿伏伽德罗常数, R 是理想气体常数。

利用上述公式求解(1)式的粒子数分布密度 n_1 , n_2 和 n_3 , 再代入(13)~(15)式可得到放大后的激光功率、增益系数和抽运光的提取效率, 即

$$P_{out} = P_{seed} \exp[L\sigma_{D_1}^{ethane-broadened}(n_2 - n_1)], \quad (13)$$

$$G = \frac{P_{out}}{P_{seed}}, \quad (14)$$

$$\eta = \frac{P_{out} - P_{seed}}{P_{pump}}. \quad (15)$$

3 理论计算结果与分析

3.1 模拟结果

利用所建立的理论模型,分析了放大后的激光功率和提取效率随蒸气池温度、抽运功率、蒸气池长度等改变而变化的规律。

放大后的激光功率和提取效率随蒸气池温度的变化如图1所示,可以看出,当温度增大时输出功率和提取效率都呈先增大后减小趋势,两者的最大值都为130℃,因此在MOPA工作时应存在最佳的蒸气池温度。

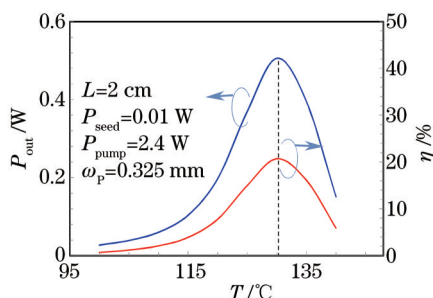


图1 放大后的激光功率和提取效率随蒸气池温度的变化曲线

Fig.1 Changing of output power and extraction efficiency with cell temperature

图2所示是蒸气池温度分别为120℃和130℃时放大后的激光功率以及提取效率随蒸气池长度的变化曲线。结果表明,当蒸气池长度不断增加时,输出功率和提取效率先增大至最大值后逐渐减小,当蒸气池超过一定长度时输出功率降为0,此时放大器无激光输出。另外,温度为120℃时MOPA内部蒸气池的最佳长度为3.5 cm,而温度在130℃时此最佳长度为2.0 cm。可见,DPAL-MOPA蒸气池的最佳长度随温度的不同而不同。

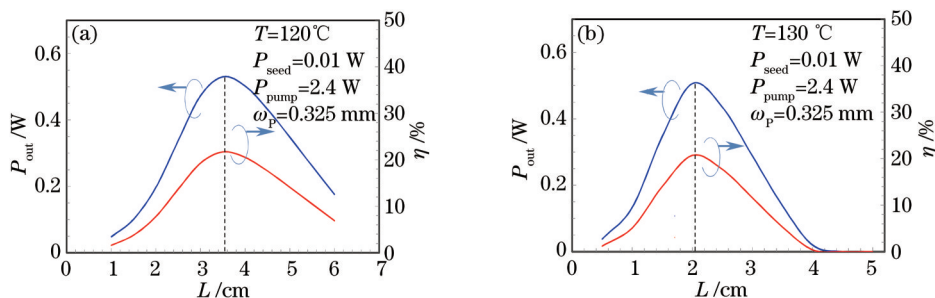


图2 放大后的激光功率和提取效率随蒸气池长度的变化曲线。(a) 120℃; (b) 130℃

Fig.2 Changing of output power and extraction efficiency with cell length. (a) 120℃; (b) 130℃

图3所示为最佳蒸气池长度和此长度下放大后的激光功率随蒸气池温度的变化曲线。可以看到,蒸气池的温度改变时,与之对应的最佳蒸气池长度和此长度下的输出功率都发生相应的改变。这就意味着在设计实际的DPAL-MOPA系统时,需要根据放大后的激光功率参数决定蒸气池的具体尺寸和所需的加热温度。

蒸气池温度为130℃时放大后的激光输出功率和提取效率随抽运功率的变化规律如图4所示。结果表明,当抽运功率增大时,输出功率随之增大并逐渐趋于饱和,但是提取效率则先增至某一最大值后逐渐减小。

图5所示的是蒸气池温度为130℃时放大后的激光功率和提取效率随抽运光束束腰半径的变化曲线。结果显示,两者均随抽运光束束腰半径的增大而减小,此趋势是由于抽运吸收速率事实上随抽运功率密度的增大而增大所导致。

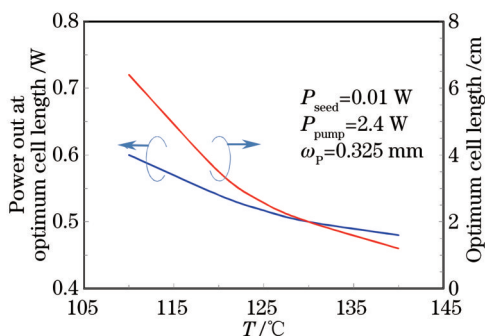


图3 最佳蒸气池长度和此长度下放大后的激光功率随蒸气池温度的变化曲线

Fig.3 Changing of optimum cell length and the corresponding output power with cell temperature

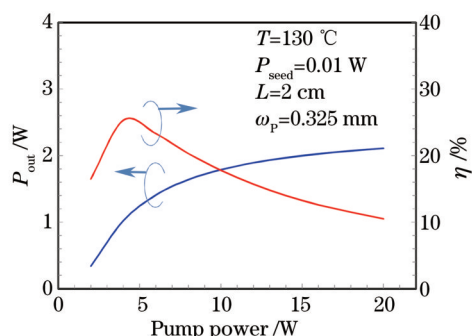


图4 放大后的激光功率和提取效率随抽运功率的变化曲线

Fig.4 Changing of output power and extraction efficiency with pump power

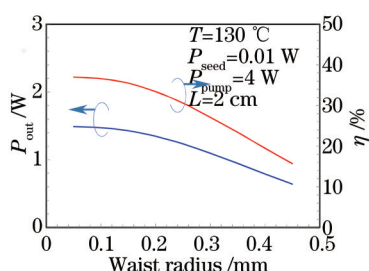


图5 放大后的激光功率和提取效率随抽运光束束腰半径的变化曲线

Fig.5 Changing of output power and extraction efficiency with the waist radius of a pump beam

3.2 理论与实验对比

2008年,美国空军实验室的Hostutler等^[21]发表了端面抽运的DPAL-MOPA实验研究结果,下面将本文的理论计算结果与其取得的实验数据进行对比分析。

图6所示的是文献[21]中的实验光路图,其中OC、HR和PBS分别表示对波长795 nm反射率为20%的输出镜、波长为780 nm的全反镜和偏振分光棱镜,光路中功率为3 W、波长为780 nm的种子光经由一块1:4分束镜分成0.6 W和2.4 W两束光,其中功率为0.6 W的光束经过反射镜和聚焦光路进入激光谐振腔,用于产生波长为795 nm的Rb-DPAL种子光;另一部分功率为2.4 W的光束经过聚焦和起偏光路进入放大器,作为MOPA的抽运源。Rb-DPAL种子激光再经由聚焦和起偏光路进入放大器,从而实现种子DPAL的MOPA放大。实验中密闭蒸气池内充入了450 Torr(1 Torr=133.322 Pa)的乙烷气体和足量的铷金属。

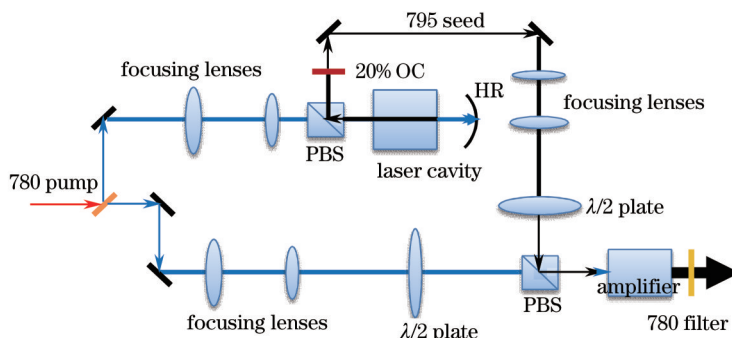


图6 文献[21]中的DPAL-MOPA实验光路图

Fig.6 Experimental setup of a DPAL-MOPA system in Ref.[21]

利用文献[21]中给出的各物理参量,基于所建立的MOPA理论模型模拟了放大后的激光输出特性,理论结果与实验数据对比如图7所示。其中图7(a)表示蒸气池长为1.5 cm时放大后的激光输出功率随种子光功率的改变而变化的曲线图,图中实线代表理论计算值,虚线代表实验值。图7(b)表示的是蒸气池长为2.0 cm时放大后的激光输出功率随种子光功率的改变而变化的曲线图。从图中可以看出当蒸气池的温度为111 °C

时,理论值和实验结果吻合较好,由此可推断所建立的MOPA数学模型具有较好的准确性。

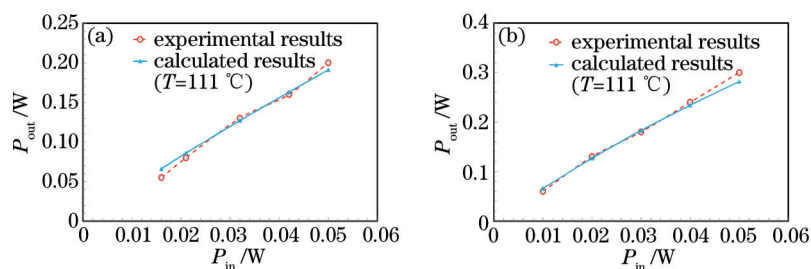


图7 输入-输出特性的实验和理论结果。(a) $L=1.5$ cm; (b) $L=2.0$ cm

Fig.7 Experimental and calculated input-output results. (a) $L=1.5$ cm; (b) $L=2.0$ cm

4 结 论

构建了基于受激吸收和受激辐射理论的DPAL-MOPA数学模型,并研究了碱金属激光的放大物理机制,分析了在不同物理参量下的MOPA输出特性。结果表明,随着蒸气池温度的升高,放大后的激光输出功率呈先增大后减小的变化趋势,这意味着对于某一MOPA系统应该存在着最佳的蒸气池工作温度;随着蒸气池长度的增加,放大后的激光输出功率会出现先增大后减小的趋势,这意味着MOPA系统中的蒸气池存在着最佳长度,而且该最佳长度与蒸气池的温度相关;随着抽运功率的增大,放大后的激光输出功率相应增大;随着抽运光束束腰半径的增大,放大后的激光输出功率和提取效率都呈减小趋势。为了验证所构建的理论模型的准确性,将理论计算结果和前人的实验数据进行了对比分析。可以看到,理论模拟结果和实验数据高度吻合,这就间接证实了所建理论模型的有效性。这一理论研究对将来构建实用型的DPAL定标放大系统具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 B V Zhdanov, T Ehrenreich, R J Knize. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser[J]. Electron Lett, 2008, 44(9): 582-583.
- 2 B V Zhdanov, C Maes, T Ehrenreich, *et al.*. Optically pumped potassium laser[J]. Opt Commun, 2007, 270(2): 353-355.
- 3 R Z Hua, S Wada, H Tashiro. Versatile, compact, TEM₀₀-mode resonator for side-pumped single-rod solid-state lasers[J]. Appl Opt, 2001, 40(15): 2468-2474.
- 4 Y Wang, H Kan. Improvement on evaluating absorption efficiency of a medium rod for LD side-pumped solid-state lasers[J]. Opt Commun, 2003, 226(1-6): 303-316.
- 5 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.
- 6 W F Krupke. Diode Pumped Alkali Laser: US, 6643311[P/OL]. 2003-04-11[2015-09-20]. <http://www.freepatentsonline.com/6643311.html>.
- 7 R H Page, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser[J]. Opt Lett, 2006, 31(3): 353-355.
- 8 Y Wang, T Kasamatsu, Y J 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): 141112-141114.
- 9 W F Krupke. Diode pumped alkali lasers (DPALs)-areview (rev1)[J]. Prog Quant Electron, 2012, 36(1): 4-28.
- 10 J H Han, Y Wang, H Cai, *et al.*. Algorithm for evaluation of temperature distribution of a vapor cell in a diode-pumped alkali laser system: Part I[J]. Opt Express, 2014, 22(11): 13988-14003.
- 11 J H Han, Y Wang, H Cai, *et al.*. Algorithm for evaluation of temperature distribution of a vapor cell in a diode-pumped alkali laser system: Part II[J]. Opt Express, 2015, 23(7): 9508-9515.
- 12 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 051405.
- 13 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.
- 14 Yu Jianhua, Zhu Qiang, Xie Wu, *et al.*. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 40(1): 0102009.

- 2006, 43(7): 46-51.
- 余建华, 祝 强, 谢 武, 等. 高功率半导体激光抽运碱金属蒸气激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(7): 46-51.
- 15 B Zhdanov, R J Knize. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser[J]. Opt Lett, 2007, 32(15): 2167-2169.
- 16 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.
- 17 B V Zhdanov, J Sell, R J Knize. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. Electron Lett, 2008, 44(9): 582-583.
- 18 B V Zhdanov, M K Shaffer, R J Knize. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiplediode lasers[J]. Opt Express, 2009, 17(17): 14767-14770.
- 19 W F Krupke. Diode Pumped Alkali Laser: US, 20030099272[P/OL]. 2003-05-29[2015-09-20]. <http://www.freepatentsonline.com/y2003/0099272.html>.
- 20 B V Zhdanov, R J Knize. Efficient diode pumped cesium vapor amplifier[J]. Opt Commun, 2008, 281(15-16): 4068-4070.
- 21 D A Hostutler, W L Klennert. Power enhancement of a rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier[J]. Opt Express, 2008, 16(11): 8050-8053.
- 22 Lin Dongfeng, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. Ultrashort pulsed fiber sources in MOPA configurations[J]. Optoelectronic Technology, 2008, 28(4): 277-282.
- 林东风, 陈胜平, 侯 静, 等. MOPA结构的超短脉冲光纤光源[J]. 光电子技术, 2008, 28(4): 277-282.
- 23 Z Yang, H Wang, Q Lu, *et al.*. Modeling, numerical approach, and powerscaling of alkali vapor lasers in side-pumped configuration with flowing medium[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(6): 1353-1364.
- 24 Z Yang, H Wang, Q Lu, *et al.*. Modeling of an optically side-pumped alkali vapor amplifier with consideration of amplified spontaneous emission[J]. Opt Express, 2011, 19(23): 23118-23131.
- 25 J Yang, B Pan, Y Yang, *et al.*. Modeling of a diode side pumped cesium vapor laser MOPA system[J]. IEEE, 2014, 50(3): 123-128.
- 26 B Pan, Y J Wang, Q Zhu, *et al.*. Modeling of an alkali vapor laser MOPA system[J]. Opt Commun, 2011, 284(7): 1963-1966.
- 27 R J Beach, W F Krupke, V K Kanz, *et al.*. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers experiment, model, and power scaling[J]. J Opt Soc Am B, 2004, 21(12): 2151-2163.
- 28 Li Fangxin, Zhu Xiao, Wang Hua, *et al.*. Study of mode matching of end-pumped solid-state laser[J]. Laser Journal, 2003, 24(2): 17-18.
- 李方欣, 朱 晓, 王 华, 等. LD端面泵浦固体激光器模匹配的研究[J]. 激光杂志, 2003, 24(2): 17-18.
- 29 G A Pitz, A J Sandoval, T B Tafoya, *et al.*. Pressure broadening and shift of the rubidium D-1 transition and potassium D-2 transitions by various gases with comparison to other alkalis[J]. J Quant Spectrosc Ra, 2014, 140: 18-29.
- 30 D A Steck. Cesium D Line Data[DB/OL]. (2010-12-23)[2015-9-20]. <http://steck.us/alkalidata>.

栏目编辑: 史 敏