

考虑抽运光空间分布的半导体抽运碱金属蒸气激光器的模拟计算

赵晓红^{1,2} 王世红¹ 刘万发² 谭彦楠²

¹北京邮电大学理学院, 北京 100876

²中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023

摘要 为研究半导体激光抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)中抽运光和激光光束匹配对光-光转换效率和斜率效率的影响,在三能级速率方程模型的基础上,用介质内抽运光光强空间分布代替以往简化模型中所用的介质内平均光强,建立了考虑抽运光和激光光强的轴向分布的一维DPAL计算模型和考虑抽运光和激光光强的轴向分布及抽运光在介质中聚焦引起的光强和光斑半径的分布的三维DPAL计算模型。一维模型的计算结果表明,抽运阈值较简化模型结果减小,斜率效率变化不大。三维模型计算结果表明,当抽运光全部在激光的模式体积内,斜率效率最大,因此在DPAL实际运转中,优化抽运光的焦参数和激光腔参数,可以提高抽运光的转换效率。

关键词 激光器; 二极管抽运碱金属蒸气激光器; 光束匹配; 斜率效率; 速率方程模型

中图分类号 TN245

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.091405

Simulation Calculation Considering Pump Spatial Distribution of Diode Pumped Alkali Vapor Laser

Zhao Xiaohong^{1,2} Wang Shihong² Liu Wanfa¹ Tan Yannan¹

¹Science School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

²Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract In order to study on the influence on the optical-optical efficiency and slope efficiency of the mode match of pump and the laser beam in laser diode pumped alkali vapor laser (DPAL), based on the three level rate equation model, instead of the simplified model with average intensity in the medium, the spatial distribution of pump light intensity in the medium is used, and the one dimension DPAL calculation model considering the axial distribution of pump and the laser intensity and the three dimension DPAL calculation model are established considering the distribution of pump in the medium focusing caused by light intensity and the spot radius. The calculation results of the 1D model show that pump threshold in decreasing, the slope efficiency changes little compared with the simplified model. The calculation results of the 3D model show that when the pump mode volume all in the laser the slope efficiency reach the maximum, therefore in the DPAL actual operation, optimization of focal parameters and laser cavity parameters can improve the pump conversion efficiency.

Key words lasers; diode-pumped alkali laser; beam matching; slope efficiency; rate equation model

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)综合了半导体激光高功率、高效率抽运和碱金属蒸气工作物质的优点,有望实现高光束质量、高功率连续近红外激光输出,是一种应用前景广阔的新型激光器。2003年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)Krupke等^[1]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,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^[2],成为DPAL发展的里程碑,尽管输出的Rb激光约为1 mW,斜率效率小于10%,远小于钛宝石模拟半导体抽运时得到的81%,其原因在于碱金属D2线极窄的吸收线宽(常温下约为0.001 nm)。最近俄罗斯Bogachev等^[3]报道了光光转换

收稿日期: 2015-02-28; 收到修改稿日期: 2015-03-20; 网络出版日期: 2015-08-13

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方面的研究。E-mail: x_zhao@bupt.edu.cn

效率约为 48% 的 1 kW 连续输出铯激光器, 为目前有报道的输出功率最高的 DPAL 激光器。为了实现高功率 DPAL, 人们在理论和实验上进行了深入研究, Beach 等^[4-6]采用三能级速率方程模型, 通过介质内平均抽运光强的方法理论计算了激光输出光强, 再通过模式匹配参数计算激光输出功率及转换效率, 得到与实验相近的理论结果。近年来国内也开展了 DPAL 领域的研究, 包括 DPAL 的出光实验^[6-7]和模拟计算的理论研究^[8-10]。

为了研究高功率 DPAL 模型转换效率, 需要进一步改进模型中对介质内光强的近似处理, 使其更接近实际情况。本文建立了一维和三维的 DPAL 理论计算模型, 通过对介质内光强的不同近似处理, 得到了三种模型仿真的结果, 并对三种模型结果进行了比较, 对 DPAL 系统的参数优化提供有效参考。

2 DPAL 三种模型的建立

本文通过对以 Rb 蒸气为增益介质的 DPAL 系统介质内光强不同的近似处理, 建立三种模型如下: 1) 模型 0, 采用介质内平均抽运光强; 2) 模型 1—一维模型, 考虑抽运光和激光光强的轴向分布, 不考虑光束半径的变化; 3) 模型 2—三维模型, 考虑抽运光和激光光强的轴向分布, 并考虑抽运光在介质中聚焦引起的光束半径的变化。

模型 0 为 Beach 等^[4]提出的计算模型, 速率方程为

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

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

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

$$n_0 = n_1 + n_2 + n_3, \quad (4)$$

式中 n_1, n_2, n_3 分别为 $5^2S_{1/2}, 5^2P_{1/2}$ 和 $5^2P_{3/2}$ (1, 2, 3 能级) 能级的粒子数密度, n_0 为总粒子数密度, τ_{D1} 和 τ_{D2} 分别为 $5^2P_{1/2}$ 和 $5^2P_{3/2}$ 能级的寿命。 Γ_p, Γ_L 分别为抽运速率和激光发射速率, ΔE 为 2, 3 能级的能量差, T 为温度, k_B 为玻尔兹曼常数, γ_{mix} 为 $^2P_{3/2}$ 向 $^2P_{1/2}$ 能级的弛豫速率。

模型 1 考虑抽运光和激光光强的轴向分布, 不考虑光束半径的变化, 建立速率方程模型如下:

$$\frac{dn_1(z)}{dt} = \sigma_{13}(\lambda) \left[\frac{n_3(z)}{2} - n_1(z) \right] \frac{\Omega(z)}{h\nu_p} + \sigma_{21} [n_2(z) - n_1(z)] \frac{\psi(z)}{h\nu_L} + n_2(z)\tau_{D1} + n_3(z)\tau_{D2}, \quad (5)$$

$$\frac{dn_2(z)}{dt} = -\sigma_{21} [n_2(z) - n_1(z)] \frac{\psi(z)}{h\nu_L} + \gamma_{\text{mix}} [n_3(z) - 2 \exp(-\theta)n_2(z)] - n_2(z)\tau_{D1}, \quad (6)$$

$$\frac{dn_3(z)}{dt} = -\sigma_{13}(\lambda) \left[\frac{n_3(z)}{2} - n_1(z) \right] \frac{\Omega(z)}{h\nu_p} - \gamma_{\text{mix}} [n_3(z) - 2 \exp(-\theta)n_2(z)] - n_3(z)\tau_{D1}, \quad (7)$$

$$\frac{dn_2(z)}{dt} + \frac{dn_3(z)}{dt} + \frac{dn_1(z)}{dt} = 0, \quad (8)$$

粒子数守恒方程如下:

$$n_1(z) + n_2(z) + n_3(z) = n_{\text{Rb}}(z), \quad (9)$$

式中 $n_{\text{Rb}}(z)$ 为位置 z 处的 Rb 原子粒子数密度, 本文计算中认为 $n_{\text{Rb}}(z)$ 的空间分布是均匀的。 $n_i(z)$ ($i=1, 2, 3$) 分别表示位置 z 处三个能级的粒子数密度。 λ 表示激光波长, ν_L 和 ν_p 分别为激光和抽运光的频率, h 为普朗克常数, $\psi(z)$ 为介质内激光光强。方程中

$$\theta = \Delta E_{32}/K_B T, \quad (10)$$

式中 ΔE_{32} 为 $^2P_{3/2}$ 向 $^2P_{1/2}$ 之间的能量差。 $\sigma_{13}(\lambda)$ 为经缓冲气体碰撞加宽后的洛伦兹线型原子吸收截面

$$\sigma_{13}(\lambda) = 2 \frac{1}{4\pi^2} \frac{A_{31}\lambda_{D2}^2}{\Delta\nu_{D2}} \frac{1}{1 + \left[\frac{2}{\Delta\nu_{D2}} \left(\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda_{D2}} \right) \right]^2}, \quad (11)$$

式中 A_{31} 为从 ${}^2P_{3/2}$ 到 ${}^2S_{1/2}$ 自发辐射速率, λ_{D2} 、 $\Delta\nu_{D2}$ 分别为 D2 线的中心波长和谱宽。

$\Omega(z)$ 为 z 处的抽运光强:

$$\Omega(z) = \int_0^{\infty} [I_p^+(z, \lambda) + I_p^-(z, \lambda)] d\lambda, \quad (12)$$

式中 $I_p^+(z, \lambda)$ 和 $I_p^-(z, \lambda)$ 为 z 处 $+z$ 和 $-z$ 方向单位波长的抽运光强, 如图 1 所示。对于激光跃迁采取单频近似, 认为其频率位于原子峰值发射截面处, 所以 z 处激光强度为

$$\psi(z) = I_l^+(z) + I_l^-(z), \quad (13)$$

速率方程中 σ_{21} 为 D1 线峰值发射截面, $I_l^{\pm}(z)$ 为位置 z 处 $+z$ 和 $-z$ 方向的激光强度。抽运光和激光的传播方程有下述方程描述:

$$\frac{dI_p^{\pm}(z, \lambda)}{dz} = \mp (n_1(z) - n_3(z)/2) \sigma_{13}(\lambda) I_p^{\pm}(z, \lambda), \quad (14)$$

$$\frac{dI_l^{\pm}(z)}{dz} = \pm [n_2(z) - n_1(z)] \sigma_{21} I_l^{\pm}(z), \quad (15)$$

上式中 I_p^+ 和 I_l^+ 满足以下边界条件

$$I_l^+(0) = I_l^-(0) T_1^2 R_{oc}, \quad (16)$$

$$I_l^-(l) = I_l^+(l) T_1^2 T_s^2 R_p, \quad (17)$$

$$I_p^-(l, \lambda) = I_p^+(l, \lambda) T_1^2 T_s^2 R_p, \quad (18)$$

出射的激光强度为

$$I_{out} = I_l^-(0) T_1 (1 - R_{oc}), \quad (19)$$

式中 $R_p \approx 1$, 为高反镜反射率, R_{oc} 为输出耦合镜反射率, T_1 、 T_s 为介质两端窗口透射率, 设 $T_1 = T_s = t_p$, 将纵向微分处理, 每段长度取 Δz , 在这个微小的 Δz 上再用平均的方法进行计算, 当 Δz 值取得足够小时, 可以对纵向上每一处的相关参数进行单独计算, 例如粒子数密度, 抽运光强, 激光光强等。

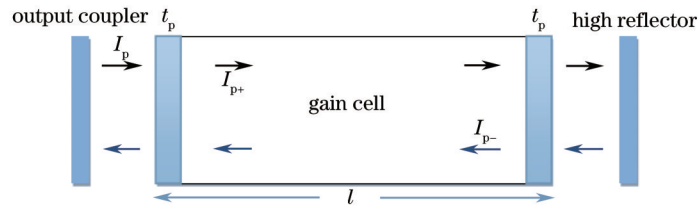


图 1 抽运光在介质和谐振腔中的传播

Fig.1 Propagation of pumped laser in the vapor cell and resonant cavity

模型 2 考虑抽运光和激光在在 z 处径向截面的光强为高斯分布, 对 z 轴旋转对称分布, 为圆形光斑, 如图 2。模型 1 速率方程中 $n_i(z)$ 改为 $n_i(x, y, z)$, 由于 LD 抽运光的模式和聚焦的特点, 抽运光光斑半径 w_z 在 z 轴为双曲线分布, 抽运光焦点处光斑半径最小, 激光光斑半径近似不变, 如图 3 所示。以往算法是在模型 0 基础上由模式匹配系数修正, 模式匹配系数为抽运光和激光模体积的交叠积分与激光模体积之比。

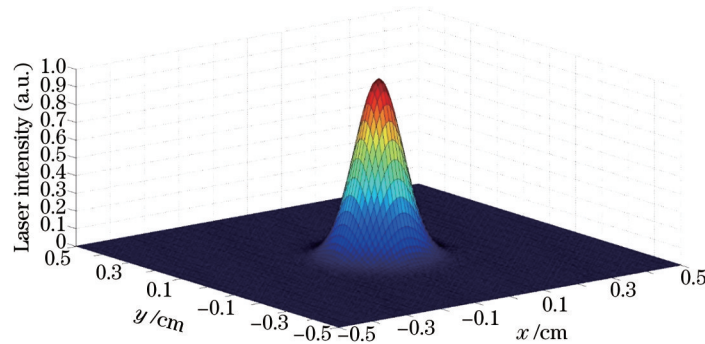


图 2 高斯光束在横截面的光强分布

Fig.2 Intensity distribution gauss beam in transverse

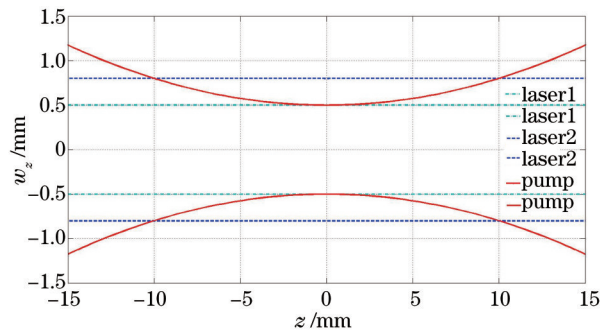


图3 抽运光和激光光斑半径在介质中的分布图

Fig.3 Pump and laser beam radius distributions along $+z$ and $-z$

2 计算结果

图4给出了模型1抽运光和激光光强随传播方向($+z$, $-z$ 方向)变化图。计算条件如下:介质温度为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, He气压为 400 Torr ($1\text{ Torr}=133\text{ Pa}$), C_2H_6 气压为 200 Torr ,耦合输出镜反射率为 0.20 ,单程损耗为 0.965 。介质长度为 2.0 cm ,抽运光带宽为 0.2 nm ,计算中暂不考虑偏振匹配,在介质中抽运光经一次往返光强被吸收约为 77% ,沿 $-z$ 方向的激光通过左端的耦合输出镜输出,输出激光光强为 5981 W/cm^2 。

图5是模型0和模型1激光输出光强随抽运光输入光强的变化曲线。计算条件为介质温度为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。耦合输出镜反射率为 0.95 。介质长度为 0.5 cm ,其他条件与图4相同。从图5可以看出模型1的阈值要比模型0的阈值小。原因是模型1的在径向上没有采用近似平均的方法,而是采用微元的方法进行了精确地计算,抽运光的吸收效率比模型0的计算结果大,因此激光器的阈值也随之减小。随温度的增大,阈值差别越来越大。

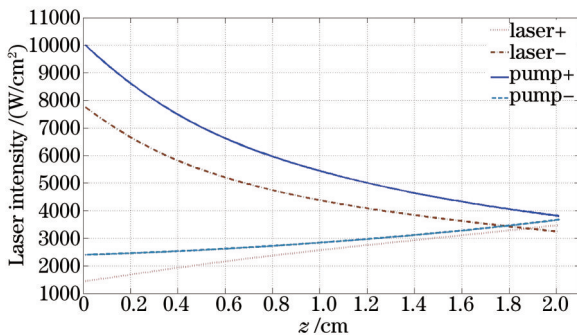
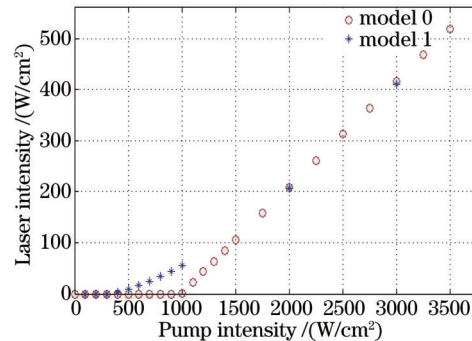
图4 介质中抽运光和激光沿 $\pm z$ 方向的变化图Fig.4 Pump and laser power intensity distribution along $+z$ and $-z$ 图5 温度 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,模型0和模型1激光输出光强随抽运光输入光强的变化Fig.5 Laser output intensity versus pump intensity by result of model 0 and model 1 at $170\text{ }^{\circ}\text{C}$

图6为模型2的计算结果,抽运光腰半径为 0.5 mm ,发散角为 0.03 rad ,介质长 2 cm ,抽运光聚焦在介质中心,介质端面抽运光半径为 0.8 mm ,耦合输出镜反射率为 0.2 ,图6(a)为激光腰半径 l_w 为 0.5 mm 时抽运光和 $+z$, $-z$ 方向激光光子数密度在介质中心的轴向分布,抽运光进入介质被吸收同时聚焦在介质中心,焦点附近抽运光光强最大,图6(b)为介质内抽运光和 $+z$, $-z$ 方向激光功率的轴向分布,激光由 $z=0$ 处的 $-z$ 方向的激光输出,输出功率为 71 W ,图6(c)为激光腰半径为 0.8 mm 时介质内抽运光和 $+z$, $-z$ 方向激光功率的轴向分布,激光输出功率为 118.7 W ,这种情况下,抽运光全部在激光的模式体积内,与图6(b)情况相比,得到比较充分的利用。图7为激光腰半径为 0.5 mm 和 0.8 mm 条件下激光输出光强随抽运光强的变化,图8为激光腰半径为 0.8 mm ,介质长度分别为 $1, 2, 3\text{ cm}$ 时激光输出光强随抽运光强的变化,随着介质长度的增加,抽运光会得到充分吸收,激光输出功率增加,但由于抽运光的发散,其模式体积不再全部处于激光的模式体积内,这个因素会导致激光输出功率减小,在激光腰半径和抽运光参数不变的条件下,得到最大激光输出功率,介质长度有一个最佳值,此条件下介质最佳长度略大于 2 cm 。

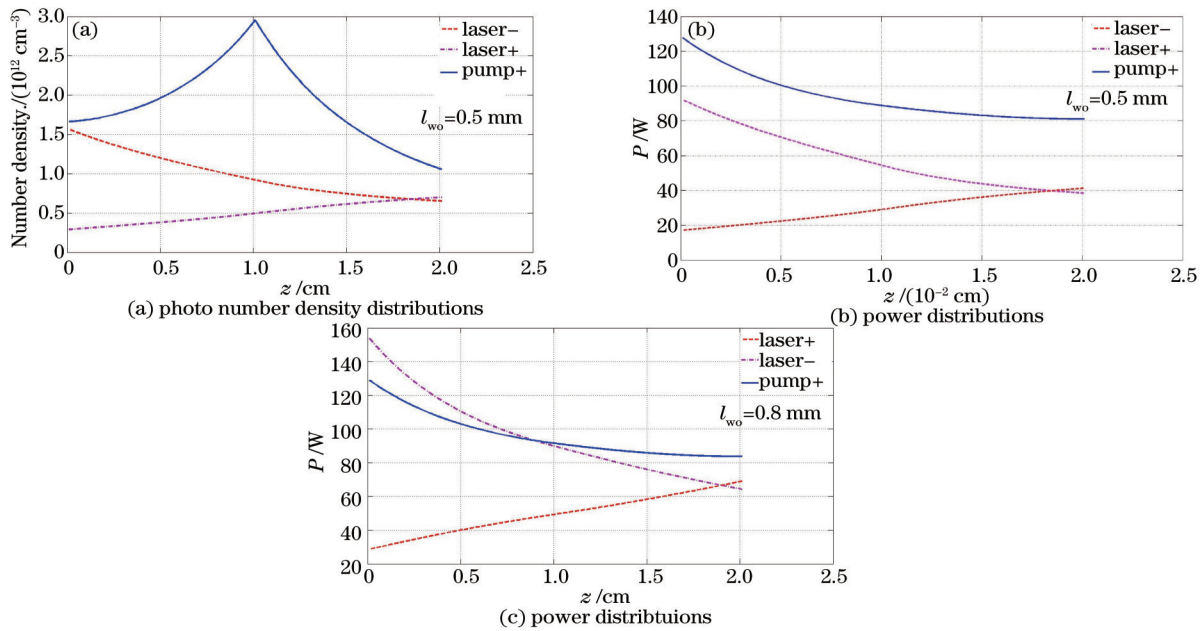


图6 介质轴向的+z方向抽运和双向激光光子数密度和功率的分布

Fig.6 Pump and two-way laser photon number density and power distributions on axis

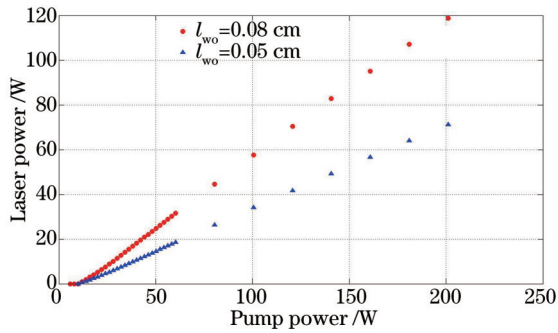


图7 激光腰半径为0.5 mm和0.8 mm条件下激光输出功率随抽运功率的变化

Fig.7 Laser output intensity versus pump intensity with laser beam radius of 0.5 mm and 0.8 mm

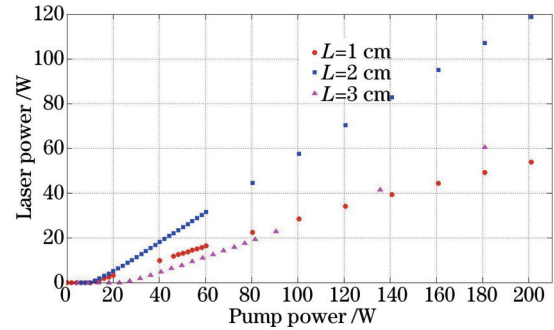


图8 激光腰半径为0.8 mm,介质长度分别为1,2,3 cm时激光输出功率随抽运光功率的变化

Fig.8 Laser output intensity versus pump intensity with laser beam radius of 0.8 mm and cell lengths of 1, 2, 3 cm, respectively

3 结 论

本文对激光介质内抽运光强分布以不同方式进行近似处理,通过激光三能级速率方程模型研究了Rb原子DPAL的输出特性。考虑抽运光轴向分布和横向分布的三维模型比平均光强的模型能准确计算抽运光的吸收效率、抽运阈值和激光输出特性。模型得到了激光功率随抽运强度、抽运光聚焦参数、介质长度等的变化关系,在DPAL实际运转实验中,为达到最大激光输出功率,可以根据抽运光的功率和聚焦参数,通过计算设计最佳激光腔参数和介质长度及运行温度。

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 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.
- 4 Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, *et al.*. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and

- power scaling[J]. JOSA B, 2004, 21(12): 2151–2163.
- 5 Hager G D, Perram G P. A three-level analytic model for alkali metal vapor lasers: part I. narrowband optical pumping [J]. Applied Physics B, 2010, 101(1–2): 45–56.
- 6 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 051405.
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, 47(5): 051405.
- 7 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.
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.
- 8 Yu Jianhua, Zhu Qiang, Xie Wu, *et al.*. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 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.
- 9 Zhao Xiaohong, Wang Shihong, Liu Wanfa, *et al.*. Optimization design of diode pumped alkali rubidium laser for high output power[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s102008.
赵晓红, 王世红, 刘万发, 等. 高功率半导体激光抽运铷蒸气激光器的优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s102008.
- 10 Huang Wei, Tan Rongqing, Li Zhiyong, *et al.*. 3D model and simulative investigation of threshold characteristics of diode pumped Rb vapor laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(1): 011009.
黄伟, 谭荣清, 李志永, 等. 铷蒸气激光器 3D 理论模型的建立及阈值特性模拟, 强激光与粒子束, 2015, 27(1): 011009.

栏目编辑: 宋梅梅