

种子光线宽影响端面抽运碱金属蒸气放大器的输出特性

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

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 半导体激光器抽运碱金属激光器(DPAL)是近年来发展迅速的新型激光光源。DPAL 的主振荡功率放大(MOPA)系统是实现 DPAL 高功率化的最理想工程手段之一。相对于传统激光器,DPAL 的吸收和发射线宽非常窄,因此种子光的线宽是影响 DPAL-MOPA 输出特性的重要参数之一。建立端面抽运 DPAL-MOPA 系统的微观动力学理论模型,在计算步骤中考虑了种子光线宽与发射截面的波谱分布,详细计算和分析了种子光线宽对 DPAL-MOPA 系统的输出功率、输出线宽、提取效率、增益系数和抽运吸收等特性的影响,有助于将来定标放大高功率 DPAL 系统的构建。

关键词 激光器;半导体抽运碱金属激光器;种子光线宽;发射截面波谱;主振荡功率放大器;定标放大

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0502004

Effects of Linewidth of Seed-Laser on Output Features of End-Pumped Alkali Vapor Amplifier

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

Xue Liangping Zhang Wei Wang Hongyuan Zhou Jie

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract In recent years, the diode pumped alkali laser (DPAL) has been rapidly developed as a new laser source. The master oscillator power-amplifier (MOPA) system is one of the most feasible engineering methods to achieve the high power scaling of DPAL. Comparing with traditional lasers, DPAL's linewidths of both absorption and emission are extremely narrow. Therefore, the linewidth of a seed laser is one of the most important factors that effects the output characteristics of DPAL-MOPA. A theoretical microcosmic kinetic mode is established for an end-pumped DPAL-MOPA system. The linewidth of seed laser and the spectral distribution of emission cross-section are taken into account in the calculation process. The influences of linewidth of seed laser on the features, including the output power, output linewidth, extraction efficiency, gain factor, and pump absorption, are calculated and analyzed in detail. The research is helpful in construction of a power-scaled DPAL-MOPA system.

Key words lasers; diode-pumped alkali laser; linewidth of seed laser; spectral distribution of emission cross-section; master oscillator power-amplifier; scaling magnification

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.1340; 140.3430

1 引 言

随着光电技术的发展,越来越多的激光技术被应用于通讯、医疗、加工制造和光电对抗等领域,但是目前常见的化学激光器、CO₂ 激光器、固体激光器和光纤激光器等在具备大量优点的同时也都存在一些问题,而

收稿日期: 2015-12-29; **收到修改稿日期:** 2016-02-04

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)

这些问题已经不同程度地限制了它们进一步的应用^[1-4]。在这种背景下,美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)的 W F Krupke 教授^[5]于 2001 年首次提出了一种新型高效的半导体激光器抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)。DPAL 在很大程度上克服了常规激光器的缺点,同时还具备诸多独特的优势,譬如斯托克斯效率高、光-光转换效率高、热效应小、激光介质无毒、结构简单和系统重量轻等^[6-13]。

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常规激光器的主振荡功率放大器(MOPA)技术延伸到高功率 DPAL 领域,以实现激光功率的定标放大^[14]。虽然采用 MOPA 结构可以使得放大后的激光输出特性除功率以外与种子光基本保持一致,但 DPAL 相对于传统激光器来说其吸收和发射线宽非常窄,因此 DPAL 种子光的线宽必然是影响 DPAL-MOPA 输出特性的重要参数之一。本文建立了激光放大器的微观动力学模型,将种子光线宽引入 DPAL-MOPA 系统的计算过程之中,详细分析了种子光线宽对 DPAL-MOPA 系统的输出功率、输出线宽、提取效率、增益系数和抽运吸收等特性的影响。本研究对构建窄线宽、高功率的 DPAL-MOPA 系统具有理论指导意义^[1,15-20]。

2 种子光线宽对 DPAL-MOPA 系统的影响

首先,以碱金属原子受激吸收-受激辐射过程的三能级速率方程为基础构建 DPAL-MOPA 系统的微观动力学理论模型^[21]。在此模型中,引入了种子光的线宽等物理参量,从而可以研究种子光的线宽对 DPAL-MOPA 系统输出特性的影响。由于乙烷同时具有展宽抽运吸收线宽和加快精细结构碰撞速率两方面的效应,因此在理论模拟时缓冲气体仅包括乙烷一种成分,而 DPAL 研究中经常使用的氦气被省略。为简化计算,作出以下 5 点假设:

- 1) 蒸气池内的温度呈均匀分布;
- 2) 忽略蒸气池的端窗损耗和传输损耗的影响;
- 3) 抽运光和种子光强在与光轴垂直方向上的分布呈高斯线型,在光轴方向上的分布忽略不计;
- 4) 在传输过程中抽运光和种子光的光束半径保持不变;
- 5) 种子光和放大后激光的模体积相同。

DPAL-MOPA 系统的速率方程为

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

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, Γ_p 和 Γ_A 分别表示抽运吸收速率和激光放大速率, Γ_p 可由下列表达式得出:

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

式中 η_{del} 为单程介质损耗率, η_{mode} 为模式匹配效率^[22], L 表示密闭蒸气池的长度, c 为真空中的光速, h 为普朗克常数, λ_p 表示抽运光的波长, V_A 为放大后激光的模体积, $P_p(\lambda_p)$ 表示光谱呈高斯分布的抽运光功率, 其表达式为:

$$P_p(\lambda_p) = P_{\text{pump}} \sqrt{4 \frac{\ln 2}{\pi}} \frac{1}{\Delta \lambda_p} \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_p - \lambda_{\text{pump}})^2}{\Delta \lambda_p^2}\right], \quad (3)$$

式中 λ_{pump} 和 $\Delta \lambda_p$ 分别表示抽运光的中心波长和半峰全宽(FWHM)谱线线宽, P_{pump} 为抽运光功率。(2)式中

的 σ_{D_2} 为不同抽运波长对应的吸收截面,可表示为:

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

式中 $\sigma_{D_2}^{\text{ethane-broadened}}$ 表示缓冲气体碰撞加宽后的吸收截面, λ_{D_2} 和 $\Delta\lambda_{D_2}^{\text{FWHM}}$ 分别表示 D_2 线的中心波长和 FWHM 谱线线宽。(1)式中激光放大速率 Γ_A 可近似表示为:

$$\Gamma_A = \frac{1}{V_{\text{seed}}} \frac{P_{\text{seed}} \{ \exp[(n_2 - n_1) \sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}} L] - 1 \}}{h\nu_{\text{seed}}}, \quad (5)$$

式中 P_{seed} 为种子光功率, ν_{seed} 是种子光频率, V_{seed} 为种子光的模体积, $\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}$ 是缓冲气体碰撞加宽后的平均发射截面。为了直观反映种子光和发射截面的特性,将波长为 794.98 nm 的单频模种子光的谱线分布和加宽后 Rb 原子的平均发射截面的分布进行归一化并且显示在同一张图中[图 1(a)]。显然,(5)式中的种子光功率 P_{seed} 并没有反映出种子光的线宽信息,另外加宽后的发射截面 $\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}$ 仅代表平均发射截面,也并未体现出在不同波长位置时发射截面的具体数值,因此在研究种子光线宽对 DPAL-MOPA 输出特性的影响时必须对上述公式做出相应的改进。

在以往的理论模型中,为了简化计算,种子光往往被假设为单频模激光,即激光束的光强集中于中心波长。实际情况中,任何种子光都不可能是单频模光束,其光强在谱线上定会有分散分布。另外,不同波长所对应的发射截面也不同,这将导致不同波长所对应的增益也必然会有所差异。因此,把种子光的线宽和发射截面的波谱分布考虑进 DPAL-MOPA 的模拟过程中将有助于计算精度的提高。

通过引入种子光线宽和发射截面的波谱分布对(5)式进行改进,改进后的 Γ_A 可表示为:

$$\Gamma_A = \int_0^{+\infty} \frac{1}{V_{\text{seed}}} \frac{P_s(\lambda_s) \{ \exp[(n_2 - n_1) \sigma_{D_1}(\lambda_s) L] - 1 \}}{h\nu_{\text{seed}}} d\lambda_s, \quad (6)$$

式中 λ_s 表示种子光的波长, $P_s(\lambda_s)$ 为光谱呈高斯分布的种子光功率,可表示为:

$$P_s(\lambda_s) = P_{\text{seed}} \sqrt{4 \frac{\ln 2}{\pi}} \frac{1}{\Delta\lambda_{\text{seed}}} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_s - \lambda_{\text{seed}})^2}{\Delta\lambda_{\text{seed}}^2} \right], \quad (7)$$

式中 λ_{seed} 和 $\Delta\lambda_{\text{seed}}$ 分别表示种子光的中心波长和 FWHM 谱线线宽, P_{seed} 为种子光功率。(6)式中的 $\sigma_{D_1}(\lambda_s)$ 为发射截面的波谱分布,其表达式为:

$$\sigma_{D_1}(\lambda_s) = \frac{\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}}{1 + 4 \left(\frac{\lambda_s - \lambda_{D_1}}{\Delta\lambda_{D_1}^{\text{FWHM}}} \right)^2}, \quad (8)$$

式中 λ_{D_1} 和 $\Delta\lambda_{D_1}^{\text{FWHM}}$ 分别表示 D_1 线的中心波长和 FWHM 谱线线宽。

考虑线宽分布后的归一化种子光谱线和发射截面分布如图 1(b)所示,采用波长为 794.98 nm 线宽为 8 GHz 的 Rb-DPAL 作为种子光源。对比图 1(a)和图 1(b),不难看出,考虑线宽分布的 MOPA 模型更符合

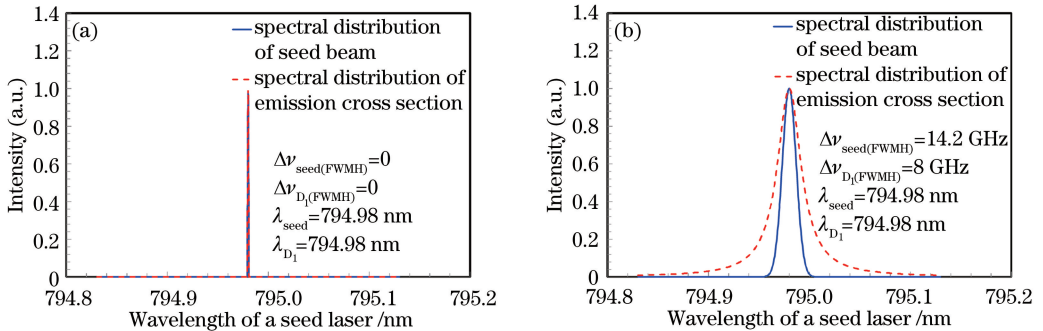


图 1 (a)单频模和(b)非单频模的种子光光强和发射截面的归一化谱线分布

Fig. 1 Normalized spectral distributions of a seed laser intensity and emission cross section in the case of (a) single-frequency mode and (b) non-single-frequency mode

实际情况。

然后,利用(1)式、(2)式和(6)式可以求解得到粒子数分布密度 n_1 、 n_2 和 n_3 ,将 n_1 、 n_2 和 n_3 分别代入(9)~(12)式即可求得放大后的激光输出功率、增益系数、抽运光的提取效率以及吸收的抽运功率。由于碱金属介质的发射截面同样在波谱上存在发散性分布,可以计算出放大后的激光在相应的谱线上的强度分布和输出的激光线宽。

$$P_{\text{out}} = \int_0^{+\infty} \exp[L\sigma_{D_1}(\lambda_s)(n_2 - n_1)]P_s(\lambda_s)d\lambda_s, \quad (9)$$

$$G = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{seed}}}, \quad (10)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{seed}}}{P_{\text{pump}}}, \quad (11)$$

$$P_{\text{pump_absorption}} = \eta_{\text{mode}}\eta_{\text{del}} \frac{hc}{\lambda_{D_2}} \int_0^{+\infty} \frac{\lambda_P}{hc} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(n_1 - \frac{n_3}{2}\right)\sigma_{D_2}(\lambda_P)L\right] \right\} P_P(\lambda_P)d\lambda_P. \quad (12)$$

3 理论计算结果与分析

3.1 模拟结果

基于改进后的微观动力学模型,可在理论上评估种子光线宽对 DPAL-MOPA 系统输出特性的影响。主要研究了种子光经放大后的输出功率、输出线宽、系统提取效率、增益系数和吸收的抽运功率随种子光和抽运光线宽的变化规律。

图 2(a)表示的是抽运光的线宽分别为 1、8、50 GHz 时放大后的激光功率随种子光线宽的变化曲线。从图中可以看到,当种子光线宽增大时输出功率呈明显减小的趋势,种子光线宽在小于 20000 MHz 时对放大后的输出功率影响较大,而当种子光线宽大于 20000 MHz 时其影响力度明显变缓。图 2(b)表示的是种子光的线宽分别为 10、30、50 GHz 时放大后的激光功率随抽运光线宽的变化曲线。结果显示,种子光和抽运光的线宽越窄越有利于提高 DPAL-MOPA 系统的输出功率,但是抽运光的线宽对放大后激光输出功率的影响明显要小于种子光线宽。

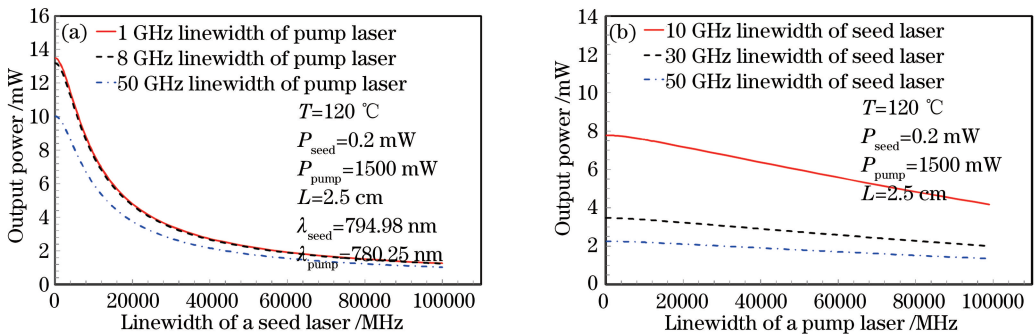


图 2 放大后的激光输出功率随(a)种子光线宽和(b)抽运光线宽的变化曲线

Fig. 2 Laser output power after amplifying changes with linewidth of (a) seed laser and (b) pump source

图 3(a)所示的是抽运光线宽分别为 1、8、50 GHz 时,经过放大后激光的线宽随种子光线宽的变化曲线。结果表明,当种子光线宽增大时,放大后的激光线宽将随之增大;种子光线宽超过 20000 MHz 时,放大后的激光线宽基本保持不变,各条曲线趋于饱和。经过放大后激光的线宽随抽运光线宽的变化规律可以从图 3 (b)中看出,当抽运光线宽变大时,放大后激光的线宽缓慢加宽。显然,抽运光的线宽对放大后激光线宽的影响明显要小于种子光线宽。

图 4(a)所示的是抽运光的线宽分别为 1、8、50 GHz 时,系统的放大率随种子光线宽的变化规律。结果显示,种子光线宽加宽时,系统的放大率逐渐减小。另外,系统的放大率随抽运光线宽的变化曲线如图 4(b)所示。不难看出,系统的放大率随抽运光线宽的加宽而减小。

图 5(a)所示的是在不同抽运光线宽条件下,系统的提取效率随种子光线宽的变化曲线。结果表明,当

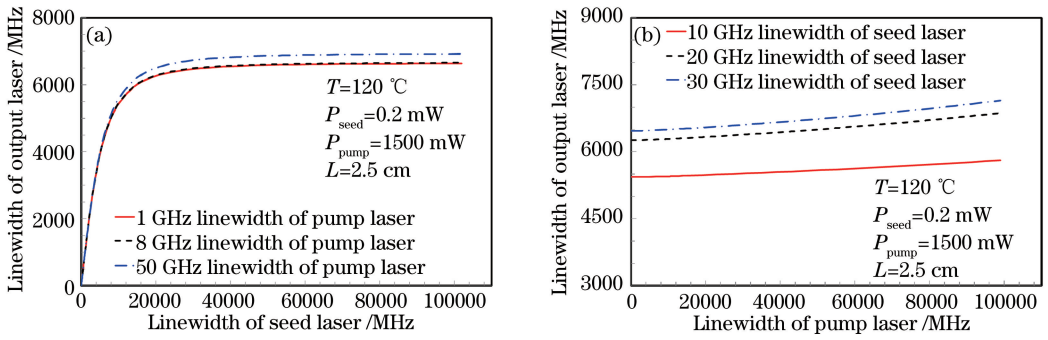


图 3 经过放大后输出激光的线宽随(a)种子光线宽和(b)抽运光线宽的变化曲线

Fig. 3 Linewidth of an output laser after amplifying changes with linewidth of (a) seed laser and (b) pump source

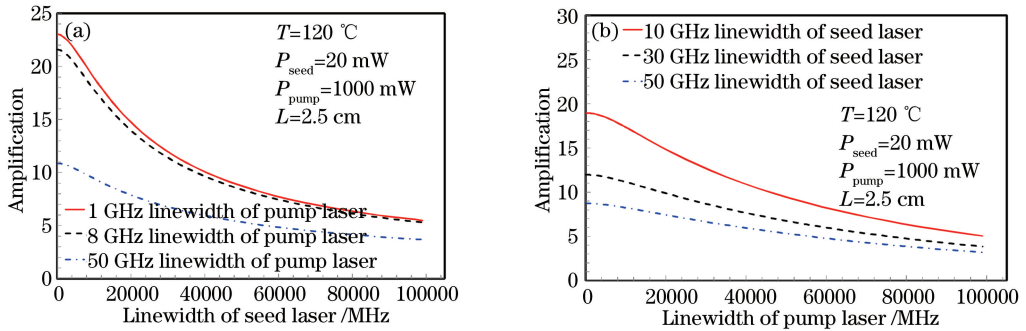


图 4 DPAL-MOPA 系统放大率随(a)种子光线宽和(b)抽运光线宽的变化曲线

Fig. 4 Amplification of DPAL-MOPA system changes with linewidth of (a) seed laser and (b) pump source

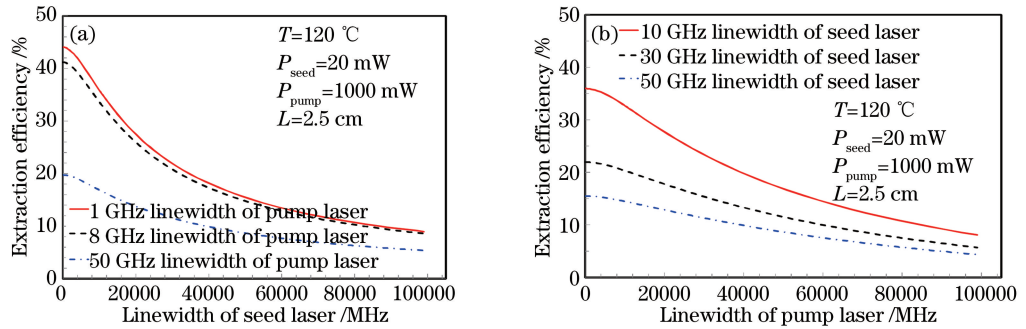


图 5 DPAL-MOPA 系统提取效率随(a)种子光线宽和(b)抽运光线宽的变化曲线

Fig. 5 Extraction efficiency of DPAL-MOPA system changes with linewidth of (a) seed laser and (b) pump source

种子光线宽加宽时,系统的提取效率随之减小。图 5(b)表示的是种子光的线宽分别为 10、30、50 GHz 时系统的提取效率随抽运光线宽的变化曲线。可以看到,抽运光的线宽越窄,系统的提取效率越大。

抽运光线宽分别为 1、8、50 GHz 时,抽运吸收功率随种子光线宽的变化规律如图 6(a)所示。显然,当种子光线宽增加时,抽运吸收功率呈现缓慢减小的趋势。种子光的线宽分别为 10、30、50 GHz 时抽运吸收功率随抽运光线宽的变化曲线如图 6(b)所示。可以看到,随着抽运光线宽的加宽,抽运吸收功率缓慢下降。对比图 6(a)和图 6(b)不难发现,抽运线宽对抽运吸收功率的影响明显比种子光线宽对其的影响要小。

3.2 理论与实验对比

为了验证所建立 MOPA 理论模型的准确性,利用文献[18]中的物理参量,分别模拟了碱金属 MOPA 系统的放大倍数随密闭蒸气池温度的变化规律,模拟结果与实验数据如图 7 所示。文献[18]中所用的密闭蒸气池长度为 2 cm,池内充入了足量的金属铯与 66661 Pa 的乙烷气体,抽运光线宽为 10 GHz,功率为 12 W,种子光源采用了文献[15]中的 Cs-DPAL。

图 7 所示的是 MOPA 系统的放大倍数随蒸气池温度的变化规律。显然,当温度为 75 °C ~ 85 °C 时,模

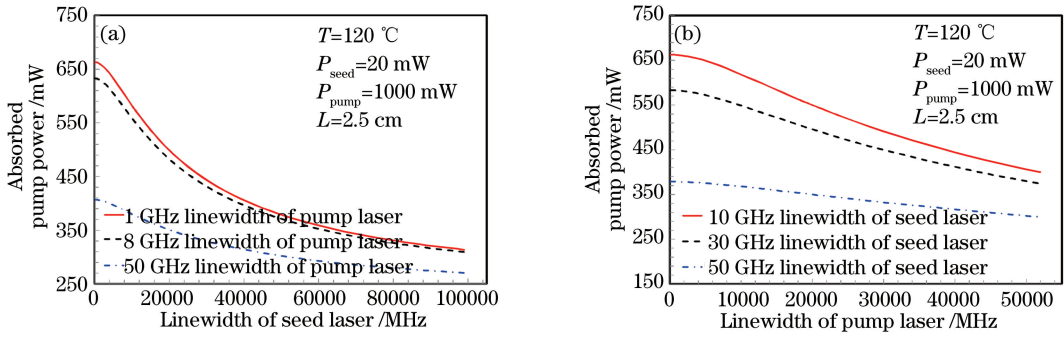


图 6 抽运吸收功率随(a)种子光线宽和(b)抽运光线宽的变化曲线

Fig. 6 Absorbed pump power changes with linewidth of (a) seed laser and (b) pump source

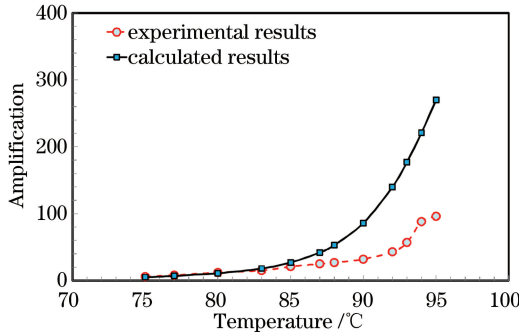


图 7 DPAL-MOPA 系统放大率随蒸气池温度的变化的理论计算与实验结果

Fig. 7 DPAL-MOPA system's amplification of experimental and calculated result changes with cell temperature

拟结果与实验结果比较接近;而当温度大于 85 °C 时,模拟结果大于实验结果,温度越高,模拟与实验结果的差值越大。产生误差的原因除了蒸气池内部的有效平均温度应该低于探测器测量到的数值外,主要是由于所建立的理论模型中并未考虑放大的自发辐射(ASE)和衍射损耗对激光放大输出的影响。当 MOPA 系统工作在小信号放大状态时,ASE 和衍射损耗对系统的影响较小,模拟结果与实验结果相差较小;但当种子光功率较高或温度较高时,ASE 和衍射损耗将对系统产生较大的影响,这就导致了模拟结果高出实验结果。因此,为了得到更准确的理论计算结果,还需要考虑 ASE 与衍射损耗对 MOPA 系统的影响,与此相关的后续工作正在着手进行研究。

4 结 论

将种子光的线宽和发射截面的谱线分布引入 DPAL-MOPA 系统的速率方程模型,在微观动力学层次做了相应的改进后计算并分析了系统的输出功率、输出线宽、提取效率、增益系数和抽运吸收等随种子光和抽运光线宽的变化规律。结果表明,随着种子光线宽的增大,放大后的激光功率先呈快速下降趋势而后缓慢减小,放大后的激光线宽则随之变宽且逐渐趋于饱和。随着抽运线宽的增大,放大后的激光功率也随之逐渐减小。因此,较窄的种子光线宽和抽运光线宽有利于 DPAL-MOPA 系统输出功率的提高,但是抽运光的线宽对输出功率的影响明显要小于种子光线宽。另外,随着种子光线宽的加宽,系统的放大率和提取效率都随之降低,而被吸收的抽运功率则呈现缓慢减小的趋势。再者,系统的放大率、提取效率和被吸收的抽运功率均随着抽运光线宽的加宽而缓慢减小。最后,为了验证所构建的理论模型的准确性,模拟已发表的实验结论并分析了导致模拟结果与实验结果出现差异的原因。作为一种潜在的高功率激光器,DPAL 尚处于开发阶段,其特殊的物理性质使得相应的 MOPA 理论比固体激光器更加复杂,许多原理尚未彻底弄清,对后续的研究成果将陆续进行报道。

参 考 文 献

1 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): 58-583.
- 2 B V Zhdanov, C Maes, T Ehrenreich, *et al.*. Optically pumped potassium laser[J]. *Opt Commun*, 2007, 270(2): 353-355.
- 3 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.
- 4 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2336-2338.
- 5 W F Krupke. Diode-pumped alkali laser: USA, US6643311[P]. 2003-11-04.
- 6 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.
- 7 You Wang, Tadashi Kasamatsu, Yujin Zheng, *et al.*. Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser-diode array[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(14): 141112-141114.
- 8 W F Krupke. Diode pumped alkali lasers (DPALs)-A review (rev1)[J]. *Prog Quantum Electron*, 2012, 36(1): 4-28.
- 9 Juhong Han, You Wang, He 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.
- 10 Juhong Han, You Wang, He 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.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 W F Krupke. Diode-pumped alkali laser. USA, US20030099272A1[P]. 2003-05-29.
- 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, M K Shaffer, R J Knize. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers[J]. *Opt Express*, 2009, 17(17): 14767-14770.
- 18 B V Zhdanov, R J Knize. Efficient diode pumped cesium vapor amplifier[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(15): 4068-4070.
- 19 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.
- 20 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.
- 21 R J Beach, W F Krupke, V K Kanz, *et al.*. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers experiment, model, and power scaling[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(12): 2151-2163.
- 22 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.