具有三级放大结构的铷蒸气激光系统的优化设计

蒋志刚,王 潋,蔡 和,高 明,韩聚洪,安国斐,张 伟,薛亮平,王顺艳,王宏元,周 杰

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 由于半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器(DPAL)的饱和增益较大,因此采用主振荡功率放大器(MOPA)结构对其进行定标放大是实现其高功率化的理想选择。基于端面泵浦 DPAL-MOPA 系统的微观动力学理论模型设计了铷蒸气 DPAL 的三级放大系统。另外,分别对长度为 3、5、7 cm 的三种密闭蒸气池在不同温度条件下的增益特性做了详细的计算与分析, 最终确定预放大级的密闭蒸气池长度为 3 cm,一级主放大级的为 5 cm,二级主放大级的为 7 cm。基于这种三级 MOPA 结构可把功率为 50 mW 的铷蒸气 DPAL 种子光放大至 1 000 W 量级。同时, 也评估了采用此设计方案时, 整个 MOPA 系统所产生的自发辐射功率和热功率。该研究对将来实现高功率 DPAL 提供了设计思路和理论依据。

关键词: 气体激光器; 端面泵浦; 碱金属蒸气激光器; MOPA; 密闭蒸气池长度; 工作温度

中图分类号: TN248.2;TN241;TN242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1106003

Optimization design of a power-scaled rubidium laser with a 3-stage amplification configuration

Jiang Zhigang, Wang You, Cai He, Gao Ming, Han Juhong, An Guofei, Zhang Wei, Xue Liangping, Wang Shunyan, Wang Hongyuan, Zhou Jie

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Because of the extremely high saturation gain of a diode-pumped alkali laser (DPAL), the master oscillator power-amplifier (MOPA) system is an ideal selection to achieve power-scaling of DPALs. In this report, a theoretical model based on the kinetic algorithm was established for construction of the 3-stage amplification configuration in which the end-pumped structures were adopted. Then the amplification factors at different temperatures were calculated when the cell lengths in the MOPA system are 3, 5, and 7 cm, respectively. According to the simulation results, a 3 cm-long vapor cell was employed for the pre-amplification, a 5 cm-long vapor cell was chosen for the first main-amplification, and a 7 cm-long cell was used for the second main-amplification. With such a designed MOPA system, the output power over 1 000 W for a 50 mW Rb-DPAL seed light can be optained. In addition, the power of fluorescence and generated heat are evaluated for this 3-stage MOPA system. The research could provide some design schemes and theoretical methodology for realization of a power-scaled DPAL-MOPA system.

Key words: gas laser; end pumped; DPAL; MOPA; cell length; temperature

收稿日期: 2016-03-21; **修订日期:** 2016-04-24

作者简介: 蒋志刚(1989-),男,硕士生,主要从事半导体激光泵浦碱金属激光领域方面的研究。Email:741777293@qq.com

导师简介: 王潋(1966-),男,研究员,博士,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。Email:youwang_2007@aliyun.com

0 引 言

半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器(DPAL)是一种典型的三能级激光发射光源，主要以碱金属蒸气(钾 K、铷 Rb、铯 Cs)为增益介质[1-4]。自 2001 年美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)的 W. F. Krupke 教授提出此新颖概念以来[5],DPAL 便受到业界的广泛关注。作为一种新型的激光光源,DPAL 具备许多独特的优点,例如斯托克斯效率高、光-光转换效率较高、热效应小、激光介质无毒、结构简单和系统重量轻等[6-10]。

由于 DPAL 具有较高的饱和增益，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(Master Oscillator Power-Amplifier,MOPA)技术扩展到高功率 DPAL 系统，以实现激光功率的定标放大[11]。采用 MOPA 结构不仅可以得到高功率的激光输出,而且可以保持 DPAL 光束质量好、激光线宽窄等突出特点[12-13]。近年来,国内外的一些研究人员开始对 DPAL-MOPA 结构进行了一些理论和实验研究[14-19],但是相对已经发展得相当成熟的固体激光器和光纤激光器,DPAL 的 MOPA 理论分析成果十分有限,而对多级 MOPA 系统的分析在国内外却始终未有人涉足。文中构建了三级 DPAL-MOPA 系统的理论模型，并详细分析了各放大级长度与工作温度对放大系数的影响,从而选取了实现 1 000 W 以上的 DPAL 输出的最佳设计方案。该研究为将来构建高效高功率 DPAL-MOPA 系统提供了理论参考和设计依据。

1 三级 DPAL-MOPA 系统的理论分析

1.1 DPAL-MOPA 的微观动力学模型

基于碱金属原子受激吸收-受激辐射过程的三能级速率方程,构建了 DPAL-MOPA 系统的微观动力学理论模型。在此模型中，采用铷蒸气作为 DPAL-MOPA 系统的增益介质。由于乙烷气体既能展宽泵浦吸收线宽,又可以加快精细结构碰撞速率[20],因此,该研究中所使用的缓冲气体仅包含乙烷一种成分,而不涉及 DPAL 研究中常用的氦气。为简化计算步骤,对模型作出以下假设：

(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) 泵浦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) 在蒸气池内部传输过程中泵浦光和种子光的光束半径维持不变；

(5) 在各级放大过程中的激光光斑半径保持不变。

在多级 MOPA 系统中,各级放大器的动力学理论如出一辙。文中涉及的预放大级和两个主放大级的计算原理基本类似。下式是描述预放大级微观动力学过程的速率方程[21]：

$$\frac{\mathrm{d}n_1}{\mathrm{d}t}=-\Gamma_P+\Gamma_A+\frac{n_2}{\tau_{D_1}}+\frac{n_3}{\tau_{D_2}}$$

$$\frac{\mathrm{d}n_2}{\mathrm{d}t}=-\Gamma_A+\gamma^2_{P_{3/2}\to{}^2P_{1/2}}(T)\left\{[n_3-n_2]-\left[2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_BT}\right)-1\right]n_2\right\}-\frac{n_2}{\tau_{D_1}}$$

$$\frac{\mathrm{d}n_3}{\mathrm{d}t}=\Gamma_P-\gamma^2_{P_{3/2}\to{}^2P_{1/2}}(T)\left\{[n_3-n_2]-\left[2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_BT}\right)-1\right]n_2\right\}-\frac{n_3}{\tau_{D_2}}$$

$$n_{\mathrm{tot}}=n_1+n_2+n_3 \tag{1}$$

式中：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；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；$\gamma^2_{P_{3/2}\to{}^2P_{1/2}}$ 表示精细结构混合速率；k_B 为玻耳兹曼常数；T 为密闭蒸气池的温度；ΔE 表示能级间隔；Γ_P 和 Γ_A 分别表示泵浦吸收速率和激光放大速率；Γ_P 可由下列表达式得出[20]：

$$\Gamma_P=\frac{\eta_{\mathrm{mode}}\eta_{\mathrm{del}}}{V_A}\int_0^\infty\frac{\lambda_P}{hc}[1-\mathrm{e}^{-\left(n_1-\frac{n_3}{2}\right)\sigma_{D_2}(\lambda_P)L}]P_P(\lambda_P)\mathrm{d}\lambda_P \tag{2}$$

式中：η_{del} 为单程介质损耗率；η_{mode} 为模式匹配效率；V_A 为放大后激光的模体积；λ_P 表示泵浦光的波长；h 为普朗克常数；c 为真空中的光速；L 为密闭蒸气池的长度；$P_P(\lambda_P)$为光谱呈高斯分布的泵浦光功率,其表达式为：

$$P_P(\lambda_P)=P_{\mathrm{pump}}\sqrt{4\frac{\ln 2}{\pi}}\frac{1}{\Delta\lambda_P}\mathrm{e}^{-4\ln 2\frac{(\lambda_P-\lambda_{\mathrm{Pump}})^2}{\Delta\lambda_P^2}} \tag{3}$$

式中：P_{pump} 为泵浦光功率；λ_{Pump} 和 $\Delta\lambda_P$ 分别表示泵浦光的中心波长和 FWHM 谱线线宽。公式(2)中的 $\sigma_{D_2}(\lambda_P)$为不同泵浦波长对应的吸收截面,可表示为：

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

式中：$\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}$ 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。

公式(1)中激光放大速率 Γ_A 可表示为：

$$\Gamma_A=\int_0^{\infty}\frac{1}{V_{\text{seed}}}\frac{P_s(\lambda_s)[\mathrm{e}^{(n_2-n_1)\sigma_{D_1}(\lambda_s)L}-1]}{h\nu_{\text{seed}}}\mathrm{d}\lambda_s \tag{5}$$

式中：ν_{seed} 为种子光频率；V_{seed} 为种子光的模体积；$P_s(\lambda_s)$为光谱呈高斯分布的种子光功率，可表示为：

$$P_s(\lambda_s)=P_{\text{seed}}\sqrt{4\frac{\ln 2}{\pi}}\frac{1}{\Delta\lambda_{\text{seed}}}\mathrm{e}^{-4\ln 2\frac{(\lambda_s-\lambda_{\text{seed}})^2}{\Delta\lambda_{\text{seed}}^2}} \tag{6}$$

式中：λ_{seed} 和 $\Delta\lambda_{\text{seed}}$ 分别为种子光的中心波长和 FWHM 谱线线宽；λ_s 表示种子光的波长；P_{seed} 为种子光功率。公式(5)中的 $\sigma_{D_1}(\lambda_s)$为发射截面的波谱分布，其表达式为：

$$\sigma_{D_1}(\lambda_s)=\frac{\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}}{1+4\left(\frac{\lambda_s-\lambda_{D_1}}{\Delta\lambda_{D_1}^{\text{FWHM}}}\right)^2} \tag{7}$$

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；$\sigma_{D_1}^{\text{ethane-broadened}}$ 是缓冲气体碰撞加宽后的平均发射截面[22]。

利用公式(1)~(7)可以求解得到 $S_{1/2}$，$P_{1/2}$ 和 $P_{3/2}$ 能级的粒子数分布密度 n_1，n_2 和 n_3，再将各能级的粒子数分布密度分别代入公式(9)~(11)中，可计算得到 MOPA 系统各放大级的激光输出功率、放大系数、工作时产生的自发辐射功率以及热量。

$$P_{\text{out}}=\int_0^{\infty}[\mathrm{e}^{L\sigma_{D_1}(\lambda_s)(n_2-n_1)}]P_s(\lambda_s)\mathrm{d}\lambda_s \tag{8}$$

$$G=\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{seed}}} \tag{9}$$

$$P_{\text{fluorescence}}=L\pi\omega^2\left(\frac{n_2}{\tau_1}\frac{hc}{\lambda_{D_1}}+\frac{n_3}{\tau_2}\frac{hc}{\lambda_{D_2}}\right) \tag{10}$$

$$P_{\text{thermal}}=L\pi\omega^2\gamma_{^2P_{3/2}\to{}^2P_{1/2}}\left[n_3-2n_2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_BT}\right)\right]\Delta E \tag{11}$$

式中：ω 为通过放大级的激光光束的束腰半径。

1.2 三级 DPAL-MOPA 系统的构建

根据上文所建立的理论模型，搭建了一个增益介质为铷蒸气的三级 DPAL-MOPA 系统，图 1 所示的是此系统的光路图。

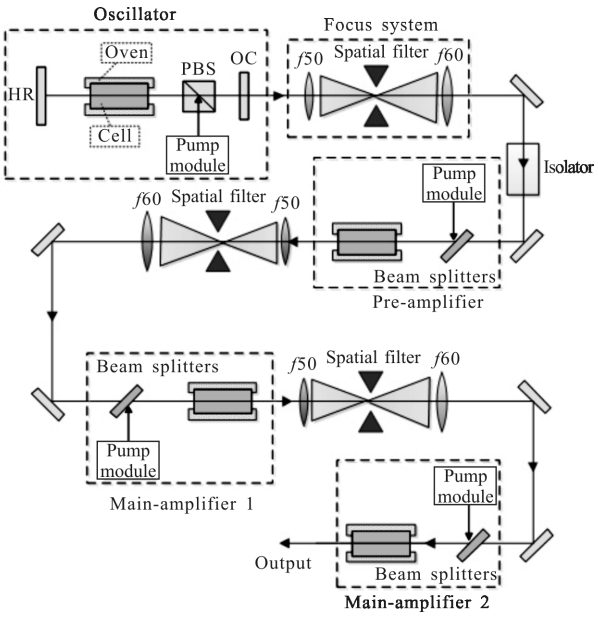


图 1 三能级 DPAL-MOPA 系统的光路图

Fig.1 Optical setup for a 3-stage DPAL-MOPA system

其中 Oscillator 表示振荡器，用于产生种子激光，HR 为可反射波长范围在 780~800 nm 激光的全反镜，Oven 表示温控器，Cell 表示密闭碱金属蒸气池，PBS 和 OC 分别表示偏振分光棱镜和反射率为 20%的输出镜，Beam splitters 为偏振光入射镜，Pump Module 表示半导体激光器泵浦模块。Focus System 表示聚焦系统，用于改变光斑半径，其中 *f*50 和 *f*60 分别表示焦距为 50 mm 和 60 mm 的凸透镜，Spatial Filter 为空间滤波器，其主要作用是将激光束的高频噪声过滤掉，从而使得激光束具有相对光滑的强度截面。在空间滤波器中，各放大级的孔径光阑的直径与光束经透镜聚焦后的束腰半径大小密切相关，也与种子激光的输出光束束腰半径和品质因子相关。由于目前无法得知 MOPA 放大后激光品质因子的变化情况，暂时决定使用可变光阑作为空间滤波器。Isolator 表示隔离器，Pre-Amplifier、Main-Amplifier 1 和 Main-Amplifier 2 分别表示预放大级、一级主放大级和二级主放大级。

振荡器产生波长为 794.98 nm 的种子激光，种子光经过整形放大系统后的光束半径为 0.20 mm，再经过隔离器到达预放大级。预放大级的密闭蒸气池

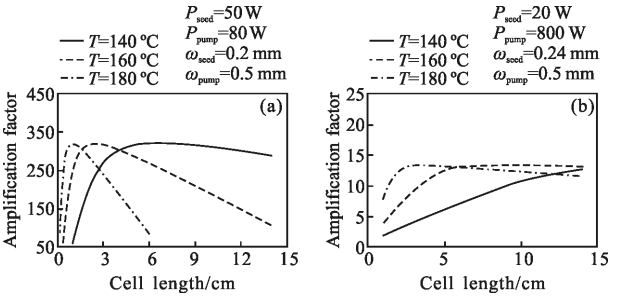
中充入了足量的铷和 400 Torr(1 Torr=133.322 Pa)乙烷气体，此处采用功率为 80 W 半导体激光器阵列作为泵浦源。经过预放大后的激光再次通过整形放大系统进入一级主放大级，此时其光束半径被扩大到 0.24 mm。一级主放大级的密闭蒸气池中的物质组分与预放大级的相同，此放大级的泵浦源采用了功率为 800 W 的半导体激光器阵列。从一级放大级出来的激光通过整形放大系统后其光束半径变为 0.288 mm。然后进入二级主放大级，此放大级的密闭蒸气池同样充入了足量的铷和 400 Torr 乙烷气体，用功率为 2 500 W 的半导体激光器阵列对其进行泵浦，最后输出放大后的激光光束。以上所使用的泵浦半导体激光器的光谱线宽皆为 50 GHz。

2 结果与讨论

2.1 放大级中在不同工作温度下的最佳密闭蒸气池长度

设计多级 DPAL-MOPA 系统时，为了得到稳定的高功率激光输出，首先分析不同工作温度下密闭蒸气池的长度对各级放大系数的影响，以便选择各级放大器中密闭蒸气池的较佳长度。

图 2(a)所示的是不同密闭蒸气池温度条件下，预放大级的放大系数随密闭蒸气池长度的变化曲线。可以看到，蒸气池存在最佳长度，此最佳长度随温度的减小而增大。图 2(b)所示的是不同温度条件下，一级主放大级的放大系数随密闭蒸气池长度的变化曲线。显然，5~6 cm 的密闭蒸气池长度和 160~180 ℃的工作温度是放大效果较为理想的状态。图 2(c)所示的是不同温度条件下，二级主放大级的放大系数随密闭蒸气池长度的变化曲线。不难发现，蒸气池长度大于 5 cm，工作温度为 180 ℃左右时，该级的放大系数最大。此结果只能提供粗略的参数选取范围，为了得到更精确的设计方案，在此基础上详细研究了蒸气池长度和工作温度对各放大级放大系数的影响。



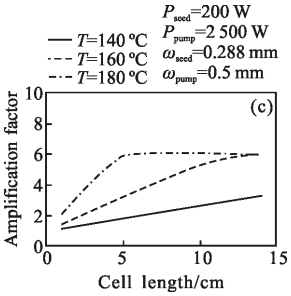


图 2 不同温度下(a)预放大级、(b)一级主放大级和(c) 二级主放大级的放大系数随密闭蒸气池长度的变化曲线

Fig.2 Amplification factor of a pre-amplifier (a), first main-amplifier (b), and second main-amplifier (c) expressed as a function of the cell length at different temperatures

2.2 密闭蒸气池的长度对各放大级增益特性的影响

为了更确切的了解不同长度的密闭蒸气池对 DPAL-MOPA 系统各放大级增益系数的影响，文中分别就长度为 3，5，7 cm 的密闭蒸气池在不同温度条件下对种子光的增益情况进行了详细分析。

2.2.1 预放大级

图 3(a)所示的是预放大级的密闭蒸气池长度为 3 cm 时，其放大系数随泵浦光功率的变化曲线。可以看到，不同温度条件下的放大系数曲线有明显的区别，温度为 160 ℃时，放大系数较大。图 3(b)反映了

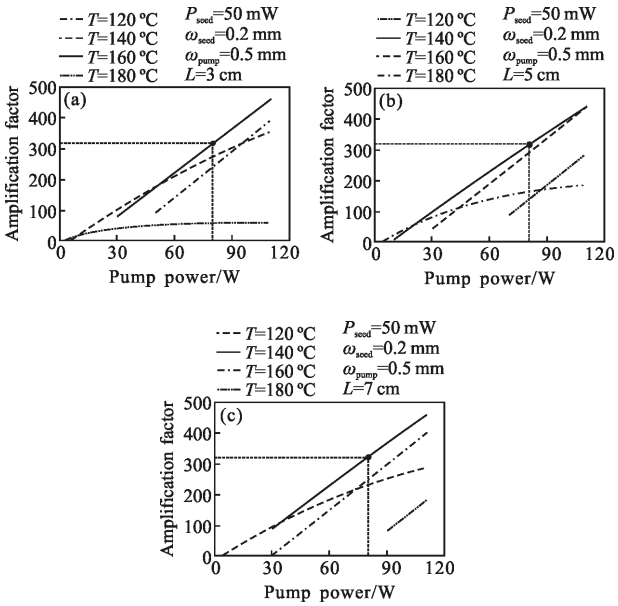


图 3 (a)3 cm、(b)5 cm 和(c)7 cm 蒸气池的预放大级的放大系数随泵浦功率的变化曲线

Fig.3 Amplification factor of the pre-amplifier for a cell with the length of 3 cm (a), 5 cm (b), and 7 cm (c) expressed as a function of the pump power

预放大级的密闭蒸气池长度为 5 cm 时，其放大系数随泵浦光功率的变化曲线。当蒸气池温度为140 ℃时，放大系数曲线最高。图 3(c)表达了预放大级的密闭蒸气池长度为 7 cm 时，其放大系数随泵浦光功率的变化曲线。不难发现，当蒸气池温度为 140 ℃时，放大系数最为理想。

对比图 3(a)、(b)和(c)可以看到，当泵浦功率为 80 W 时，三种长度的放大器都可以将功率为 50 mW 的种子光放大 300 倍。但是，通过观察 140、160 和 180 ℃所对应的曲线的间距，不难发现蒸气池长度为 3 cm 时，此间距较小，即此长度下放大系数对温度的变化不敏感。另外，由于预放大级的增益系数是三级结构中最高的，其放大的自发辐射(ASE)不可忽略，因此较长的密闭蒸气池会导致较大的预放大级 ASE，从而严重影响该级的增益系数。综合考虑以上几个因素，决定选择长度为 3 cm 的密闭蒸气池作为 MOPA 系统的预放大级。

2.2.2 一级主放大级

图 4(a)、(b)和(c)所示的是一级主放大级的密闭蒸气池长度分别为 3、5 和 7 cm 时，该级的放大系数随泵浦光功率的变化曲线。不难看出，三种长度的蒸气池所对应的增益系数分别在 180、170 和 160 ℃时

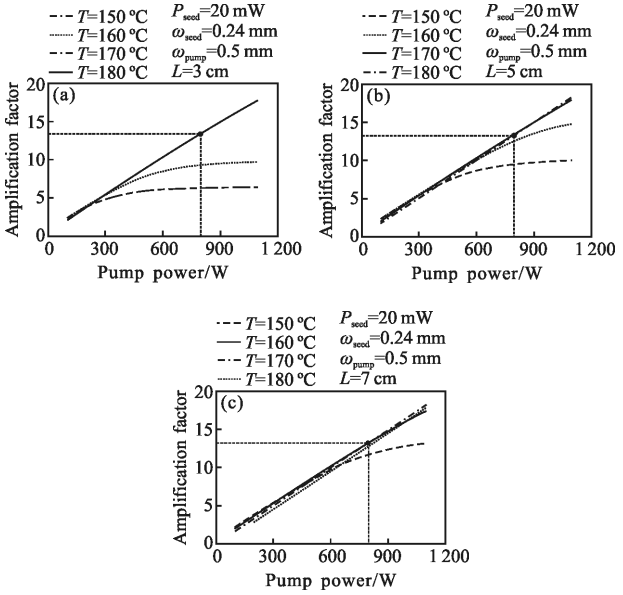


图 4 (a)3 cm、(b)5 cm 和(c)7 cm 蒸气池的一级主放大级的放大系数随泵浦功率的变化曲线

Fig.4 Amplification factor of the first main-amplifier for a cell with the length of 3 cm (a), 5 cm (b), and 7 cm (c) expressed as a function of the pump power

达到最理想状态。当泵浦功率为 800 W 时，三种长度的放大器都可以将功率为 20 W 的入射光放大 13倍左右。为了尽可能抑制 ASE，决定选用长度为 5 cm 的密闭蒸气池作为 MOPA 系统的一级主放大级。

2.2.3 二级主放大级

图 5(a)、(b)和(c)所示的是二级主放大级的密闭蒸气池长度分别为 3、5 和 7 cm 时，该级的放大系数随泵浦光功率的变化曲线。结果显示，当泵浦功率为 2 500 W 时，5 cm 和 7 cm 的放大级均可以将 200 W 的入射激光放大 6 倍，但是 3 cm 的放大级却达不到 6 倍。另外，在此放大级中，由于泵浦功率和输入激光功率都很大，因此升高温度会明显增加系统工作时所产生的热量，这不利于放大器的稳定输出。显然，7 cm 是二级主放大级较为理想的长度。因此，文中选用长度为 7 cm 的密闭蒸气池作为 MOPA 系统的二级主放大级。

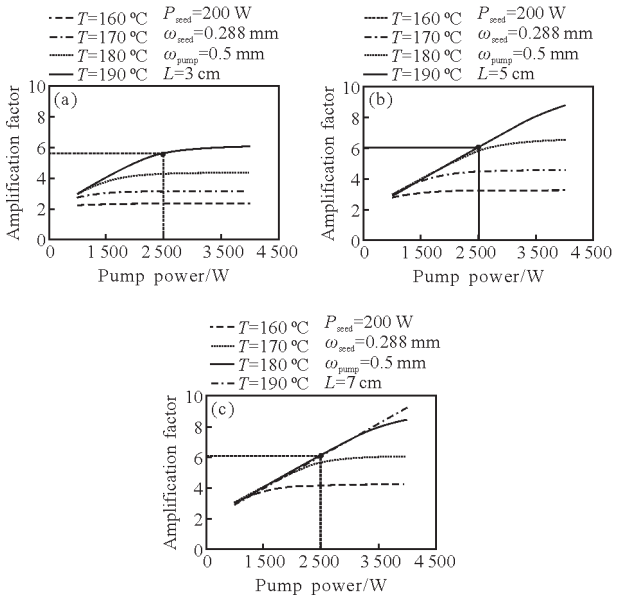


图 5 (a)3 cm、(b)5 cm 和(c)7 cm 蒸气池的二级主放大级的放大系数随泵浦功率的变化曲线

Fig.5 Amplification factor of the second main-amplifier for a cell with the length of 3 cm (a), 5 cm (b), and 7 cm (c) expressed as a function of the pump power

综合对以上三个放大级的分析，可以发现，越靠后的放大级越需要更长的蒸气池和更高的工作温度。文中所建立的三级 DPAL-MOPA 系统的预放大级、一级主放大级和二级主放大级的长度分别为 3、5、7 cm，对应的工作温度分别为 160、170、180 ℃，各

级泵浦功率分别为 80、800、2 500 W。利用此 DPAL-MOPA 系统，理论上可将功率为 50 mW、线宽为 1 GHz 的种子光放大到 1100 W 左右。

2.3 三级 DPAL-MOPA 系统中生成的热与自发辐射能量

根据上文所建立的三能级 DPAL-MOPA 系统，我们研究了此系统工作时，各放大级所产生的热量和自发辐射功率，结果如图 6 所示。

图 6(a)、(b)和(c)所示的是预放大级、一级主放大级和二级主放大级工作时所产生的热量和自发辐射功率随泵浦功率的变化规律。结果表明，各级放大器在工作时自发辐射功率均大于产生的热量，这意味着抑制 ASE 将是构建 DPAL 定标放大系统中重要的技术环节。另外，二级主放大级工作时所产生的热量和自发辐射功率最大，预放大级的最小。

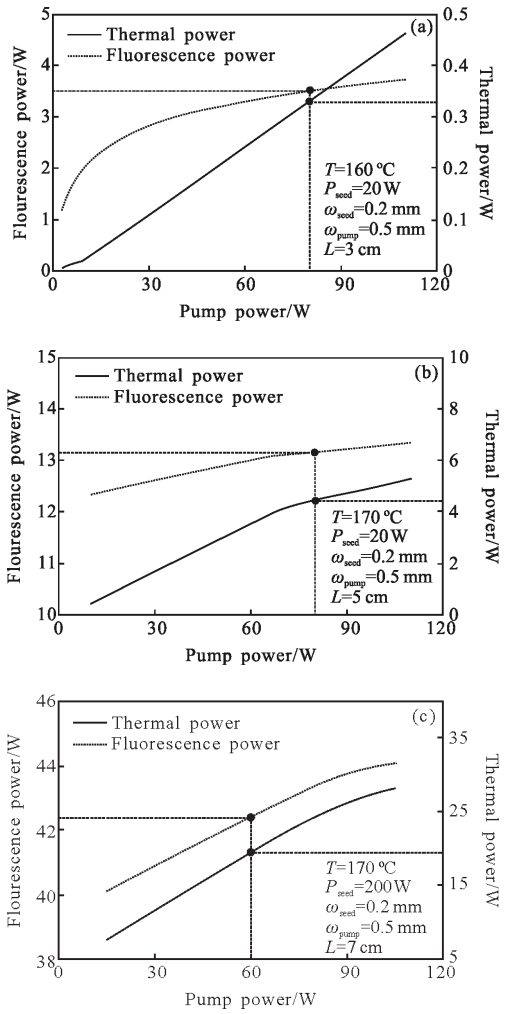


图 6 (a)预放大级、(b)一级主放大级和(c)二级主放大级产生的热量和自发辐射功率随泵浦功率的变化曲线

Fig.6 Fluorescence power and thermal power for the pre-amplifier (a), first main-amplifier (b), and second main-amplifier (c) expressed as a function of the pump power

2.4 理论与实验结果对比

为了验证所建立的 MOPA 理论模型的准确性，利用参考文献[15]中的各物理参量，计算了碱金属 MOPA 系统的提取效率，再将参考文献[15]中实验所得的提取效率与文中的理论计算结果进行了对比分析，其结果如图 7 所示。

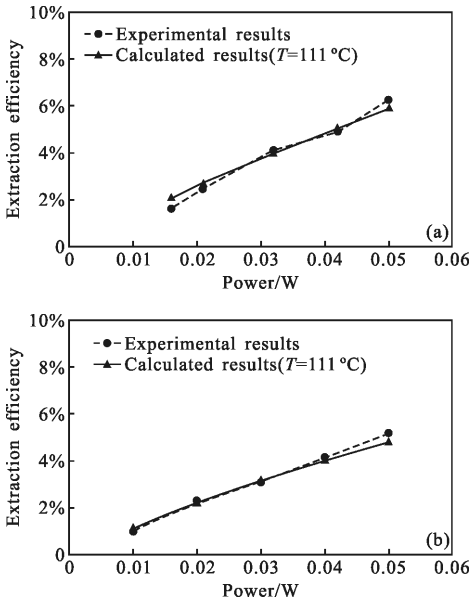


图 7 在蒸气池长度分别为(a) 1.5 cm、(b) 2.0 cm 时，提取效率的实验和理论计算结果

Fig.7 Experimental and calculated extraction efficiencies for a rubidium cell with the length of 1.5 cm (a) and 2.0 cm (b), respectively

从图中可以看出当蒸气池的温度为 111 ℃时，理论值和实验结果吻合较好。由此可推断本文所建立的 MOPA 数学模型具有较好的准确性。

3 结 论

基于碱金属原子受激吸收-受激辐射过程的三能级速率方程，构建了以铷为增益介质的三级DPAL-MOPA 系统，详细地分析了具有端面泵浦构造的多级放大系统的放大过程，然后分析了不同温度条件下 DPAL-MOPA 系统各放大级的增益系数随密闭蒸气池长度的变化规律。结果显示，放大器中的密闭蒸气池存在着最佳长度，而不同温度所对应的最佳

长度有所不同,蒸气池内温度越高,其对应的最佳长度越短。接着又分析了长度分别为 3,5,7 cm 的三种密闭蒸气池在不同温度条件下的增益特性。最终确定了预放大级的密闭蒸气池长度为 3 cm,工作温度为 160 ℃;一级主放大级的为 5 cm,工作温度为 170 ℃;二级主放大级的为 7 cm, 工作温度为 180 ℃。理论上,此系统可以将功率为 50 mW、线宽为 1 GHz 的种子光放大至 1 100 W 左右。最后,文中也评估了采用此设计方案时,整个 MOPA 系统所产生的自发辐射功率和热功率。DPAL 作为一种尚处于初级阶段的激光器,虽有着非常高的饱和增益和量子效率,但是其发光物理过程比固体激光器复杂得多。另外,高功率多级 DPAL-MOPA 系统中所存在的严重的 ASE 和自吸收等现象也需要在未来的研究中加以仔细评估。

参考文献:

[1] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. Resonance transition 795-nm rubidium laser [J]. ***Optics Letters***, 2003, 28(23): 2336-2338.

[2] Zhdanov B V, Maes C, Ehrenreich T, et al. Optically pumped potassium laser [J]. ***Opt Commun***, 2007, 270(2): 353-355.

[3] Zhdanov B V, Ehrenreich T, Knize R J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser[J]. ***Electron Lett***, 2008, 44(9): 582-583

[4] Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, et al. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2010, 47 (051405): 1 -9. (in Chinese)

[5] Krupke W F. Diode pumped alkali laser: US, Patent [P]. 2001, 6(643): 311.

[6] Wang You, Tadashi Kasamatsu, Zheng Yujin, 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.

[7] Zhdanov B V, Shaffer M K, Knize R J. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. ***Opt Express***, 2009, 17(17): 14767-14770.

[8] Han Juhong, Wang You, Cai He, 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.

[9] Han Juhong, Wang You, Cai He, 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.

[10] Jianhua Yu, Qiang Zhu, Wu Xie, et al. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2006, 43(7): 46-51. (in Chinese)

[11] Krupke W F. Diode Pumped Alkali Laser:[P]. US, Patent Application US 2003/0099272 Al, 2003

[12] Lin Dongfeng, Chen Shengping, Hou Jing, et al. Ultrashort pulsed fiber sources in MOPA configurations [J]. ***Optoelectronic Technology***, 2008, 28(4): 277-282. (in Chinese)

[13] Wang You, Koichi Inoue, Kan Hirofumi, et al. A MOPA with double end pumped configuration using total internal reflection1[J]. ***Laser Physics***, 2010, 20(2): 447-453.

[14] Zhdanov B V, Knize R J. Efficienct diode pumped cesium vapor amplifier[J]. ***Opt Commun***, 2008, 281(15-16): 4068-4070.

[15] Hostutler D A, Klennert W L. Power enhancement of a Rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier[J]. ***Opt Exp***, 2008, 16(11): 8050-8053.

[16] Yang Z, Wang H, Lu Q, et al. Modeling, numerical approach, and power scaling of alkali vapor lasers in side-pumped configuration with flowing medium [J]. ***J Opt Soc Am B***, 2011, 28(6): 1353-1364.

[17] Yang Z, Wang H, Lu Q, et al. Modeling of an optically side-pumped alkali vapor amplifier with consideration of amplified spontaneous emission [J]. ***Opt Exp***, 2011, 19(23): 23118-23131.

[18] Yang J, Pan B, Yang Y, et al. Modeling of a diode side pumped cesium vapor laser MOPA system [J]. ***IEEE***, 2014, 50(3): 123-128.

[19] Pan B, Wang Y J, Zhu Q, et al. Modeling of an alkali vapor laser MOPA system [J]. ***Opt Commun***, 2011, 284(7): 1963-1966.

[20] Greg A Pitz, Andrew J Sandoval, Tiffany B Tafoya, et al. Pressure broadening and shift of the rubidium D1 transition and potassium D2 transitions by various gases with comparison to other alkali rates [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer***, 2014, 140(2014): 18-29.

[21] Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, et al. Endpumped continuous-wave alkali vapor lasers experiment, model, andpower scaling[J]. ***Opt Soc Amer B***, 2004, 21(12): 2151-2163.

[22] Xu Yan, Chen Fei, Xie Jijiang, et al. Influence of buffer gas on performance of alkali vapor laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(2): 455-460. (in Chinese)