

射频波导CO₂激光放大技术

董祝君 张冉冉 周益平 曾文彬 赵崇霄 黄盼 郭劲 陈飞 潘其坤

CO₂ laser amplification technology based on RF waveguide

DONG Zhu-jun, ZHANG Ran-ran, ZHOU Yi-ping, ZENG Wen-bin, ZHAO Chong-xiao, HUANG Pan, GUO Jin, CHEN Fei, PAN Qi-kun

引用本文:

董祝君, 张冉冉, 周益平, 曾文彬, 赵崇霄, 黄盼, 郭劲, 陈飞, 潘其坤. 射频波导CO₂激光放大技术[J]. 中国光学, 2026, 19(2): 251-257. doi: 10.37188/CO.2025-0113

DONG Zhu-jun, ZHANG Ran-ran, ZHOU Yi-ping, ZENG Wen-bin, ZHAO Chong-xiao, HUANG Pan, GUO Jin, CHEN Fei, PAN Qi-kun. CO₂ laser amplification technology based on RF waveguide[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 251-257. doi: 10.37188/CO.2025-0113

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0113>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2- μ m MOPA结构全光纤激光器输出特性研究

Output characteristics of an all-fiber laser with a 2- μ m MOPA structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 399 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0191>

射频轴快流CO₂激光器动态L型阻抗匹配网络设计

Design of dynamic L-type impedance matching network in RF excited fast axial flow CO₂ lasers

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1155 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0096>

单片集成式主振荡功率放大器研究进展

Research progress of monolithic integration master-oscillation power-amplifiers

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 61 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0022>

基于多纵模振荡种子源的高功率窄线宽光纤激光器关键技术分析及研究现状

Key technology analysis and research progress of high-power narrow linewidth fiber laser based on the multi-longitudinal-mode oscillator seed source

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 38 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0074>

机载宽温域CO₂激光器温控方法

Temperature control method of CO₂ laser operating in airborne wide temperature range

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 390 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0089>

温度调谐ZnGeP₂长波红外光参量振荡器

Tunable long-wave infrared optical parametric oscillator based on temperature-adjustable ZnGeP₂

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 861 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0217>

文章编号 2097-1842(2026)02-0251-07

射频波导 CO₂ 激光放大技术

董祝君^{1,2}, 张冉冉^{1,2*}, 周益平^{1,2*}, 曾文彬^{1,2}, 赵崇霄^{1,2}, 黄盼^{1,2}, 郭劲^{1,2}, 陈飞^{1,2}, 潘其坤^{1,2}
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:面向极紫外光刻光源对高功率、高光束质量 CO₂ 种子激光的应用需求, 本文开展了基于射频波导体制的 CO₂ 激光放大技术研究。一方面, 分析了射频波导放大器的静态插入损耗与输出光束质量随入射光参数的变化关系, 确定了最佳模式匹配参数。另一方面, 建立了多级射频波导放大仿真模型, 理论计算了工作气压与放电泵浦功率等参数对放大倍率的影响规律。在实验中, 引入增益介质调控技术, 实现了激光系统放大性能的优化。实验结果表明: 在 2.5 m 的波导长度下, 传输效率达到了 91.4%, 输出光束在水平方向与竖直方向上的光束质量因子分别为 1.03 与 1.05; 二级射频波导放大系统的总放大倍率达 68 倍, 最终获得了重复频率为 50 kHz、脉冲宽度为 20 ns、平均功率为 17.1 W 的高光束质量的 CO₂ 激光输出。

关键词: CO₂ 激光; 主振荡功率放大; 模式匹配; 增益介质调控

中图分类号: TN248.2 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0113 CSTR: 32171.14.CO.2025-0113

CO₂ laser amplification technology based on RF waveguide

DONG Zhu-jun^{1,2}, ZHANG Ran-ran^{1,2*}, ZHOU Yi-ping^{1,2*}, ZENG Wen-bin^{1,2}, ZHAO Chong-xiao^{1,2},
HUANG Pan^{1,2}, GUO Jin^{1,2}, CHEN Fei^{1,2}, PAN Qi-kun^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhangrrciomp@163.com; zhouyiping2020@126.com*

Abstract: Toward the application demand for high-power, high-beam-quality CO₂ seed lasers in extreme ultraviolet lithography light sources, the CO₂ laser amplification technology were investigated based on a radio-frequency (RF) waveguide architecture. On one hand, The static insertion loss and output beam quality of the RF waveguide amplifier were measured as a function of incident beam parameters and the optimal mode-matching parameters were determined. On the other hand, a numerical model of the multi-stage RF waveguide amplification was developed to evaluate the effects of the gas pressure and the discharge pumping power on the amplification factor. The technology of regulating with gain medium was implemented to op-

收稿日期: 2025-09-01; 修订日期: 2025-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62405313, No. 62335016, No. 12305222); 中国科学院战略先导科技专项 (No. XDA 0380200); 中国科学院青年创新促进会 (No. 2021216)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62405313, No. 62335016, No.12305222); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA 0380200); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2021216)

optimize the amplification performance in the experiment. The experimental results indicate that the optimal mode-matching conditions were identified with a waveguide length of 2.5 m, yielding a transmission efficiency of 91.4%. The beam quality factors of the output beam in the horizontal and vertical directions were 1.03 and 1.05, respectively. An overall amplification factor of $68\times$ was achieved in a dual-stage RF waveguide amplifier. The system delivered CO₂ laser emission with a repetition rate of 50 kHz, a pulse duration of 20 ns, and an average output power of 17.1 W, satisfying the design criteria and demonstrating its suitability for high-power, high-beam-quality seed laser applications.

Key words: CO₂ laser; master oscillator power amplifier; mode-matching; gain medium regulation

1 引言

极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)光刻机是目前唯一可实现 7 nm 以下制程芯片量产的制造装备^[1-2],其光源采用激光产生等离子体(Laser Produced Plasma, LPP)技术路线^[3-4]。其中,基于主振荡-功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)体制的高重复频率、短脉冲、万瓦级 CO₂ 驱动激光是 LPP-EUV 光源的核心部件之一^[5-6]。在产业化应用中,CO₂ 驱动激光由种子激光系统与主放大系统组成^[7],其中种子激光系统包含了主振荡光、预放大器与隔离系统^[8]。但受核心元器件损伤阈值与消光比的限制,主振荡光的输出功率通常较低,对预放大级增益提出了极高要求,严重影响了种子激光系统的光束质量与输出功率^[9-11]。因此,如何在保证光束质量的前提下,提升预放大器能量提取效率是 CO₂ 种子激光系统的主要研究方向之一。

全球多家研究机构围绕高性能 CO₂ 种子激光系统中的核心技术展开了技术攻关。2008 年,日本 Gigaphoton 公司联合 J.S.C Laser Physics 公司研制了射频板条预放大器,其结构为 2 mm 电极间隙的 13 程 60 mm×600 mm 几何截面,当重复频率为 100 kHz、脉冲宽度为 20 ns 时,获得了 10 倍放大倍率^[12-13]。2015 年,荷兰 ASML 公司,面向 NXE: 3300B 光刻机的更高驱动激光需求,研制了高功率种子激光模块,实现了百瓦量级种子激光输出,极大地优化了驱动激光功率^[14-15]。2023 年,中国科学院空天信息创新研究院叶静涵等通过气压调控和同位素调谐技术提升了 CO₂ 激光放大器的放大能力,当 C¹³ 和 O¹⁸ 的占比各为 100% 和 50% 时,将能量为 0.01 J 的 10.6 μm 种子激光放大至 0.05 J,相对于常规气体放大能

力提升了 175%^[16]。当前面向 EUV 光源的 CO₂ 种子激光系统多采用射频板条作为放大介质,板条放大器相对于射频波导放大器在增益强度与系统体积方面具有较强优势,但在光束质量与光束指向稳定性方面处于劣势^[17]。鉴于应用于 EUV 光源的主泵浦 CO₂ 激光链路长度在百米以上,为保证光束质量和光束指向稳定性,并降低对光束调控装置的指标需求,本论文开展了基于射频波导体制的多级 CO₂ 激光预放大技术研究。研发了一套基于射频波导体制的 CO₂ 激光 MOPA 系统,分析了入射光束尺寸对波导放大器插入损耗及输出光束质量的影响规律,确定了最优的模式匹配参数。构建了射频波导 CO₂ 激光放大的理论模型,设计并搭建了二级波导放大系统,通过优化各级放大器的腔压,开展了多级放大器的增益介质调控,以有效提升放大器的放大能力。

2 波导 CO₂ 放大模型及功率放大原理

2.1 多级波导放大系统实验装置

本文所用射频波导 CO₂ 激光放大器结构如图 1 所示,采用五折叠反射式波导架构。光束在放大器内部由铜反射镜实现反射,经过共 2.5 m 的有效增益距离。入射端与出射端分别配置镀有增透膜的硒化锌(ZnSe)窗口平面镜,为抑制自发辐射光,放大窗口镜采用了倾斜放置。波导部分采用内径为 3 mm 的“D”型空芯波导管结构。波导管材料为高纯度氧化铝陶瓷,内部介质为混合气体,其体积配比为 V(CO₂):V(N₂):V(He):V(Xe)=1:1:8:0.5。混合气体填充于整个波导腔体内部,在射频放电激励下形成增益区域。激光束沿空芯波导传播过程中实现能量放大,为优化

静态插入损耗与输出光束质量, 需考虑入射光束参数的影响。

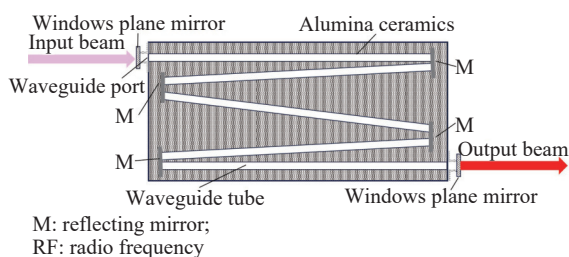


图 1 射频波导放大器结构

Fig. 1 Structure of the RF waveguide amplifier

本文搭建了二级 CO₂ 激光放大 MOPA 系统, 其结构如图 2(彩图见期刊电子版)所示。研究中使用了 CO₂ 激光器的主振荡光, 重复频率为 50 kHz, 脉宽为 20 ns, 平均功率为 0.25 W。聚焦系统采用了焦距为 67.0 mm 和 63.5 mm 的 ZnSe 透镜。通过改变透镜的相对位置, 调节放大器波导入口处的入射光束直径, 且令入射光束束腰恰好在波导入口处。为提高注入光束的空间模式质量, 在焦点处设置小孔光阑作为空间滤波器, 从而抑制高阶模分量及杂散光干扰。在每级放大器前采用两片铜反射镜, 将入射光束耦合至各放大器。通过水冷装置将主振荡光激光器与两级放大器的温度控制在 20 °C。

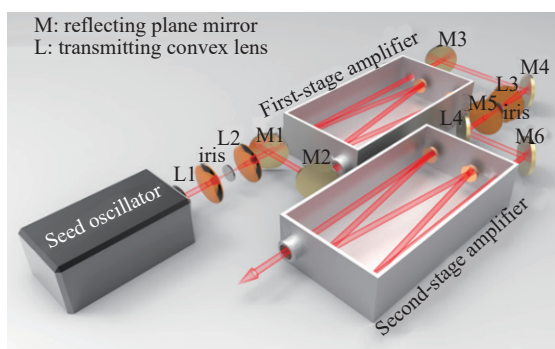


图 2 二级放大系统实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the secondary amplification system

2.2 CO₂ 激光放大理论

在增益介质中, 可采用 Frantz-Nodvik 模型描述脉冲激光的放大过程。该模型适用于小信号增益到饱和放大之间的能量传输过程, 放大前后的脉冲功率关系可表示为^[18]:

$$I_{\text{out}} = I_s \cdot \log \{ 1 + \exp[(g_0 - \alpha) \cdot L] \cdot [\exp(I_{\text{in}}/I_s) - 1] \}, \quad (1)$$

式中, I_{in} 是输入功率, I_{out} 是输出功率, I_s 是放大饱和功率, g_0 是小信号增益系数, α 是传输损耗系数, L 是激光在放大器中的总路程。

$$g_0 = \sigma_0 \Delta N, \quad (2)$$

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_0 \tau_e}, \quad (3)$$

式中, ΔN 是反转粒子数密度, σ_0 是有效受激截面, h 为普朗克常数, ν 是频率, τ_e 是激发态寿命。

$$\sigma_0 \approx \frac{\lambda^2 A_{21}}{8\pi \Delta\nu_{\text{H}}(P)}, \quad (4)$$

式中, λ 是波长, A_{21} 是自发辐射爱因斯坦系数, $\Delta\nu_{\text{H}}(P)$ 是均匀线宽, P 是气压。当气压高于 1.333 kPa 时, 谱线加宽主要由碰撞引起^[16]。

$$\Delta N = \frac{\tau_e \eta (P_p - P_T)}{h\nu V}, \quad (5)$$

式中, P_p 是泵浦放电功率, P_T 是阈值功率, V 是有效放电体积, η 是单位体积、单位时间泵浦放电功率最终形成上能级激光粒子数增加的转化效率。将上式常量与气压整理为 $S(P)$:

$$S(P) = \frac{\lambda^2 A_{21} \tau_e}{8\pi V h \nu \Delta\nu_{\text{H}}(P)}. \quad (6)$$

根据 CO₂ 激光放大应用需求, 本文仅考虑 10P(20) 线和温度统一为 293.15 K, 通过 HITRAN 数据库查阅上式中的常量^[19]。为构建 CO₂ 激光放大模型, 采用常数与压力展宽系数来描述 $\Delta\nu_{\text{H}}(P)$ 的变化。为描述 $\eta(P_p - P_T)$ 与泵浦放电功率的关系, 根据 Ilukhin B I 等人的报道知, 随着输入的放电泵浦功率的增加, 输出光功率逐渐饱和甚至缓慢降低。这种现象是由上能级能量累计转化为热能、碰撞猝灭等结果导致的^[20], 本文采用了指数饱和模型。小信号增益系数随气压与放电泵浦功率的变化关系, 如式 (7) 所示。

$$g_0(P, P_p) = \left[1 - e^{-\frac{P_p - 144.0}{245.9}} \right] / (0.03569P + 0.3947). \quad (7)$$

3 分析与讨论

3.1 输出光束的传输损耗与光束质量

首先分析了波导口处入射光束束腰直径对波

导传输效率与输出光束质量的影响规律,如图 3 (彩图见期刊电子版)所示。造成图中现象的主要原因在于:当入射光束束腰直径由 0.5 mm 增大至 1.0 mm 时,初始入射光束束腰直径越大,瑞利距离越大,光束经过更长距离后发散至管壁处,导致传输过程中光束外围与波导壁的反射次数减少,传输损耗降低,显著提升了传输效率;当入射光束束腰直径在 1.0 mm~2.0 mm 时,反射次数减少但单次反射光束与波导壁的衍射损耗增加,总损耗变化缓慢,与反射次数无关的固有损耗几乎不变,传输效率在 91.4% 至 94.5% 范围内波动;当入射光束束腰直径由 2.0 mm 增大至 2.8 mm 时,光束直径越接近管壁内径,光束外围与波导壁的衍射损耗引起的传输效率下降越明显。不同入射直径对应的输出光束轮廓如图 3 插图所示,当入射光束束腰直径逐渐增大时,高斯光束发散角降低,反射次数减少,光束轮廓劣化情况逐步得到改善,表明波导模式耦合更为合理。

为了明确入射光束束腰直径对输出光束质量因子的影响,测量了不同入射光束尺寸下的输出光束质量因子,实验结果如图 4(a) (彩图见期刊电子版)所示。规律与图 3 基本一致,随入射光束直径增加,输出光束质量因子呈现先降低后升高

的规律,当入射光束直径为 2.0 mm 时,输出光束质量因子最小。当入射光束束腰直径在 1.7 mm 至 2.4 mm 范围时,光束传输效率较高;当入射光束束腰直径为 2.0 mm 时,输出光束质量因子如图 4(b) (彩图见期刊电子版)所示,在水平方向与垂直方向分别为 1.03 和 1.05,对应传输效率为 91.4%。综合考虑传输效率与输出光束质量两方面因素,本文后续放大实验均采用 2.0 mm 入射光束直径作为注入参数。

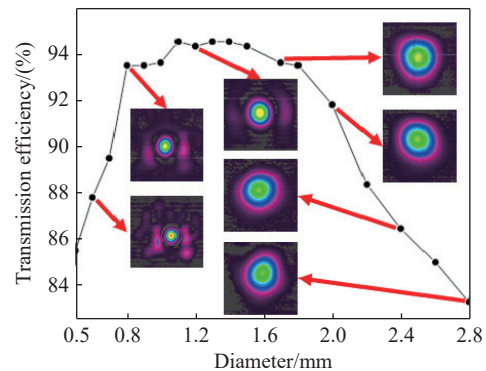


图 3 传输效率随入射光束直径的变化情况 (插图为输出光束强度分布图)

Fig. 3 Transmission efficiency varying with the diameter of the incident light beam. (The inset illustrates the distribution of the output light beam intensity)

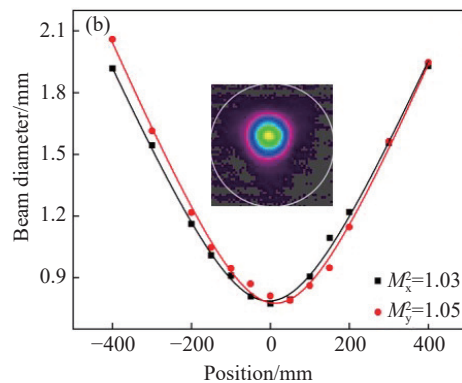
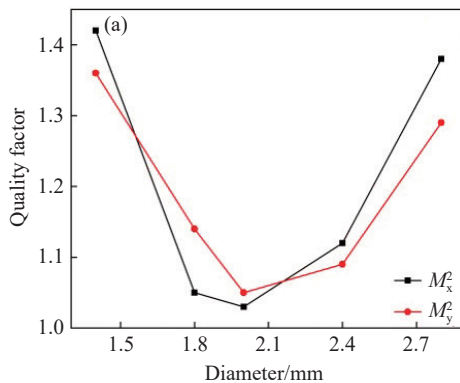


图 4 光束质量因子测量结果。(a) 光束质量因子随入射光束直径的变化关系; (b) 入射直径为 2 mm 时测量结果, 插图 of 光束强度分布图

Fig. 4 Measurement results of the beam quality factor. (a) Relationship between the beam quality factor and the diameter of the incident beam; (b) measurement results when the incident diameter is 2 mm, with the inset showing the beam intensity distribution

3.2 激光增益调控技术研究

本文基于上述 Frantz-Nodvik 激光放大理论, 构建了波导放大的数值模型, 模拟了不同腔压配置和放电泵浦功率对放大系统输出功率的影响, 如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。可以看出, 随

着放电泵浦功率的增加, 输出激光功率逐渐增加, 由于低腔压的小信号增益系数高, 输出激光功率也高。利用两级放大器构成放大系统, 研究不同气压下输出功率随放电泵浦功率的变化情况。入射光功率设置为 0.25 W, 放大系统腔压分别为

4.0 kPa、6.0 kPa、8.0 kPa 和 10.0 kPa 时, 输出光功率分别为 28.3 W、16.2 W、10.5 W 和 7.4 W, 对应的总放大倍率分别为 117、65、42 和 30 倍。下文将开展实验确认最佳增益的腔压。

实验测量的放大系统输出功率随腔压和放电泵浦功率变化情况, 如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。放大系统的输出激光功率随放电泵浦功率的增加而增加。如图 6(a) 所示, 入射激光功率为 0.25 W, 当第一级放大器腔压分别为 5.0 kPa、5.5 kPa、6.0 kPa 和 7.0 kPa 时, 最高输出光功率分别为 3.4 W、3.6 W、3.5 W 和 3.0 W; 将第一级放大器腔压固定为 5.5 kPa, 且将 3.6 W 的输出激光作为第二级的输入激光, 如图 6(b) 所示, 开展第二级放大增益调控实验研究。当第二级放大器腔压分别为 5.0 kPa、5.5 kPa、6.0 kPa 和 7.0 kPa 时, 最高输出光功率分别为 15.6 W、17.1 W、15.8 W 和 12.5 W。在两级放大系统中, 最佳腔压均为 5.5 kPa, 实现了 68 倍的放大倍率。仿真结果与

实验结果在高于 6.0 kPa 时吻合度高, 但在低于 6.0 kPa 时出现明显差异, 主要是因为气压较低时射频匹配电路与气体阻抗不匹配, 导致放电不稳定, 使得低气压时输出功率随气压的降低而降低。

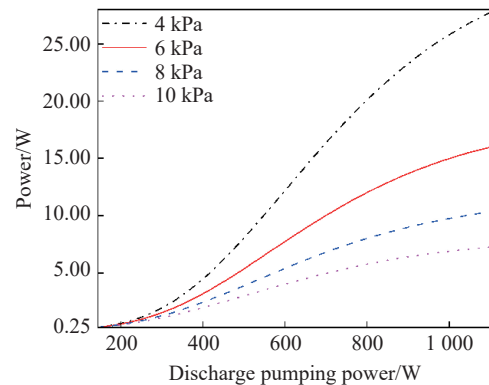


图 5 不同腔压下放大系统输出功率随泵浦放电功率的变化情况

Fig. 5 Output power of the amplification system varying with the discharge pumping power at different cavity pressures

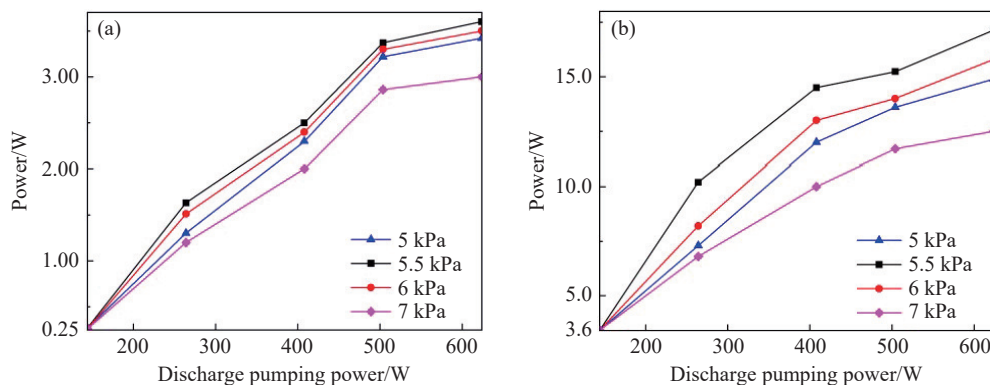


图 6 不同腔压下输出功率随放电泵浦功率的变化情况。(a) 第一级放大器; (b) 第二级放大器

Fig. 6 Variation of output power with discharge pumping power at different cavity pressures. (a) First-stage amplifier; (b) second-stage amplifier

4 结 论

本文面向 EUV 光刻对高功率、高光束质量 CO₂ 种子激光系统的应用需要, 开展了基于射频波导结构的 CO₂ 激光 MOPA 激光技术研究。研究了入射光束参数对静态插入损耗及输出光束模式的影响。通过建立射频波导多级放大理论模型, 研究了小信号增益系数随腔压和泵浦放电功

率的变化规律。通过实验确定了入射光束直径与波导口内径的最佳比为 0.67, 此时传输效率达 91.4%, 经过放大器后, 输出光束在水平与垂直方向的光束质量因子分别为 1.03 和 1.05。通过增益调控技术, 当注入 0.25 W 主振荡光功率时, 实现了 68 倍的稳定功率放大, 获得了重复频率为 50 kHz、脉冲宽度为 20 ns、输出功率为 17.1 W 的脉冲激光输出。

参考文献:

- [1] YANG Y X, LIU K X, GAO Y H, *et al.* . Advancements and challenges in inverse lithography technology: a review of

- artificial intelligence-based approaches[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 250.
- [2] 王佶, 赵昆. 高重复频率极紫外光源的产生和光谱技术研究进展[J]. *中国激光*, 2024, 51(7): 0701002.
WANG J, ZHAO K. Research progress in generation and spectral technology of high-repetition-rate extreme-ultraviolet-light sources[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(7): 0701002. (in Chinese).
- [3] 付轶文, 林楠. 面向极紫外光刻光源液滴锡靶的光学测量与检测进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(13): 1300006.
FU L W, LIN N. Progress in optical measurement and detection of tin droplets for extreme ultraviolet lithography light sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(13): 1300006. (in Chinese).
- [4] SHEN W H, LU Q P, SONG Y, *et al.*. Study on tin contamination deposition mechanism on collector mirror surfaces in LPP-EUV light sources based on hydrodynamics and particle simulation theory[J]. *Vacuum*, 2025, 233: 114024.
- [5] 游聪, 黄维, 林高洁, 等. 基于遗传算法的快轴流 CO₂ 激光放大器的参数优化[J]. *中国激光*, 2024, 51(7): 0701016.
YOU C, HUANG W, LIN G J, *et al.*. Optimization of fast axial flow CO₂ laser amplifier parameters based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(7): 0701016. (in Chinese).
- [6] 黄盼, 赵崇霄, 董祝君, 等. 射频轴快流 CO₂ 激光器动态 L 型阻抗匹配网络设计[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(5): 1155-1163.
HUANG P, ZHAO CH X, DONG ZH J, *et al.*. Design of dynamic L-type impedance matching network in RF excited fast axial flow CO₂ lasers[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1155-1163. (in Chinese).
- [7] RAZEGHI M, BAI Y B, WANG F H. High-power, high-wall-plug-efficiency quantum cascade lasers with high-brightness in continuous wave operation at 3-300 μ m[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 252.
- [8] ZHANG R R, GAO Y, PAN Q K, *et al.*. Experimental study on optical isolation characteristics of SF₆ for a high-repetition-rate nanosecond CO₂ laser[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(8): 1949-1955.
- [9] 杜彤耀. 高损伤阈值空间光调制器关键技术及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023: 38-62.
DU T Y. *Research on key technology and application of high laser damage threshold spatial light modulator*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023: 38-62. (in Chinese).
- [10] HUMMLER K, ZHU Q SH, BEHM K, *et al.*. High-power EUV light sources (>500W) for high throughput in next-generation EUV lithography tools[J]. *Proceedings of SPIE*, 2024, 12953: 129530V.
- [11] IWAMOTO F, UENO Y, NAGAI S, *et al.*. Development progress of Gigaphoton's LPP EUV light source for inspection systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2024, 12953: 1295313.
- [12] NOWAK K M, SUGANUMA T, ENDO A, *et al.*. Efficient and compact short pulse MOPA system for laser-produced-plasma extreme-UV sources employing RF-discharge slab-waveguide CO₂ amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7005: 70051Q.
- [13] SCHAFFGANS A A, BROWN D J, FOMENKOV I V, *et al.*. Performance optimization of MOPA pre-pulse LPP light source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9422: 94220B.
- [14] NOWAK K M, OHTA T, SUGANUMA T, *et al.*. Multiline short-pulse solid-state seeded carbon dioxide laser for extreme ultraviolet employing multipass radio frequency excited slab amplifier[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 881-883.
- [15] BRANDT D C, FOMENKOV I V, FARRAR N R, *et al.*. CO₂/Sn LPP EUV sources for device development and HVM[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 86791G.
- [16] 叶静涵, 朱子任, 白进周, 等. 高气压同位素 CO₂ 皮秒激光脉冲放大输出特性理论研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101017.
YE J H, ZHU Z R, BAI J ZH, *et al.*. Theoretical research on output characteristics of high-pressure isotope CO₂ picosecond pulse laser amplification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101017. (in Chinese).
- [17] 肖龙胜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 2 kW 射频板条 CO₂ 激光器输出光束整形特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0402008.
XIAO L SH, TANG X H, QIN Y X, *et al.*. Shaping characteristics of output beam of 2 kW radio frequency slab CO₂ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0402008. (in Chinese).
- [18] 张冉冉. 短脉冲 CO₂ 激光放大与噪声光隔离技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021: 20-28.
ZHANG R R. *Study on technology of short pulse CO₂ laser amplification and noise isolation*[D]. Changchun:

University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021: 20-28. (in Chinese).

- [19] GORDON I E, ROTHMAN L S, HARGREAVES R J, *et al.*. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107949.
- [20] ILUKHIN B I, UDALOV Y B, KOCHETOV I V, *et al.*. Theoretical and experimental investigation of a waveguide CO₂ laser with radio-frequency excitation[J]. *Applied Physics B*, 1996, 62(2): 113-127.

作者简介:



张冉冉(1994—),男,山东济宁人,博士,副研究员。2021年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事气体激光器及其应用等领域的研究。E-mail: zhangrciomp@163.com



周益平(1993—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,2023年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事激光技术与 EUV 光源等领域的研究。E-mail: zhouyiping2020@126.com