

文章编号: 1000-7032(2025)10-1916-14

固体 MOPA 激光器光束质量优化技术研究进展

张益嘉¹, 付鑫鹏², 阮迪², 刘振², 付喜宏², 白素平^{1*}, 王蓓^{3*}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 固体 MOPA (Master oscillator power amplifier) 激光器是一种通过将固体激光器的主振荡器与功率放大器组合, 放大低功率信号以输出高功率激光的装置, 在激光加工、精密测量、医疗治疗和科学研究等领域有着广泛应用。光束质量作为激光器输出性能的关键指标, 直接决定了激光器在这些应用中的效果和精度。但由于固体 MOPA 激光器中热效应的存在, 激光输出过程中常伴随着光束质量的持续恶化, 导致性能降低, 因此优化光束质量便成为激光器性能提升的关键, 在激光器的设计与应用中具有重要的研究与实践意义。本文综述了固体 MOPA 激光器光束质量优化技术的研究进展, 重点介绍了热效应抑制技术、负透镜法、相位共轭法、可变形镜法、球差自补偿法、增益导引法和光束整形法等优化方法。通过分析这些技术的原理、实验进展及应用效果, 讨论了它们在提高光束质量方面的挑战和创新成果。此外, 文章还指出了固体 MOPA 激光器在高功率、高效率条件下光束质量优化的难点, 并展望了未来可能的研究方向和技术突破。

关键词: MOPA; 光束质量; 波前畸变; 像差校正

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250087

CSTR: 32170.14.CJL.20250087

Research Progress of Beam Quality Optimization Technology for Solid-state MOPA Lasers

ZHANG Yijia¹, FU Xinpeng², RUAN Di², LIU Zhen², FU Xihong², BAI Suping^{1*}, WANG Ji^{3*}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

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

3. School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Authors, E-mail: baisp@163.com; jijj_w@163.com;

Abstract: Solid-state master oscillator power amplifier (MOPA) lasers are devices that combine the master oscillator and power amplifier of solid-state lasers to amplify low-power signals and output high-power lasers. They are widely used in laser processing, precision measurement, medical treatment, and scientific research. Beam quality, as a key indicator of laser output performance, directly determines the effect and accuracy of the laser in these applications. However, due to the thermal effect in solid-state MOPA lasers, the beam quality often deteriorates continuously during the laser output process, leading to performance degradation. Therefore, optimizing beam quality has become a key to improving laser performance and has significant research and practical significance in the design and application of lasers. This paper reviews the research progress of beam quality optimization techniques for solid-state MOPA lasers, focusing on introducing optimization methods such as thermal effect suppression technology, negative lens method, phase conjugation method, deformable mirror method, spherical aberration self-compensation method, gain guiding method, and beam shaping method. By analyzing the principles, experimental progress, and application

收稿日期: 2025-03-21; 修订日期: 2025-04-09

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4605102); 吉林省科技发展计划项目(20220508036RC)

Supported by National Key R&D Program of China(2023YFB4605102); Science and Technology Development Program of Jilin Province(20220508036RC)

effects of these technologies, the challenges and innovative achievements in improving beam quality are discussed. In addition, the difficulties in optimizing beam quality under high-power and high-efficiency conditions for solid-state MOPA lasers are pointed out by the article, and possible future research directions and technological breakthroughs are anticipated.

Key words: master oscillator power amplifier(MOPA); beam quality; wavefront distortion; aberration correction

1 引言

MOPA(Master oscillator power amplifier)激光器是通过将低功率的主振荡器与功率放大器相结合,从而实现高功率输出的激光系统。20 世纪 60 年代初期,激光技术的出现使人们能够获得高相干性的光束,但这些光束的功率往往较低,不能满足高功率应用的需求。因此在激光技术出现不久后,根据 1958 年 Arthur Leonard Schawlow 和 Charles Townes 提出的激光放大器的概念^[1],在上世纪 70 年代,科研人员对于 MOPA 技术的研究开始逐渐深入,尤其是在固态激光器和气体激光器领域开始尝试通过将主振荡器和功率放大器结合,利用低功率的激光信号,经过多级放大获得更高输出功率^[2-4]。如今,固体 MOPA 激光器在激光加工、医疗、精密测量等领域得到广泛应用。光束质量作为其重要输出特性之一,直接决定了激光器输出光束的聚焦能力、传播特性以及在实际应用中的有效性。该特性通常用 M^2 因子来衡量, M^2 值越小,表明光束越接近理想高斯光束,具有更好的聚焦性和传输效率。但由于固体 MOPA 激光器中热效应的存在,激光输出过程中常伴随着光束质量的持续恶化,导致其性能降低。因此,优化光束质量便成为激光器性能提升的关键,在激光器的设计与应用中具有重要的研究与实践意义。本文将着重对固体 MOPA 激光器的光束质量优化技术进行展开讨论。

2 光束质量因子 M^2 的构成

光束质量因子 M^2 的定义最早由美国激光物理学家 Anthony E. Siegman 于 20 世纪 80 年代系统提出^[5],其核心思想是通过量化实际光束与理想高斯光束的偏离程度来评价光束质量。Siegman 的工作侧重于强度分布和发散角的综合作用,隐含了相位与强度的关联性,但未涉及相干性分析。之后,德国学者 B. J. Neubert 在其 2005 年发表的论文中^[6],首次提出了将 M^2 因子分解为

三个独立分量的理论框架,分别为相位项、强度项以及相干性项,如公式(1)所示:

$$M_x^2 = \sqrt{M_{x\text{diff}}^2 + M_{x\text{ab}}^2 + M_{x\text{cohe}}^2}, \quad (1)$$

其中,相位项表征光束波前相位的不均匀性,包括像差(如球差、彗差)、热致相位畸变或光学元件引入的波前误差。即使光强分布接近高斯分布,相位畸变仍会通过衍射效应导致光束发散角增大,从而降低光束质量。强度项反映光束横截面上的光强分布特性,例如光斑形状的椭圆化、多模结构或高阶模成分的叠加。若实际光束的横向光强分布偏离高斯分布(如平顶光或多模激光),强度项会显著增大,导致 M^2 因子恶化。相干性项描述部分相干光束(如多模激光或受湍流干扰的光束)的传播特性。在完全相干条件下相干性项可忽略,但对于部分相干或复杂传输环境比如光纤激光相干合成系统^[7],需综合三项分量进行优化。由于固体 MOPA 激光器输出的激光光束相干性很好,因此系统中的相干性因素对 M^2 因子的影响可忽略不计,本文只从相位项与强度项两方面来介绍其光束质量的优化方法。

M^2 因子的相位项增大主要是由振荡级晶体与放大级晶体的热效应引起的,热效应(如激光介质或光学元件的温度升高)会导致材料的折射率分布发生非均匀变化,从而引发波前畸变(如球差、像散等)^[8-10]。在高功率固体激光器中,增益介质的热透镜效应会导致光束波前曲率变化,增加光束的发散角,进而使 M^2 值增大。针对 M^2 因子相位项的优化方法有如下几种,热效应抑制技术、负透镜法、相位共轭法、可变形镜法、球差自补偿法。

M^2 因子的强度项受到光束横向强度分布的影响,光束横向强度越不均匀(如高阶模或多峰结构), M^2 值越高^[11]。在不改变结构复杂度的情况下,通过优化光束强度分布可以对激光器的残余像差进行进一步补偿与校正,也可以直接对输出光束进行整形来获得预想的结果,优化方法具体可分为增益导引法、光束整形法。

固体 MOPA 激光器包含激光振荡器与激光放

大器两部分,为了最终获得高光束质量激光,首先应利用负透镜法、相位共轭法、可变形镜法、光束整形法尽量提升激光振荡器的光束质量,再利用球差补偿法与增益导引法在激光放大器中进一步提升光束质量,其中热效应抑制技术是体现所有技术优化能力的基础和前提。

3 光束质量优化技术

3.1 热效应抑制技术

热效应对固体 MOPA 激光器光束质量的影响是多方面的,激光运行过程中往往伴随着热透镜、热致双折射、热畸变、模式不稳定和热损伤等现象。这些现象会显著降低光束质量,因此在实际应用中必须采取有效措施抑制热效应。为了抑制热效应,可从增益介质以及泵浦光两个方面进行优化。

(1)增益介质优化:通过改变增益介质的几何形状、材料掺杂浓度等方式减少增益介质中的热沉积,进而提高光束质量。由于传统的棒状增益介质在工作过程中会产生径向的温度梯度^[12],导致热透镜效应和热应力退偏效应产生,最终影响光束质量,降低输出功率。之后,研究人员陆续开发了薄片增益介质和“之”字型光路板条增益介质^[13-14]。这两种方案的大致思路是在激光提取时,激光传播方向的某一分量与温度梯度方向重合,这样可以使光束波前在一阶近似的条件下,削弱温度梯度对波前的影响^[15-17]。

为了进一步消除温度梯度引起的端面形变,可使用端面研磨方法将激光介质的泵浦端面磨成具有负曲率的凹面^[18-21]。然而,在功率可调的情况下,端面形变量受到泵浦功率、泵浦束腰半径等诸多参数的影响^[22-23],因此研磨方法不能广泛使用。

除了对增益介质几何形状进行优化以外,使用浓度渐变增益介质可有效减少热效应对激光器输出功率及光束质量的限制与影响^[24-25]。在端面泵浦中,浓度渐变增益介质使泵浦光在传输过程中获得了较均匀的吸收,增益介质的端面温度及轴向的温度梯度获得大幅降低,显著减小了增益介质中的热效应,改善了光束质量,提高了转换效率。

(2)泵浦光优化:从灯泵浦方式到 LD 阵列泵浦方式的转变极大地提升了泵浦光的耦合效率,减小了“热效应”的影响,使输出功率和光束质量都得到了较大的提高^[26-27]。经过不断地优化与创

新,目前泵浦光的泵浦方式大致可以分为侧面泵浦^[28]、角泵浦^[29]、端面泵浦 3 种^[30]。与端面泵浦方式相比,侧面泵浦能够保证较好的均匀性,有利于功率放大。端面泵浦有利于获得较高的转换效率,且冷却方式较为便捷。角泵浦则结合了以上两种泵浦方式的优点^[31]。此外,在优化泵浦方式的基础上还可以采用同带泵浦技术来缓解热效应^[32-33]。与传统的泵浦技术相比,同带泵浦技术可使泵浦光的光子能量与激光介质吸收能级之间的能量差相匹配,直接将能量传递给激光上能级。通过选择与信号波长接近的泵浦光源,减少能量差异,从而降低量子亏损和无用功率耗散^[34],继而减小热效应。

虽然研究人员针对热效应产生机理进行了分析和抑制,并对固体 MOPA 激光器的光束质量进行改善,但这些研究工作只能缓解少部分热效应的影响,对光束质量的改善有限。即便如此,在使用其他光束质量优化方法之前,仍需先抑制激光振荡器部分的热效应,原因在于抑制热效应可增强系统稳定性、提升整体性能,避免热效应干扰其他优化措施,减少其他优化方法的复杂性,使后续方法更有效。

3.2 负透镜法

从前一节分析可知,固体 MOPA 激光器中存在热透镜效应导致光束产生波前畸变。为了降低在大功率泵浦增益介质(其 $dn/dT > 0$)中产生的聚焦正热透镜的不利影响,最常见的方法是在腔中插入一个负透镜来补偿波前畸变。2021 年,Wei 等在空腔中插入一个负透镜进行补偿^[35],以带有热透镜的平面腔为例,根据文中给出的激光棒光束质量因子 M^2 与高斯光束半径 w_i 的关系 $M^2 = d^2/4w_i^2$ 可知,在插入负透镜后,光束在主激光介质截面处的最小腰斑半径增大,光束质量得到提高,这种改进有利于大体积基模的运行。然而,在平腔中插入单个负透镜会缩小谐振腔的稳定区域宽度,且能够补偿热焦距的单个负透镜的范围是有限的,这非常不利于功率可调谐激光器的运行。

而早在 2005 年,Tong 等针对该问题提出了一种在激光介质两侧插入两个负透镜的方法^[36],如图 1 所示。文中给出了激光棒热焦距 f 与长度 L 的近似关系 $f \cong b^2/4n_0L$ 以及负透镜焦距 f_0 与热焦距 f 的关系 $f_0 = d - 2f$,在表达式中, d 为负透镜主平面与热透镜的距离, b 为激光棒的折射率分布

函数的正态量, n_0 表示激光棒芯直径的折射率, 根据上述表达式可以推导出所需的补偿负透镜的曲率半径。当热焦距发生改变时, 通过调节负透镜的位置, 可以实现动态的补偿效果。Tong 等在文中使用两个焦距为 -548 mm 的负透镜来补偿热透镜, 当一束平行光入射时, 经过热透镜补偿系统后得到了近平行输出光束, 获得了良好的热透镜补偿效果, 但由于负透镜可调节距离有限, 因此补偿波前畸变的范围也有限。

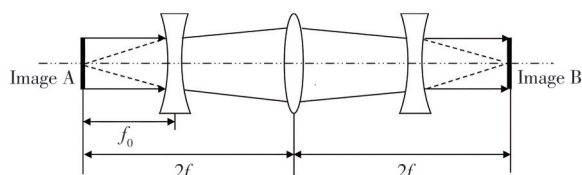


图 1 两个负透镜补偿正热透镜图^[36]

Fig.1 Diagram of two negative lenses compensating positive thermal lensing^[36]

然而, 在固体 MOPA 激光器中除了热透镜效应会降低光束质量以外, 增益介质中的增益分布也会对光束质量产生影响。2017 年, Martin 等在前人的基础上考虑了增益分布对光束质量的影响, 搭建了如图 2 所示的装置^[37]。在输出能量为 30 mJ 时系统的热透镜效应相当于一个焦距约为 11 m 的正透镜, 当在谐振腔中插入一个焦距为 -10 m 的负透镜后, 信号光束质量仅从 $M^2=4.5$ 降至 $M^2=4$, 补偿效果明显不足。这是由于增益介质中由增益分布产生的增益导引效应使信号光的模式半径变小, 导致光束发散角变大, 光束质量恶化。在考虑到增益分布的影响后, 更换为焦距为 -0.83 m 的负透镜进行补偿, 信号光束质量从 $M^2=4.5$ 降至 $M^2=1.5$, 有效地改善了光束质量。由此

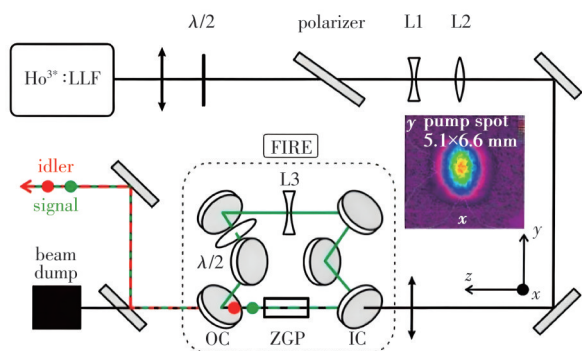


图 2 FIRE 谐振腔 ZnGeP_2 晶体激光器示意图^[37]

Fig.2 Schematic diagram of FIRE resonator ZnGeP_2 crystal laser^[37]

可见, 利用负透镜补偿波前畸变时, 应综合考虑热透镜效应和增益导引效应的影响。

由上述分析可知, 具有固定焦距的复合透镜组插入空腔以补偿热透镜的方法是一种静态补偿方法。静态补偿方法通常只能在特定泵浦功率的热透镜下获得良好的补偿效果。当泵浦功率发生变化时, 补偿效果大幅降低。因此, 该方法不适用于泵浦功率变化较大的激光器。

为了补偿动态波前畸变, 基于热透镜效应和功率依赖自适应动态补偿方法, 在腔中插入负 dn/dT 的补偿元件, 也可以实现正热透镜效应的补偿^[38-40]。该补偿措施能自动适应泵浦功率的变化, 产生一致的补偿效果。2001 年, Graf 等提出一种液体热光补偿元件^[41]。采用液体层 (如 OCF-446) 夹在两块玻璃棒之间, 液体高热色散系数 ($dn/dT = -3.4 \times 10^{-4}$) 和径向散热设计可在薄层内生成负透镜, 避免对流干扰。通过优化材料参数 (吸收系数、热导率、几何尺寸) 和激光棒参数 (热导率、泵浦效率等), 实现热透镜的动态平衡。未加入补偿元件时, 热透镜屈光度随泵浦功率变化的速率为 $17\text{ m}^{-1} \cdot \text{kW}^{-1}$, 加入补偿元件后降至 $1.4\text{ m}^{-1} \cdot \text{kW}^{-1}$, 抑制效果超过一个数量级, 补偿后输出功率从 87 W 提升至 106 W , M^2 因子从 33 降至 15 。但这种补偿元件的厚度较小, 会影响其散热能力, 导致输出光束不稳定。

综上所述, 负透镜法对于光束质量的补偿能力有限, 且不适用于具有高稳定性要求的激光器。因此, 该方法并没有被大范围应用。

3.3 可变形镜法

随着自适应光学技术的发展, 在早期负透镜优化方法的基础上, 利用可变形镜补偿热效应引起的波前畸变的方法逐渐发展起来。

1999 年, Zhu 等提出了一种基于自适应光学的概念, 利用微电机构系统变形镜 (MEMS-DM) 作为共振腔镜的方法^[42]获得自适应性和高可靠性。如图 3 所示, 可变形镜主要由一个基板、一个驱动器和一个薄镜组成。将许多压电致动器固定在基板上, 在致动器前固定有一个薄光镜。通过调整施加到可变形镜每个驱动单元上的电压, 可以将镜面准确地改变为所需的形状, 产生 $\Delta\omega(r)$ 的镜面变形^[43], 使其能够补偿由激光介质中的热透镜效应引起的相移 $\delta(r)$ 。与初始表面相比, 镜面的曲率为负, 补偿了动态热透镜效应^[44]。

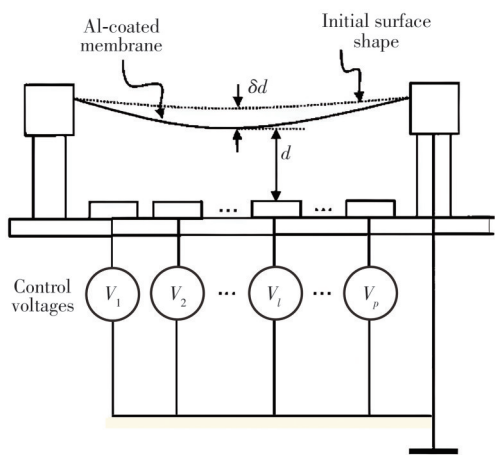


图3 微加工连续膜可变形镜示意图^[43]

Fig.3 Schematic diagram of the micromachined continuous-membrane deformable mirror^[43]

文中的 MEMS 系统利用 19 个驱动单元对镜面形状进行调整^[42],利用人眼透镜模型人为引入波前畸变(如散焦、像散)。启动自适应算法,迭代更新控制电压,通过 50 次迭代更新电压后,波前畸变从最大 5λ 降至 0.5λ ,接近理想平面波。

2012 年, Madec 等指出 MEMS 可变形镜虽然具有低功耗、响应时间短、成本低的优点,但机械行程较小^[45],一般为 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$,并且需要较为复杂的电子驱动设备。另外, MEMS 设备还会受工艺缺陷影响,导致执行器失效。

除了上述具有近似零损失和连续变化特性的可变形镜补偿方法外^[46],还发展出了可自适应补偿热透镜效应的可变形镜^[47-48]和可变形液体透镜^[49-51]。2021 年,周颀等针对典型自由曲面,设计了基于可变形镜的折反射式部分补偿器如图 4 所示^[52],仿真结果表明该方法可以将系统的剩余波前峰谷值从 32.20λ 降到 6.55λ ,剩余波前斜率最

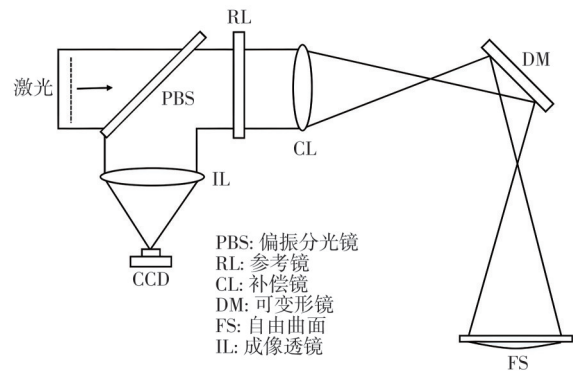


图4 折反射式补偿器结构图^[52]

Fig.4 The structural diagram of the reflector-type compensator^[52]

大值从 $0.53(\lambda\cdot\text{pixel}^{-1})$ 降到 $0.11(\lambda\cdot\text{pixel}^{-1})$,满足部分补偿检测的要求。

由上述研究结果可知,可变形镜的补偿能力受驱动器数量和变形范围的限制,只能校正低阶球差,对于某些高阶波前畸变则难以完全补偿。同时,为了获得热透镜效应产生的相移,可变形镜需要结合波前传感器和反馈控制算法来实现波前补偿,这使得系统复杂度提高,增加了设计难度,并且镜子的变形是正、负交替,驱动器以每秒数百甚至数千次的工作速度承受循环应力,因此对驱动器的要求较高,增加了应用成本。

3.4 相位共轭法

相较于可变形镜复杂的系统,相位共轭镜可自动补偿波前畸变,无需外部检测和调整。光学相位共轭技术基于时间反演对称性原理,当光束通过介质传播时,可能会因散射、吸收等因素导致波前畸变。如图 5 所示,通过生成与原始光束相位相反、传播方向相反的相位共轭波,这些畸变可以被有效地补偿,从而恢复原始光束的质量。相位共轭镜(Phase conjugate mirror, PCM)则基于相位共轭原理,主要通过一个非线性介质(如 KTP 晶体、光纤或液体介质)产生一个与输入光束相位完全相反、方向相反的反向光波^[53]。这样,这个反向光波可以“纠正”传输过程中的畸变,使输出光束恢复到理想的状态。

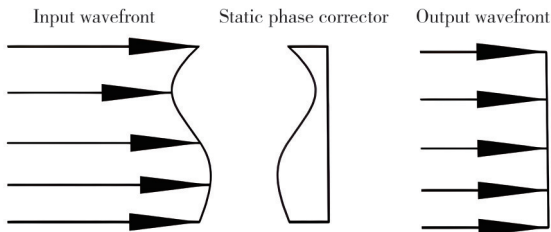
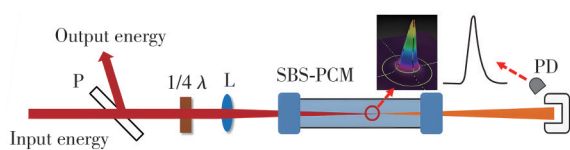


图5 静态相位校正工作原理示意图^[53]

Fig.5 Schematic diagram of working principle of static phase correction^[53]

按照产生共轭波方式的不同,目前主要有受激布里渊散射(SBS)PCM、四波混频(FWM)PCM、数字型 PCM 和光折变 PCM 等 4 种^[54]。应用在固体激光器领域的主要是 SBS-PCM 和 FWM-PCM 两种,其中前者较为普遍,技术相对比较成熟^[55]。目前,常采用液体和固体介质作为 SBS-PCM 的工作介质^[56-59]。

2020 年, Ding 等采用 FC-770(3M Fluorinert 电子液体)作为 SBS 介质,如图 6 所示^[60]。相比于之前

图 6 液体介质 SBS-PCM 示意图^[60]Fig.6 Schematic diagram of liquid medium SBS-PCM^[60]

未经过补偿的系统来说,激光经过 SBS-PCM 之后,输出功率可达 120 W, M^2 因子的值大约从 3.4 和 3.6 (分别对应 X 轴和 Y 轴方向) 降到了约 2.0 和 2.1, 表明 SBS-PCM 显著补偿了光束波前畸变。

2025 年, Chen 等利用熔融二氧化硅材料作为固态 SBS-PCM^[59], 实验测得在最大输出能量为 672 mJ 时, 光束质量因子 M^2 从 1.26 改善至 1.07, 接近衍射极限。这表明 SBS-PCM 成功地减少了由硬边缘孔径引起的衍射模式畸变, 改善了激光束的聚焦能力。

此外, 利用四波混频相位共轭镜也可获得 M^2 因子小于 1.5 的良好光束。2014 年, Zendzian 等报道了 FWM-PCM 在调 Q 板条激光器像差校正中所取得的较好成果^[61], 最终获得单脉冲能量为 18.3 mJ、脉宽为 9.5 ns、峰值功率达到 2 MW 的激光输出。并且实验结果显示, 经像差校正后其光束质量 M^2 因子小于 1.3, 有效补偿了激光光束波前畸变。

综上所述, 相位共轭镜是一种强大的波前补偿技术, 在高功率激光和光通信领域具有重要应用。它能够自动校正波前畸变, 提高光束质量, 并适用于高能激光系统。但 PCM 受到非线性介质响应速度、波长限制以及对准要求的制约, 导致其在某些场景下不如传统的自适应光学技术应用范围广。未来, 随着新材料和智能控制技术的发展, PCM 的应用范围可能会进一步扩大。

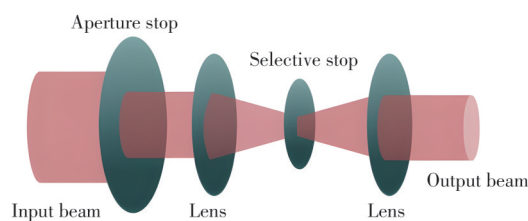
3.5 光束整形法

除了前文中描述的几种从相位上避免光束的波前产生畸变的方法之外, 还有一些方法是直接作用在光束强度分布上, 其中光阑法是最典型的激光光束整形技术。

2018 年, 王君涛等为了研究激光光束净化^[62], 将板条晶体输出的光束用楔镜分光, 反射光束经过相同的扩束整形系统, 进入光束质量测试系统。在扩束光路的焦点位置, 在板条晶体宽度方向使用一维的狭缝空间滤波器, 使板条晶体宽度方向光束质量 β 由之前的 6.0 倍衍射极限改善到 3.7 倍衍射

极限, 整体光束质量 β 由之前的 3.5 倍衍射极限改善到 2.5 倍衍射极限, 在泵浦功率为 21.6 kW 时实现了 5.4 kW 的连续激光输出。

由此可知, 传统的光阑为硬边光阑, 通过截趾光束近平顶部分可以获得超高斯光束, 但会产生严重的衍射调制, 这样不仅降低了传输效率, 非线性尺度的聚焦还可能损坏光学元件。因此, 研究人员开发出了以锯齿光阑为代表的软边光阑技术, 其边缘透射率存在渐变区, 这使得在一定的菲涅耳数下, 减小了衍射调制, 其结构如图 7 所示。2021 年, 俄罗斯 Sizova 等提出了在锯齿光阑中安装一个窄的不透明校正环, 可以大幅抑制衍射效应^[63-64], 使输出光束平坦化, 经证明, 这种方法对菲涅耳数在 2~5 的光束均可有效作用。

图 7 锯齿光阑结构图^[64]Fig.7 Structure of the serrated diaphragm^[64]

由此可知, 传统光阑结构简单, 成本低廉, 但在初期的功率输出过程中, 尤其是在注入光功率较低时, 由于自发辐射 (ASE) 的影响存在一定的光损耗, 这可能会影响系统的整体效率^[65]。在高泵浦功率时, 实际输出功率也低于理论计算值。锯齿光阑因其孔状结构不影响光路调整, 有着抗损伤阈值高、使用简单等优点, 因此被有效地应用于高功率激光放大系统, 但锯齿光阑的缺点是研究成本高、周期长, 严重地受限于加工工艺。综合来看, 光阑法只改变了光束强度分布, 对热效应引起的光束波前畸变并无补偿。因此, 光阑法改善效果相比于前文介绍的几种补偿方法有限, 该方法更倾向于与其他光束质量优化技术联合使用。

3.6 球差自补偿法

大多数时候, 面对热效应造成的热球差常采取添加额外元件或后期整形的手段, 但由于系统复杂, 干扰因素多, 也可能会引入新的恶化因素导致优化效果降低。对此, 研究人员提出了一种球差自补偿的技术方法^[66-67], 该方法不需要添加额外元件, 大幅降低了系统复杂度。研究表明, 光束在传播过程中经过束腰时球差系数会有符号突变的现象, 非对称平-平谐振腔内部球差分布呈非对

称周期性地演变。正是因为这种球差的演变才使得激光可以在腔内稳定地振荡,这种现象被称为波前的自再现,是球差自补偿理论的基础依据。

2014年,Ye等首次发现在固体 MOPA 系统中,种子光经过放大级后光束质量被改善的现象,并对此展开了研究^[68]。文中搭建了一个非对称平-平动态稳定谐振腔(DSR)作为主振荡器,并采用 MOPA 放大系统。通过哈特曼波前传感器实际测量,发现在增益介质入射面处的球差系数 C_{13} 为负值 ($-0.017 \mu\text{m}$),在增益介质出射面处的球差系数接近零为 $0.005 \mu\text{m}$,该发现说明光束经过增益介质后,球差被补偿。对该现象文中给出的解释是:输入光束可能带有负球差,经过带有正球差的增益介质后,二者可相互抵消,使得波前畸变减少,光束质量提高。接着,文中采用一级放大结构,利用放大级晶体附带的正球差补偿种子光附带的负球差。结果表明,当种子源输出功率为 31 W,初始 M^2 因子为 2.2,激光经放大后输出功率提升至 60 W,光束质量 M^2 从初始的 2.2 显著改善到 1.4,经测量,激光经过放大级后,波前球差几乎为 0,证实了球差自补偿法这一理论的可行性。2024年,该作者再度创新^[69],采用两级放大结构,第一级放大器用于引入正球差,再利用 $4f$ 成像系统使球差反号并输入到第二级放大器中,相较于第一级放大的结果,经过第二级放大后 M^2 因子从 1.85 减小到 1.34,最终在 100 kHz 重复频率、十纳秒脉宽条件下,获得功率为 20.4 W 的激光输出。

2015年,潘孙强等对该补偿机理进行了深入

研究^[66],阐述了激光波前携带负球差的原因是光束在传播过程中经过束腰时球差系数会有符号突变的现象,其原理如图 8 所示。从图中可看出,采用非对称腔时,光束在传播过程中球差存在负值的现象,并根据两侧球差系数不同的现象说明长臂端输出光束质量要优于短臂端。

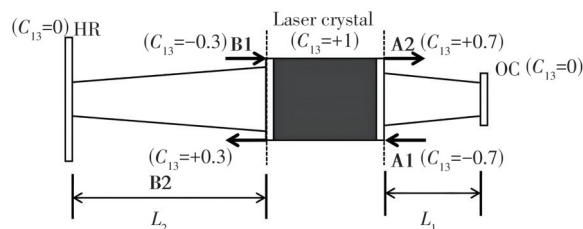


图 8 球差自补偿原理示意图^[66]

Fig.8 Schematic diagram of self compensation principle for spherical aberration^[66]

同年,王毅等利用一级 MOPA 结构对该机理进行验证^[70]。在上述基础上,采用 MOPA 激光器一级放大结构如图 9 所示,利用短臂输出使种子光携带负球差,再使其通过带有正球差的放大级晶体进行球差补偿。经测量长臂 L_2 端输出的光束质量为 $M^2=1.4$,短臂 L_1 端输出的光束质量为 $M^2=4.2$ 。当放大级与振荡级结构参数与泵浦功率一致时,种子光经过放大级后光束质量从 $M^2=4.2$ 减小到 $M^2=1.6$ 。其通过调节振荡级与放大级之间的距离,使得输出镜到振荡级晶体中心的距离等于输出镜到放大级晶体的距离,从而将振荡级晶体的负球差成像到放大级晶体端,利用放大级光束的正球差补偿了振荡级光束带有的负球差,至此,球差自补偿理论得以证实。

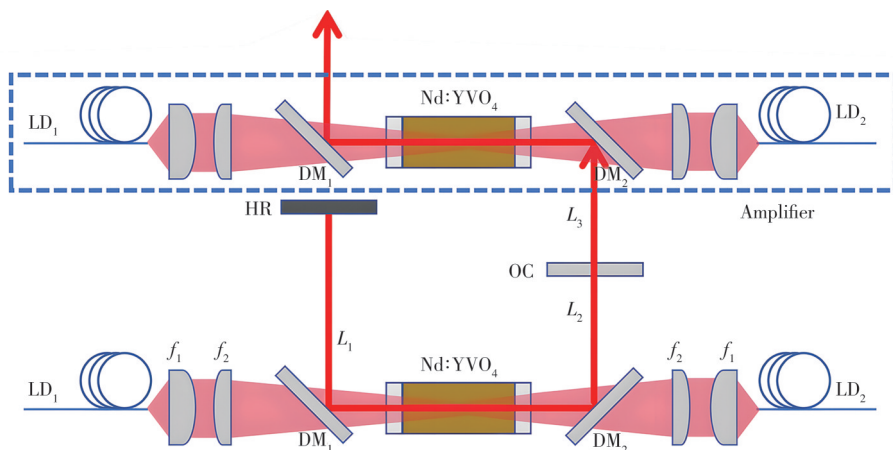


图 9 球差自补偿原理示意图^[70]

Fig.9 Schematic diagram of self compensation principle for spherical aberration^[70]

2018年,姚强强等提出在不改变级间距离的情况下,通过控制泵浦功率来控制增益介质中的

增益分布,进而优化输出激光光束质量^[71]。文中同样采用非对称动态稳定谐振腔,通过实验系统

性地测量了晶体内部不同位置(谐振腔内不同截面位置)的球差分布,发现球差随着传播距离的增加存在正负交替现象。同时实验表明,存在一个最佳的放大器泵浦功率,可以使球差得到最有效的补偿,在初始输出功率 9.2 W、 $M^2=2.1$ 的条件下,激光经过放大级后球差被补偿,此时输出功率为 10.54 W、 $M^2=1.5$ 。但如果将泵浦功率提高,光束质量便退化至 $M^2=2.86$ 。首次验证了除了调节级间距离以外,还通过精确控制放大器泵浦功率进行球差补偿。根据该方法,2021 年,董雪岩等利用球差自补偿法抑制了板条晶体厚度方向上的热畸变^[72],克服了热透镜效应造成的光束质量退化,最终获得输出功率为 28.4 W、光束质量因子为 $M_x^2=1.33$ 、 $M_y^2=1.24$ 的光束。再次表明了该方法的广泛适用性。紧接着,在 2023 年,Qiao 等根据该方法进行创新^[73],基于双程放大的自补偿球差机制,其核心在于将激光束在放大介质中通过一次会聚与一次发散的双向传播过程,使由热透镜效应引起的球差在正反两程中相互抵消,最终输出激光峰值功率可达 6 MW,且 M^2 因子由 1.21 降低到 1.14,从而有效抑制了波前畸变。

由上述结果可知,该方法不需要额外的光学元件或复杂光学设计就能显著改善激光器输出的光束质量。与传统的光束质量补偿技术(如相位共轭镜和变形镜技术)相比,具有较低的成本和较小的设备复杂性。它通过动态调整放大器的泵浦电流来补偿光束质量,具有实时性和高效性,特别适用于高功率激光系统。缺点是球差自补偿技术一般只适用于激光放大器中,并且该补偿机制放大级对振荡级的成像,需要精确地调整光束传输路径。另外,该方法仅适用于球差的有效补偿,对

其他高阶热畸变效果有限。当泵浦参数偏离最优条件时,球差反而可能恶化,导致光束质量进一步降低。同时,如果环境温度变化较大或泵浦不稳定,补偿效果可能受到影响,因此对于激光器的设计要求较高。

3.7 增益导引法

另一种不需要额外元件的方法是通过控制泵浦光和信号激光或掺杂粒子浓度分布而改变晶体内的增益分布区域。由于光束横向方向上的高阶模式与低阶模式的模体积不同,使得激光放大系统中高阶模与基模的增益和损耗存在较大差异。通过控制二者的增益与损耗,达到有选择地放大低阶模式、抑制高阶模式目的,最后输出高光束质量的放大激光,这就是增益导引效应^[74-78]。1988 年,Fill 首次探究了 X 射线激光实验中增益分布对输出光束的影响,利用横向光束传播方向的增益分布消除了等离子体折射率引起的散焦效应^[79]。之后,研究人员陆续发现增益介质的非均匀性(如光泵浦分布的不均匀性)会导致光束的传播特性发生变化,特别是在小型激光器和半导体激光器中,增益分布对光束的聚焦、稳定性和模式选择有重要影响。增益导引效应这一概念就此逐渐形成。

而对于固体激光器来说,早在 1999 年,Xu 等便利用非正交理论探究了增益导引效应在瞬态拉曼放大器中的影响^[80],发现某些噪声的产生正是由于非均匀增益的放大所造成的。2002 年,Denchev 继续深入探讨了增益导引效应的应用领域^[81-82],并在基于四能级系统的实验中证明了增益饱和效应可有效地抑制光斑强度边缘部分,使中心部分得到增强。2010 年,清华大学 Yan 等搭建了如图 10 所示的二级 MOPA 激光放大器^[83]。

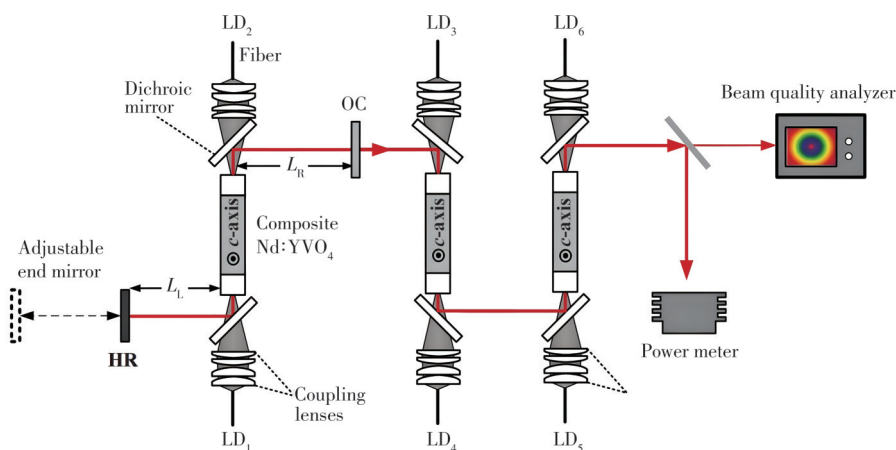


图 10 双端泵浦 MOPA 激光器的实验结构^[83]

Fig.10 (Color online) Experimental layout of the dual-end-pumped MOPA laser^[83]

通过改变泵浦光耦合系统的参数以及聚焦在晶体中的位置来实现增益分布的调节。其中输出镜 OC 保持不动,另一侧的高反射率镜可调以实现不同泵浦功率下热球差变化的补偿。该种子源可输出 27 W 的功率,光束质量为 $M^2=1.3$ 。在没有控制晶体中增益分布时,经过一级放大后输出功率为 56 W、 $M^2=2.28$,二级放大后输出功率为 95 W、 $M^2=4.05$ 。优化两个放大级增益后,经过一级放大后输出功率 60 W、 $M^2=1.5$ 的激光,在二级放大后输出功率 101 W、 $M^2=1.2$ 的激光。可以看出优化增益后放大过程中光束质量并未大幅度下降。

2012 年,汪丹等^[84]指出了相关参数对增益导引效应的影响,如泵浦光功率、信号光功率、泵浦光半径、信号光半径、信号光光束质量等,并指出信号光半径与泵浦光半径之间的比例是影响增益导引效应的最主要因素。对于提高固体 MOPA 激光器的光束质量以及输出光功率而言,具有很强的指导意义。另外,还指出热效应大小和增益导引效应强弱是输出激光光束质量好坏的深层原因。

2013 年,柳强等在此基础上搭建了 4 级放大结构^[85-86],种子源输出功率为 36.5 W,初始光束质量 $M^2=3.0$ 。通过调节放大器之间的距离补偿球差,在经过 4 级放大后,输出功率提升至 195 W,光束质量显著提升至 $M^2=1.2$ 。另外,文中明确表明,激光在经过每一级放大后,光束质量均会有所改善。该现象明显与传统理论(光束质量随放大恶化)相矛盾,证实了增益导引效应的重要性。从上述结果来看,随着中心区域增益的增大,径向增益梯度减小,从而使光束质量好转,通过仔细控制 MOPA 激光器中的增益分布,MOPA 系统可以实现功率尺度和光束质量的增强。

综上,增益导引方法也是一种简洁的不需要任何额外元件的技术。然而,使用该方法的同时也会受到热效应引起的热透镜球差自补偿现象的影响。因为改变晶体增益分布的同时,往往伴随着热透镜效应的改变^[84]。虽然增益导引效应能显著改善光束质量,但它不能完全抵消热效应的负面影响。并且增益导引效应依赖于晶体内非线性的增益分布,这种分布会随功率和输入模式而变化。尤其在高功率运行下,增益饱和效应明显,增益导引效果可能被削弱甚至消失。同时,增益导引效应的改善效果依赖于激光放大器中多个参数的精确优化(如泵浦功率、信号光功率、填充因子

等),这些参数的调整需要精确控制,可能增加实验和系统的复杂度。

4 结论与展望

综上所述,在固体 MOPA 激光器中导致光束波前畸变的最主要因素是热透镜效应,热透镜效应会使光束附带球差因子导致光束质量变差。针对球差补偿方法的研究历经了多个阶段,从最初的经验调整到现代的高精度计算补偿,逐步提升了固体激光器的光束质量和稳定性。但在使用其他光束质量优化方法之前,仍需先抑制热效应,原因在于抑制热效应可增强系统稳定性、提升整体性能,避免热效应干扰其他优化措施,减少其他优化方法的复杂性,使后续方法更有效。

在最早期的固体 MOPA 激光器中,采用负透镜或者消球差透镜可以补偿特定球差。这种方法由于加工精度的限制,以及球差随功率变化的不可预测性,其补偿效果仍然有限。随着自适应光学技术以及精密波前测量仪器的发展,研究人员开发了可变形镜等方法实现动态波前补偿。但 these 方法对于高阶像差(非线性畸变)的补偿能力依旧有限。并且由于系统复杂,使得系统设计和集成难度加大,成本提高。

相比于传统的自适应光学技术,相位共轭镜系统结构简单,能够自动校正波前畸变,提高光束质量,并适用于高功率激光系统,但在某些场景下不如传统的自适应光学技术灵活。未来,随着新材料和智能控制技术的发展,PCM 的应用范围可能会进一步扩大。自适应光学技术或许可以结合机器学习优化补偿算法,并结合相干合成技术提升超高功率固体激光器的光束质量。

对于上述这些较为复杂的系统来说,球差自补偿法和增益导引法无需额外的空间滤波器、透镜、孔径或补偿器件,这种简洁性在实际应用中具有明显的优势。相对于负透镜法、可变形镜法等手段,球差自补偿法与增益导引法是一种极具潜力的光束质量优化技术,其优势在于能够以较低的复杂度、成本,有效地控制并改善高功率激光放大过程中的光束质量,适合于设计紧凑、高功率、高质量的 MOPA 激光系统。然而,在应用中需谨慎处理增益分布、热效应与模式匹配条件之间复杂的物理相互作用关系。如何实现增益导引效应与热效应的精确平衡,是未来研究的重要方向。在不久的将来,以增益导引法为主,再

利用球差自补偿法进行精细补偿,一定可以在更广泛的条件范围内获得高功率、高光束质量的激光输出。随着热管理、实时自适应光学、相干合束与机器学习控制等技术的不断发展与成熟,未来的多级 MOPA 激光器在严格光束传递设计下,完全可以把功率从瓦级放大到 kW 级,同时最大限度地保持原光束质量。在精密制造、激

光核聚变及高场物理等“高亮度高能量”应用牵引下,固体 MOPA 激光器正迈向“kW 级、准衍射极限”的新时代。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250087>

参 考 文 献:

- [1] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers [J]. *Phys. Rev.*, 1958, 112(6): 1940-1949.
- [2] BARNES J C, BARNES N P, MILLER G E. MOPA performance of Ti: Al₂O₃ [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 1987, Washington*, 1987: TuA5.
- [3] SENTMAN L, CARROLL D, GILMORE J, *et al.* CW HF chemical laser MOPA performance [C]. *Proceedings of the 19th AIAA, Fluid Dynamics, Plasma Dynamics, and Lasers Conference, Honolulu, HI, U. S. A.*, 1987: 1449.
- [4] SANDOVAL R P, MORENO J B. Experimental and theoretical study of the xenon laser and associated high-gain phenomena [J]. *J. Appl. Phys.*, 1978, 49 (10): 5107-5113.
- [5] SIEGMAN A E. *Lasers* [M]. Mill Valley: University Science Books, 1986.
- [6] NEUBERT B J, EPPICH B. Influences on the beam propagation ratio M^2 [J]. *Opt. Commun.*, 2005, 250 (4-6): 241-251.
- [7] 吕百达. 固体激光器件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2022.
 LV B D. *Solid-State Laser Devices* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)
- [8] ROSS D, YAMAGUCHI H. Polishing characteristics of Nd: YAG ceramics with various Nd-dopant concentrations [J]. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2019, 27: 93-101.
- [9] CHÉNAIS S, DRUON F, FORGET S, *et al.* On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium-doped materials [J]. *Prog. Quantum. Electron.*, 2006, 30(4): 89-153.
- [10] LI X D, ZHOU Y P, XU H B, *et al.* High-stability, high-pulse-energy MOPA laser system based on composite Nd: YAG crystal with multiple doping concentrations [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 152: 108080.
- [11] YAO A Y, HOU W, KONG Y P, *et al.* Double-end-pumped 11-W Nd: YVO₄ CW laser at 1 342 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, 22(10): 2129-2133.
- [12] 吴健宏, 杜仕峰, 高昀, 等. 紧凑高效型百瓦级 2 μm 棒状 Tm: YAG 激光器 [J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 2027-2032.
 WU J H, DU S F, GAO Y, *et al.* Compact and efficient hundred-watt level 2 μm rod Tm: YAG laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 2027-2032. (in Chinese)
- [13] 蔡震, 王小军, 蒋建锋, 等. 薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2437-2440.
 CAI Z, WANG X J, JIANG J F, *et al.* Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2010, 37(10): 2437-2440. (in Chinese)
- [14] 宋艳洁, 朱铎, 薄勇, 等. 高功率陶瓷板条激光器 [J]. *应用光学*, 2023, 44(6): 1195-1200.
 SONG Y J, ZHU Z, BO Y, *et al.* High power ceramic slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2023, 44(6): 1195-1200. (in Chinese)
- [15] HUANG Y, MENG J Q, ZHANG L L, *et al.* The analysis of the thermal effects of double-slab Nd: YAG laser medium [C]. *Proceedings of SPIE 5627, High-Power Lasers and Applications III, Beijing*, 2005, 5627: 397-405.
- [16] GANIJA M, OTTAWAY D, VEITCH P, *et al.* Cryogenic, high power, near diffraction limited, Yb: YAG slab laser [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(6): 6973-6978.
- [17] MARTIN W S, CHERNOCH J P. Multiple internal reflection face-pumped laser: US, 3633126 [P]. 1972-01-04.
- [18] QUAN C, SUN D L, ZHANG H L, *et al.* Performance of a 968 nm laser-diode side-pumped, electro-optical Q-switched Er, Pr: YAP laser with emission at 2.7 μm [J]. *Opt. Eng.*, 2021, 60(6): 066112.

- [19] 赵存华, 王金艳. 弥补激光棒热透镜的最佳端面研磨半径理论计算 [J]. 光子学报, 2007, 36(S1): 84-86.
ZHAO C H, WANG J Y. Theoretical optimum extremity radius ground of laser rod to compensate thermal effects [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2007, 36(S1): 84-86. (in Chinese)
- [20] WANG J T, CHENG T Q, WANG L, *et al.* Compensation of strong thermal lensing in an LD side-pumped high-power Er: YSGG laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2015, 12(10): 105004.
- [21] HU L Z, SUN D L, WANG Y L, *et al.* Laser performance of high repetition frequency on a 970 nm LD side-pumped Er: YSGG crystal operated at 2.79 μm [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2020, 105: 103224.
- [22] HAJIESMAEILBAIGI F, RAZZAGHI H, ESFAHANI M M, *et al.* Experimental study of a high-power CW diode-side-pumped Nd: YAG rod laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, 2(9): 437-439.
- [23] YANG Q, ZHU X L, MA J, *et al.* Diode-pumped Nd: YLF slab master oscillator power amplifier laser system with 655 mJ output at 50 Hz repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2015, 13(6): 061401.
- [24] 刘全喜, 任钢, 李轶国, 等. 激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂介质激光器热效应的有限元法分析 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 1105004.
LIU Q X, REN G, LI Y G, *et al.* Finite element method analysis of thermal effect in gradient dopant concentration medium laser end-pumped by laser diode [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2019, 48(11): 1105004. (in Chinese)
- [25] 宋越, 王志敏, 杨熙航, 等. 高光束质量窄纳秒脉宽 Nd: YVO₄ 板条脉冲串激光器 [J]. 中国激光, 2023, 50(7): 0701004.
SONG Y, WANG Z M, YANG X H, *et al.* Nd: YVO₄ slab burst-mode laser with high beam quality and short nanosecond pulse width [J]. *Chin. J. Lasers*, 2023, 50(7): 0701004. (in Chinese)
- [26] 张小民, 胡东霞, 许党朋, 等. 浅论强激光系统的物理受限问题 [J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201002.
ZHANG X M, HU D X, XU D P, *et al.* Physical limitations of high-power, high-energy lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(12): 1201002. (in Chinese)
- [27] BRAUCH U, RÖCKER C, GRAF T, *et al.* High-power, high-brightness solid-state laser architectures and their characteristics [J]. *Appl. Phys. B*, 2022, 128(3): 58.
- [28] 靳全伟, 庞毓, 蒋建锋, 等. VRM 腔高光束质量高功率双波长激光器 [J]. 红外与激光工程, 2021, 48(11): 1105003.
JIN Q W, PANG Y, JIANG J F, *et al.* High beam quality and high power dual-wavelength laser with VRM [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2018, 47(11): 1105003. (in Chinese)
- [29] LU F Y, GONG M L, XUE H Z, *et al.* Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2007, 45(1): 43-48.
- [30] PALESE S, HARKENRIDER J, LONG W, *et al.* High brightness, end-pumped, conduction cooled Nd: YAG zig-zag slab laser architecture [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 2001, Seattle*, 2001: TuC4.
- [31] LIU H, LIU Q, GONG M L. Efficient corner-pumped Nd: YAG/YAG composite slab 1.1 μm laser [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(19): 19603-19611.
- [32] 何涛, 陈小明, 鲁燕华, 等. 泵浦匀化对 Innoslab 激光放大器光束质量的改善 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(1): 011019.
HE T, CHEN X M, LU Y H, *et al.* Improvement of beam quality by pump homogenization of Innoslab laser amplifier [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2020, 32(1): 011019. (in Chinese)
- [33] ROSS M. YAG laser operation by semiconductor laser pumping [J]. *Proc. IEEE*, 1968, 56(2): 196-197.
- [34] LAVI R, JACKEL S, TZUK Y, *et al.* Efficient pumping scheme for neodymium-doped materials by direct excitation of the upper lasing level [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(36): 7382-7385.
- [35] WEI M E, CHENG T Q, DOU R Q, *et al.* Superior performance of a 2 kHz pulse Nd: YAG laser based on a gradient-doped crystal [J]. *Photon. Res.*, 2021, 9(7): 1191-1196.
- [36] 童立新, 高清松, 蒋建锋, 等. 高功率二极管泵浦模块热效应补偿研究 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S1): 125-128.
TONG L X, GAO Q S, JIANG J F, *et al.* Research of thermal effects compensation of high power diode laser module [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2005, 17(S1): 125-128. (in Chinese)
- [37] SCHELLHORN M, SPINDLER G, EICHHORN M. Improvement of the beam quality of a high-pulse-energy mid-infrared

- fractional-image-rotation-enhancement ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(6): 1185-1188.
- [38] BASYROVA L, LOIKO P, DOUALAN J L, *et al.* Thermal lensing, heat loading and power scaling of mid-infrared Er:CaF₂ lasers [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(5): 8092-8103.
- [39] YOSHIDA H, TAKEUCHI N, OKADA H, *et al.* Thermal-lens-effect compensation of Nd:YAG rod laser using a solid element of negative temperature coefficient of refractive index [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, 46(3R): 1012.
- [40] LIMA N C, MISHRA K, MUGELE F. Aberration control in adaptive optics: a numerical study of arbitrarily deformable liquid lenses [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(6): 6700-6711.
- [41] GRAF T, WYSS E, WEBER H P. Self-adaptive compensation for the thermal lens in high-power lasers [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 2001, Seattle, Washington*, 2001: PD6.
- [42] ZHU L J, SUN P C, BARTSCH D U, *et al.* Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(1): 168-176.
- [43] HABER A, BIFANO T. General approach to precise deformable mirror control [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(21): 33741-33759.
- [44] SAMARKIN V, ALEXANDROV A, TOPOROVSKY V, *et al.* Water-cooled deformable mirrors for high power beam correction [C]. *Proceedings of SPIE 11849, Fourth International Symposium on High Power Laser Science and Engineering (HPLSE 2021)*, Suzhou, 2021: 1184917.
- [45] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy [C]. *Proceedings of SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III*, Amsterdam, 2012: 844705.
- [46] KAMEL A, KOCER S, MUKHANGALIYEVA L, *et al.* Resonant adaptive MEMS mirror [J]. *Actuators*, 2022, 11(8): 224.
- [47] 王钢, 唐晓军, 王文涛, 等. 自由曲面镜补偿大功率激光波前畸变技术研究 [J]. *激光与红外*, 2024, 54(9): 1352-1357.
- WANG G, TANG X J, WANG W T, *et al.* Research on compensation technology for high power laser wavefront aberration with freeform surface mirror [J]. *Laser Infrared*, 2024, 54(9): 1352-1357. (in Chinese)
- [48] 邹浩. 基于变形镜的碟片激光器热焦距测量和基模谐振腔的动态补偿 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- ZOU H. *Measurement of Thermal Focal Length and Dynamic Compensation of Fundamental Moderesonator of Thin-Disk Laser based on Deformable Mirror* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [49] KUDRYASHOV A V, TOPOROVSKY V V, SAMARKIN V V, *et al.* Deformable mirrors for high-power lasers [C]. *Proceedings of 2020 International Conference Laser Optics (ICLO)*, St. Petersburg, 2020: 1-1.
- [50] 罗远智, 彭润玲, 喻治俊. 可变焦补偿的液体透镜结构设计与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 459-465.
- LOU Y Z, PENG R L, YU Z J. Structure design and analysis of liquid lens with self-zoom-compensation [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2018, 55(12): 459-465. (in Chinese)
- [51] GUO X, YIN H B, LI M Y, *et al.* Deformable mirror driven by piezoelectric thin film based on multi-electrode array [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2024, 379: 115876.
- [52] 周颢, 郝群, 胡摇, 等. 用于自由曲面部分补偿干涉测量的可变形镜面形设计的优化方法 [J]. *光学技术*, 2021, 47(3): 257-264.
- ZHOU T, HAO Q, HU Y, *et al.* An optimization method of deformable mirror shape design for freeform surface partial compensation interferometry [J]. *Opt. Tech.*, 2021, 47(3): 257-264. (in Chinese)
- [53] 王磊, 聂劲松, 叶庆, 等. 0.53 μm 全固态激光器热效应及其补偿技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0406003.
- WANG L, NIE J S, YE Q, *et al.* Study on thermal effect and compensation technology of 0.53 μm all-solid-state laser [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2017, 46(4): 0406003. (in Chinese)
- [54] ADEWALE AKINYIMIKA, 王雨雷, 白振旭, 等. 基于受激布里渊散射的高能高功率相位共轭激光 [J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(11): 111007.
- ADEWALE A, WANG Y L, BAI Z X, *et al.* Phase conjugation lasers based on stimulated Brillouin scattering with high-power and high-energy [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2021, 33(11): 111007. (in English)
- [55] CHEN B, BAI Z X, CHEN Y F, *et al.* Enhanced beam quality of high-energy lasers utilizing fused silica as an all-solid-state

- SBS-PCM [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2025, 181: 111850.
- [56] 赵智刚, 崔玲玲, 童立新, 等. 带固体相位共轭镜的全固态脉冲抽运高重复频率大能量单纵模 MOPA 激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2949-2935.
- ZHAO Z G, CUI L L, TONG L X, *et al.* All-solid-state high pulse repetition rate high pulse energy single-longitudinal-mode MOPA laser system with solid-state phase conjugating mirror [J]. *Chin. J. Lasers*, 2010, 37(12): 2949-2935. (in Chinese)
- [57] 许平. 基于 SBS 的辐射板条固体激光输出研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- XU P. *Research on Output of Radial Slabs Solid-state Laser Based on SBS* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [58] 葛传文, 肖爽. 高平均功率光纤受激布里渊散射相位共轭镜的研究与探讨 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 070002.
- GE C W, XIAO S. Investigation and discussion on high average-power fiber stimulated Brillouin scattering phase-conjugation mirror [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2015, 52(6): 070002. (in Chinese)
- [59] CHEN Y F, BAI Z X, TAN B W, *et al.* Stability enhancement with nonlinear gain modulation in high-power SBS-PCM [J]. *APL Photonics*, 2024, 9(10): 106117.
- [60] DING J Y, YU G L, FANG C Q, *et al.* High beam quality of nanosecond Nd:YAG slab laser system with SBS-PCM [J]. *Opt. Commun.*, 2020, 475: 126273.
- [61] ZENDZIAN W, KASKOW M, JABCZYNSKI J K. Diode-pumped, actively Q-switched Nd:YAG laser with self-adaptive, reciprocal, closed-loop resonator [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(25): 30657-30662.
- [62] 王君涛, 童立新, 徐浏, 等. 5 kW Nd:YAG 端面抽运板条激光器及其光束质量提升 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 101003.
- WANG J T, TONG L X, XU L, *et al.* 5 kW end-pumped Nd:YAG slab lasers and beam quality improvement [J]. *Chin. J. Lasers*, 2018, 45(1): 101003. (in Chinese)
- [63] SIZOVA I, MOSKALEV T, MIKHEEV L. Laser beam shaping with circular serrated apertures. I. Spatial filtering [J]. *Appl. Opt.*, 2019, 58(18): 4905-4909.
- [64] SIZOVA I, MOSKALEV T, STAVROVSKII D. Correction of shape distortions in laser beams apodized with circular serrated apertures [J]. *Appl. Opt.*, 2021, 60(16): 4861-4870.
- [65] 楚晓亮, 张彬. 部分相干光束通过硬边光阑的推广光束传输 M^2 因子 [J]. 光学学报, 2002, 22(9): 1051-1054.
- CHU X L, ZHANG B. Generalized M^2 -factor of partially coherent beams propagating through hard-edged apertures [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2002, 22(9): 1051-1054. (in Chinese)
- [66] 潘孙强, 赵智刚, 刘崇, 等. 激光振荡器内光束质量演变的机理研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111406.
- PAN S Q, ZHAO Z G, LIU C, *et al.* Mechanism investigation of beam quality evolution within laser oscillator [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2015, 52(11): 111406. (in Chinese)
- [67] 陆云峰, 王毅, 刘斌, 等. 1.5 MW 峰值功率光纤-固体混合放大 MOPA 激光系统 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202009.
- LU Y F, WANG Y, LIU B, *et al.* 1.5 MW peak power, fiber-solid hybrid amplification MOPA lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2015, 42(2): 0202009. (in Chinese)
- [68] YE Z B, WANG Y, ZHAO Z G, *et al.* Method to improve beam quality by compensating spherical aberrations in master oscillator power amplifier laser systems [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(33): 7963-7967.
- [69] YE Z B, LI X R, JIANG S, *et al.* 20 W, 15 ns high-repetition-rate and high-beam-quality MOPA laser by spherical aberration self-compensation at 1 342 nm [J]. *Appl. Phys. B*, 2024, 130(7): 132.
- [70] 王毅. 激光放大器对光束质量的动态补偿 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- WANG Y. *Beam Quality Dynamical Improvement in Diode-End-Pumped Laser Amplifiers* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [71] YAO Q Q, DONG Y, WANG Q H, *et al.* Beam quality improvement by controlling thermal lens spherical aberration in an end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Appl. Opt.*, 2018, 57(9): 2245-2249.
- [72] 董雪岩, 李平雪, 李舜, 等. 高光束质量高重复频率光纤-固体混合皮秒 Innoslab 放大器 [J]. 中国激光, 2021,

- 48(17): 1701004.
- DONG X Y, LI P X, LI S, *et al.* High beam quality fiber-solid hybrid Innoslab picosecond amplifier with high repetition rate [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(17): 1701004. (in Chinese)
- [73] QIAO H Z, ZHONG K, LI F J, *et al.* Near-diffraction-limit 1-kHz sub-nanosecond diode-end-pumped Nd:YAG laser amplifier *via* self-compensating spherical aberration [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2023, 164: 109486.
- [74] DENCHEV O, KURTEV S, PETROV P. Modes of unstable resonators with a saturable gain guide [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(6): 921-929.
- [75] WANG W L, LIN W, CHENG H H, *et al.* Gain-guided soliton: scaling repetition rate of passively modelocked Yb-doped fiber lasers to 12.5 GHz [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(8): 10438-10448.
- [76] PIOTROWSKI M, MEDINA M A, SCHELLHORN M, *et al.* Effects of pump pulse energy and repetition rate on beam quality in a high-power mid-infrared ZnGeP₂ OPO [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(2): 2577-2586.
- [77] SHEN X, ZHANG L L, DING J Y, *et al.* Analysis on light power and three-dimensional temperature distribution characteristics of gain guided and index alternate-guided fiber lasers [J]. *J. Opt.*, 2020, 22(7): 075703.
- [78] SERGACHEV I, MAULINI R, BISMUTO A, *et al.* Gain-guided broad area quantum cascade lasers emitting 23.5 W peak power at room temperature [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(17): 19063-19071.
- [79] SAVITSKI V G, DEMETRIOU G, REILLY S, *et al.* Energy scaling, second Stokes oscillation, and Raman gain-guiding in monolithic diamond Raman lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2018, 54(6): 1-8.
- [80] FILL E E. Gain guiding of X-ray laser beams [J]. *Opt. Commun.*, 1988, 67(6): 441-445.
- [81] XU J Q, LOU Q H. Gain-guiding effects in transient Raman amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, 16(6): 961-965.
- [82] DENCHEV O, KURTEV S, PETROV P. Experimental investigation of saturable gain-guided modes [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(9): 1677-1684.
- [83] YAN X P, LIU Q, FU X, *et al.* Gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO₄ MOPA lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, 27(6): 1286-1290.
- [84] 汪丹. 端面泵浦激光放大器中的增益导引效应 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- WANG D. *Gain Guiding Effect in An End Pumped Laser Amplifier* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [85] YAN X P, LIU Q, FU X, *et al.* Comparative investigation on performance of acousto-optically Q-switched dual-rod Nd:YAG-Nd:YVO₄ laser and dual-rod Nd:YVO₄-Nd:YVO₄ laser [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(22): 4131-4138.
- [86] YAN X, LIU Q, JIANG X, *et al.* The combined guiding effect in MOPA lasers [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10(4): 045003.



张益嘉(1999-),男,吉林长春人,硕士研究生,2021年于长春理工大学获得学士学位,主要从事全固态 MOPA 激光器方面的研究。
E-mail: 1289921116@qq.com



王蓓(1978-),女,山东青岛人,博士,教授,2007年于长春理工大学获得博士学位,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。
E-mail: jijie_w@163.com



白素平(1970-),女,山西应县人,硕士,教授,2005年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学精密仪器总体技术方面的研究。
E-mail: baisp@163.com