文章编号 2095-1531(2019)04-0767-16

板条激光器光束质量控制技术研究进展

闫钰锋,于 洋,白素平,倪小龙,张 晖,于 信*
(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:随着激光二极管技术的发展,以及一些先进热管理方案和新型加工工艺的涌现,固体激光器的输出功率已达到百千瓦量级,而光束质量的控制问题却日益凸显。本文归纳了板条激光器的光束质量控制技术,对当前已经实现了的几种技术路线进行了深入细致的分析,包括静态相位校正技术、非线性光学校正技术、自适应光学校正技术、几何光学校正技术等,并分别介绍了其工作原理、研究进展以及优缺点。

关 键 词:板条激光器;热效应;波前畸变;像差校正;光束质量
中图分类号:TN248.1 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191204.0767

Progress on beam quality control technology of slab lasers

YAN Yu-feng, YU Yang, BAI Su-ping, NI Xiao-long, ZHANG Hui, YU Xin*
(*Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author, E-mail*:41213100@*qq.com*

Abstract: With the rapid development of laser diodes and the emergence of advanced thermal management technology and new processing techniques, the average power of solid-state lasers has already achieved levels of 100 kW in recent years, while problems with beam quality control become increasingly prominent. This paper summarizes the beam quality control technology of slab lasers. Several technical approaches are analyzed in detail, including the static phase corrector, nonlinear optics correction technology, adaptive optics correction technology, geometrical optics correction technology, *etc*. Their principle, current research progress, advantages and disadvantages are introduced respectively.

Key words: slab lasers; thermal effects; wavefront aberrations; aberration correction; beam quality

收稿日期:2019-03-05;**修订日期**:2019-04-11
基金项目:吉林省科技厅重点科技研发项目(No. 20180201016GX)
Supported by Key Science and Technology R&D Project of Jilin Provincial Science and Technology Department (No. 20180201016GX)

1 引 言

“热效应”严重限制了传统固体棒状激光器的输出功率和光束质量的提升[1-2]。为了更好地解决这一问题,获得高功率、高光束质量的激光输出,William S. Martin 和 Joseph P. Chernoch 于1969年首次提出板条激光器的概念[3]。板条状的增益介质具有更大的冷却端面,且温度梯度分布可以简化为一维对称式分布。因此,配合“之”字形的传播路径,能够对“热效应”起到一定的补偿作用,使光束质量有所提升[4-7]。这也使板条状的增益介质成为获得高功率、高光束质量激光输出的有效技术途径之一[8-9]。虽然,板条激光器具有抑制“热效应”的优点,但是早期的研究表明,这种板条状的增益介质对加工精度的要求过为严格,并且受到加工工艺、泵浦均匀性和冷却方案等诸多因素的限制,板条状激光器并未得到广泛应用[10]。近年来随着二极管泵浦技术及加工工艺等工程技术的迅猛发展,板条激光器的优越性逐渐展现出来,并且获得了几百瓦近衍射极限(DL)的激光输出[11-12]。然而,当激光器的功率提升到千瓦量级时,其输出光束质量也将达到几倍甚至几十倍衍射极限,严重限制了其应用。并且随着功率持续提升,其输出光束受“热效应”的影响越发严重,使其光束质量随着功率的提升迅速恶化,难以满足研究人员对高功率、高光束质量激光输出的需求[13-14]。因此,研究人员不得不追寻新的技术路线,在保障高输出功率的同时,满足高光束质量的需求。至此,光束质量的控制技术应运而生,并且已经逐渐发展成为板条激光器的关键技术之一。

2 板条激光器光束质量控制技术

光束质量控制的实质就是如何消除或校正激光光束中的像差,目前,板条激光器光束质量控制技术主要可以分为被动式校正技术和主动式校正技术[15]。被动式校正技术又可以大致分为两类:第一类是通过优化激光器结构实现像差校正;第二类是采用静态相位板进行像差校正。主动式校正技术主要可以分为以下3类:第一类是非线性光学像差校正技术;第二类是自适应光学校正技术;第三类是几何光学像差校正技术。

2.1 被动式像差校正技术

2.1.1 激光器优化校正技术

激光器的优化校正技术主要有增益介质的优化、冷却方法的优化、泵浦光的优化[16]3种方式。

(1)对增益介质的优化:(a)几何形状。通过改变增益介质的几何形状,优化光束在其中的传输路径,从而对由“热效应”引起的像差进行自动补偿,如将板条状[17]改善为“之”字形的结构[18],能够有效的抑制“热效应”对光束质量的影响;(b)对增益介质的外形尺寸进行优化。此种方法是通过优化增益介质的三维尺寸,寻找最优的尺寸组合,在满足应力断裂的前提下,尽量削弱温度梯度分布的影响[19-20];(c)对增益介质材料的优化。不同的掺杂浓度以及不同的掺杂成分将直接影响增益介质对泵浦光的吸收效率和转换效率,间接决定着增益介质中残余热量的大小。因此,合理化设计掺杂浓度、选择合适的掺杂成分对“热效应”也会起到一定的抑制作用[21-22]。

(2)在对冷却方法进行的优化主要是在传统的传导式冷却方法的基础上进行了一定的创新,提出了浸入式液体冷却和气体冷却的方式。与传统的传导冷却方式相比,浸入式液体冷却和气体冷却的方式,冷却效率更高、效果更好。虽然在冷却效果方面,液体冷却方式和气体冷却方式没有太大的区别,但是在对像差限制方面浸入式液体冷却方式更加稳定且结构相对简单[23-24]。

(3)泵浦光的优化:(a)从灯泵到LD阵列泵浦的转变,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。与二极管泵浦源相比,灯泵浦的谱线较宽,大部分波段不在增益介质的吸收带宽范围内,热沉积比较严重,严重制约了其功率和光束质量的提升[10]。此外,通过优化半导体激光器二极管阵列泵浦中二极管的排布方式以及采用柱面镜、透镜导管等器件对其输出光束中的像差

进行校正,可以提高转换效率,从而抑制热效应[25]。(b)改变泵浦光的抽运方式,从而提高转换效率,减小“热效应”的影响。经过不断的优化与创新,目前泵浦光的抽运方式大致可以分为侧面抽运[26]、角抽运[27]、面抽运[28]和端面抽运[29]4种。与端面抽运方式相比,侧面抽运能够保证较好的均匀性,有利于功率放大。端面抽运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抽运方式的优点[30]。在采用主震荡-功率放大(MOPA)结构的功率放大器中,通过调整模块间的像传递系统(4F)也可以达到像差校正的效果[31]。

虽然研究人员针对板条激光器从多个方面对“热效应”产生机理进行分析与抑制。但是,针对其产生机理和抑制的研究工作只能减小“热效应”的影响,对光束质量的改善效果有限。随着激光器输出功率的不断提升,由“热效应”引起的波前畸变依然是限制高功率、高光束质量激光输出的主要因素。针对这一问题,有学者提出应采用额外的校正器件对激光器的残余像差进行校正。

2.1.2　静态相位板校正技术

静态相位板校正技术原理如图 1 所示,当入射波前不是平面波时,通过测量入射光的波前相位信息,经过简单的变换,即可得到入射波前的共轭波,之后采用微光学加工技术,加工出与共轭波面面型一致的相位板,将其加入到光路中,即可消除静态波前畸变的影响[32]。

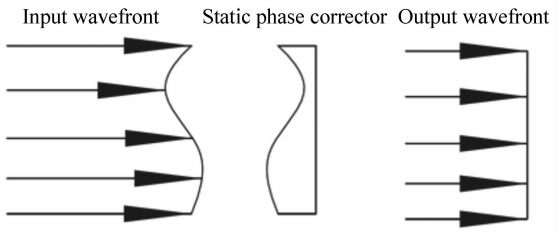

图 1　静态相位校正工作原理示意图

Fig. 1　Principle schematic of static phase corrector

静态相位板校正技术在固体激光器中也得到了一定的应用。国外方面,1999 年劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的 Wade Williams 对静态相位板校正技术应用于美国国家点火装置(NIF)中的像差校正效果进行了相关的仿真工作。仿真过程中仅考虑由光学元件的加工误差和泵浦光引起的像差成分对光束质量的影响,对比分析了在 90 Å/cm和 75 Å/cm 均方根(RMS)梯度值的加工误差条件下,采用静态相位板校正技术辅助自适应光学(AO)校正技术对某一链路的光束,进行像差校正所取得的不同效果。此外,在 NIF 系统中偶尔会出现更换增益介质(板条)的情况,如果更换增益介质,则会引入不同的加工误差,引起像差成分的改变,在一定程度上降低校正效果,文中对更换增益介质对像差校正效果的影响进行了分析。仿真结果表明:在加工误差的 RMS 梯度值为 90 Å/cm、80% 焦斑环围能量的条件下,三倍频(3W)光束的初始发散角为 58 μrad,只经 AO 系统校正后,其光束发散角仅提升到 42 μrad。在加入特定面型的静态相位板后,其光束发散角能够提升到 16 μrad。然而在更换增益介质后,其校正效果从 16 μrad 下降到 30 μrad;在加工误差的 RMS 梯度值为 75 Å/cm 的条件下,三倍频(3W)光束的初始发散角为 48 μrad 左右,在仅经过 AO 系统校正后,其光束发散角为 42 μrad,在加入特定面型的静态相位板后,其光束的发散角度能够提升到 14 μrad。在更换增益介质后,其校正效果从 14 μrad 下降到 24 μrad。通过加入特定像差成分的静态相位板,能够缓解 AO 系统驱动器行程受限的问题,有效提升了 AO 系统的校正效果,从而提升了输出光束的光束质量[33]。2001 年,T. H. Bett 等人采用径向剪切干涉仪对激光器输出光束的波前像差进行多次测量,取每一项泽尼克系数的平均值对波前信息进行复原,根据所复原的面型,加工含有特定像差信息的相位板。通过所采集的同一帧数据进行对比分析发现:当入射激光光束的斯特列尔比为 0.024 时,经过仿真计算其斯特列尔比能够提升到 0.17,提升近 7.1 倍。然而,实际的实验结果表明其斯特列尔比仅能够达到 0.1 左右,仅提升了 4.1 倍。造成这种误差的主要原因是相位板的加工误差,如刻蚀深度误差、面型误差等加工误差[34]。

2010 年,Lumer 等人采用静态相位板校正技术对径向偏振振荡器中的球差实现了腔内校

正[35]。成功解决了由球差引起的在近光轴区域近乎为 π 的相位台阶突变和光斑中明显的双圆环结构。通过在激光器腔内加入对球差进行校正的静态相位板以及相应的腔外校正技术，使得激光器的输出功率从 480 W 提升到 600 W，功率提升接近 25%。光束质量 M^2 因子从 5.4 减小到 3.5 左右，降低了接近 35%。其输出功率和光束质量明显提升。这主要因为通过对像差的校正，抑制了原本输出的 TM_{11} 模，使其输出模式变为 TM_{01} 模。

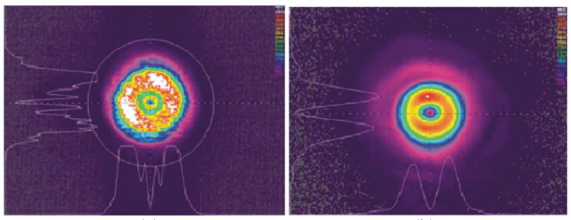

图 2 像差补偿前(a)和像差补偿后(b)的远场光斑图

Fig. 2 Profiles at the Fourier plane without (a) and with (b) phase correction

国内方面，2006 年，张锐[36]等人对静态像差校正技术在激光惯性约束聚变驱动装置中的应用进行仿真验证，仿真结果表明校正后，波前的波峰波谷值(PV)和 RMS 均有了显著降低，在 95% 焦斑环围能量下，光束质量 β 值能够从 6.21 × DL 提升到 3.95 × DL，主放大器的光束质量得到了良好的改善。

将静态相位板校正技术应用于激光像差校正领域，虽然能够起到一定的校正效果，但还不能实现近衍射极限的光束质量[36]。限制因素主要有以下几个方面：

(1)相位板的加工误差。主要是刻蚀深度误差以及由局部缺陷导致的面型误差；

(2)像差的动态扰动。在激光器中，像差不是恒定不变的。在受到温度变化、震动、气流等因素的影响时，其将在一定范围内波动。而静态相位板仅能够对特定的像差组合具有较好的校正效果，不能解决动态校正问题，这也是限制其校正效果的主要因素。

因此，只能寻求新的校正方法来解决动态校正问题，以进一步提升激光器的光束质量。但是，这种技术方案更适合于复杂庞大的激光系统中，校正由光学元件加工误差引入的静态像差。

2.2 主动式校正技术

主动式校正技术可以根据采用基础理论的不同，大致分为非线性光学校正技术、自适应光学校正技术以及几何光学校正技术 3 大类。虽然采用的理论基础不同，但校正原理均是通过共轭校正，只不过产生共轭波前的机理不同。

2.2.1 非线性光学校正技术

非线性光学校正技术是利用相位共轭镜(PCM)实时产生入射波的相位共轭波，当其再次通过增益介质后，由“热效应”引起的原有像差信息与共轭波相互抵消，使像差得到校正[37]。由于 PCM 具有较高的反射率及保真度，使其在脉冲激光器中得到了比较广泛的应用。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、布里渊增强四波混频 PCM 和光折变 PCM 等 4 种[15]。而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[38]。目前能够产生 SBS 现象的介质主要有气体、液体和固体 3 类。由于气体介质的密度小，所以增益系数较低，虽然通过增压方式可以提高介质的密度，从而改善增益系数，但研究表明，增压会影响光子的寿命，限制其校正效果。因此，目前常采用液体和固体介质作为 SBS-PCM 的工作介质[39]。

国外方面，2008 年，日本的 Ryo Yasuhara[40]等人，将 SBS-PCM 应用于脉冲板条激光器中进行像差校正，其系统示意图如图 3 所示。SBS-PCM 被放置于第二放大链路的末端，采用 FC-77 的液体介质，反射率能够达到 96% 左右。其产生的共轭光波再次通过各增益模块后，通过共轭补偿原理，实现热像差的校正。最终实现了平均功率为 213 W、峰值功率达到 2 GW、光束质量接近衍射极限的激光输出。

国内方面，2013 年，哈尔滨工业大学许平等人将 SBS-PCM 应用于板条激光器中进行腔内热像差校正，对光束质量有一定的提升效果。其中

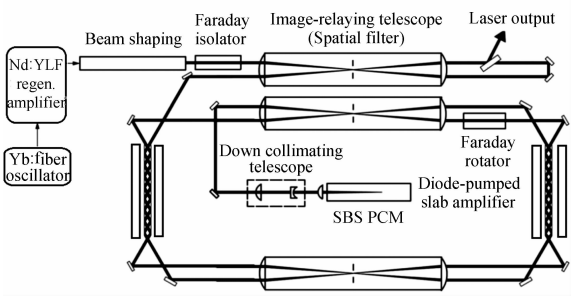

图 3　“之”字形板条激光器原理示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the zigzag-type slab laser

SBS-PCM 采用的介质为 C_2CL_4 液体介质,反射率能够达到 97%。但是由于液体介质和阈值条件带来的损耗会增加激光器的阈值电压,并且使输出光束的能量有所下降。

液体介质不仅受到“热效应”和光学击穿效应的影响,而且还存在化学污染等问题[41]。因此,研究人员开展了全固化激光器的相关研究工作,即将固体介质做成 SBS-PCM 应用到固体激光器中进行像差校正。

国外方面,2005 年,Valeri I. Kovalev 等人[42]报道了关于固体介质 SBS-PCM 的研究进展。实验装置的结构示意图如图 4 所示。由主震荡放大器产生的信号光在进行 6 次功率提取后,进入 SBS-PCM,产生的共轭光波再次进入多级放大器后,即可实现像差校正,最终进行了 12 次的功率放大。文中还指出,当入射光为线偏振光时,由 SBS-PCM 产生的共轭光波不在是偏振光,因为在对其反射率进行测量时,在不考虑偏振问题时,其反射率为 75%,而对线偏振光的反射率仅为 35%,共轭波的偏振状态发生了改变;另一方面,脉冲的形状基本不变,但脉宽从 140 μs 压缩到了 100 μs。最终获得了平均功率为 300 W,光束质量接近衍射极限的准连续激光输出(重复频率为 100 Hz)。

国内方面,2010 年,浙江大学赵智刚等人[43]报道了将 SBS-PCM 应用到全固态单纵模 MOPA 激光器中。采用锥度光纤作为 SBS-PCM 的工作介质进行校正,将光束质量 M^2 因子从 4 提升到了 $M_x^2 = 1.74$, $M_y^2 = 1.93$,有效改善了光束的质量,且反射率超过了 50%。其反射的脉冲形状比较平滑,且脉冲的压缩比达到了 1:4,可以有效提高单脉冲的峰值功率。最终获得了峰值功率达到 16.8 MW 的单纵模激光输出。

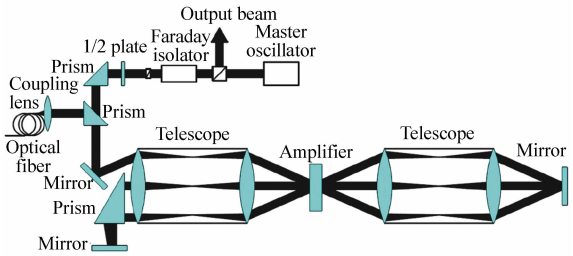

图 4　MOPA 结构示意图

Fig. 4　Structural schematic of the MOPA

由于 SBS-PCM 的装置相对比较简单,并且对泵浦光的均匀性要求较低,使得 SBS-PCM 能够应用于固体脉冲激光器中进行像差校正。但其在高功率板条激光器中并没有得到广泛应用。首先,将液体作为工作介质反射率较高,但其反射率和共轭保真度均会受到入射光光束质量的影响,当入射光的聚焦光斑大于 2.5 倍艾里光斑的大小时[40],其产生共轭光波的阈值条件将增加,补偿效果将下降,难以解决大幅值像差的校正问题。虽然固体介质 SBS-PCM 的阈值条件不会随着入射光的光束质量降低而下降,但是其共轭保真度会随着入射光的光束质量的下降而下降。其次,其损伤阈值低,受热效应影响比较严重,不仅使反射率、保真度等性能指标急速下降,还将引起固体介质的融化或气化,并造成不可逆的损伤[44]。

另一方面,只有当激光能量达到 SBS 效应的阈值条件时,才能产生共轭光波,然而当入射光的光强持续增加时,由于其他非线性效应的竞争作用,其反射率呈下降趋势。而当光强超出阈值许多倍时,还会造成系统的不稳定性。此外,当 SBS-PCM 作为腔镜使用时,由于介质阈值条件带来的损耗会增加激光器的阈值电压,并且使输出光束的功率有所下降。SBS-PCM 的上述缺陷,限制了其在高重复频率、高平均功率、窄脉宽激光器中的应用,此外 SBS-PCM 校正技术也难以应用于连续型激光器中[45]。进而,为了能够更好地解决板条激光器像差校正的问题,研究人员对 FWM-PCM 校正技术开展了相关的研究工作。

国外方面,2012 年,波兰的 W. Zendzian 等人被邀在 SPIE 会议上发表了一篇文章,详细阐述了一种能够自校正的互易式板条激光谐振腔技术。自校正谐振腔的原理示意图如图 5 所示。该谐振腔就是利用 FWM-PCM 像差校正技术来提升输出光束的光束质量。FWM 可以进一步解释为 3 个光波相互之间的非线性作用,其中后向传输的 $E_1^{(-)}$ 波、$E_2^{(-)}$ 波与正向传输的 $E_2^{(+)}$ 波、$E_3^{(+)}$ 波在介质中产生周期性变化的干涉条纹。由于入射角度较小,其产生的干涉条纹在 Z 方向上比较长(60 mm)。这种干涉将引起介质产生相应的周期性变化,从而在增益介质内部形成一个动态全息单元,$E_1^{(-)}$ 波与这个动态全息单元相互作用,会发生衍射现象,从而产生共轭光波 E_4,共轭光波 E_4 可以进一步解释为入射光波 $E_1^{(-)}$ 在这种周期结构中产生的 1 级衍射光波,即 FWM 相当于使全息技术中的记录、显影和读出过程同时发生。该系统采用 FWM-PCM 对热像差进行校正,最终获得了 250 mJ、200 μs、重复频率 25 Hz、光-光转换效率为 30%,光束质量接近衍射极限(M^2 = 1.2)的线偏振(偏振度大于 1∶100)激光输出[46]。随后,2014 年,W. Zendzian 等人继续报道了 FWM-PCM 在调 Q 板条激光器像差校正中所取得新的成果,最终获得了单脉冲能量为 18.3 mJ、脉宽为 9.5 ns、峰值功率达到 2 MW 的激光输出。实验结果显示,经像差校正后其光束质量 M^2 因子能够小于 1.3[47]。

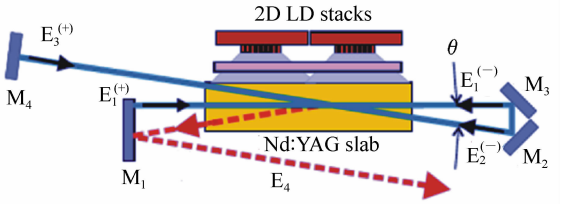

图 5 互易式自校正谐振腔原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of reciprocal self-correcting resonator

2016 年,M. KASKOW 等人报道了关于 FWM-PCM 在板条激光器热像差校正中新的进展,图 6 所示为非互易自校正式谐振腔的原理示意图,与互易式谐振腔的区别主要是加入了由偏振片、半波片和法拉第旋转器组成的非互异性透射元件(NRTE)来管理腔内光束传播方向。加入 NRTE 可以控制对向传播光束的振幅,从而能够有效提高衍射效率和抑制放大器的饱和效应。引入第二个增益模块主要是为了满足激光产生阈值的要求。文中分析了不同 θ 角对光-光转换效率的影响。得知,当 θ 角减小时,光-光转换效率会有所提升。然而,当 θ 角过小时,会引起寄生震荡。在 θ = 2.5 mrad 时,获得了单脉冲能量为 228 mJ、光-光转换效率达到 17.2% 的激光输出。由于 NRTE 没能对单纵模光束起到增强作用,导致每个模式均产生增益光栅,形成一个非常复杂的周期结构。另一方面,起到相位延迟作用的波片,只是对转换效率和激光产生的阈值有影响,对腔内模式选择没有影响,最终导致了高阶横模的输出,并且在空间增益分布高度不均匀的情况下,使得光束质量 M^2 因子达到 2.5 左右[48]。

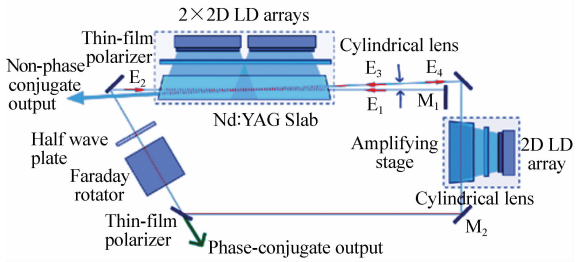

图 6 非互异性自校正谐振腔示意图

Fig. 6 Schematic of nonreciprocal resonator with self-correcting

国内对 FW-PCM 在板条激光器像差校正方面的研究工作主要集中在北京工业大学,2014 年,孙哲等人报道了开环互易式板条激光器的相关研究工作。该系统采用全息光栅技术实现了波前像差的自校正。根据之前国外研究人员报道的相关文献将这种全息光栅校正技术称为 FWM-PCM 校正技术,这主要是因为其产生共轭波的机理是 FWM 现象,从原理上与实现途径上并没有区别。该系统采用略入射的结构,当腔内相交光束夹角为 3°,略入射角为 6°,泵浦光功率为 38 W 时,获得了平均功率达到 18.25 W,光-光转换效率为 48%,光束质量 M^2 因子小于 1.2,消光比大于 1 000∶1 的线偏振激光输出。实验中在

相同的条件下,对传统的自由振荡激光器与互易式激光器的输出光束的模式进行了对比。实验结果表明这种互易式激光器的结构能够明显减小纵模宽度和纵模数量,并且能够起到像差校正的作用[49]。

与 SBS-PCM 校正技术相比,FWM-PCM 校正技术虽然具有无阈值要求、能够提供远大于 1 的反射率和能够对连续输出的激光器进行像差校正等优点,但是其在高平均功率输出的激光器中的应用存在诸多问题。例如:FWM-PCM 对信号光的光束质量要求比 SBS-PCM 的要求还要严格。另外,虽然不存在反射损失的问题,但是存在衍射损耗的问题,结构也比较复杂,并且还未见报道能够实现单纵模激光输出[49],很大程度上限制了其在高平均功率固体激光器中的应用。由于 SBS-PCM 和 FWM-PCM 存在诸多限制,它们在高功率激光领域并没有得到广泛应用。

2.2.2　自适应光学校正技术

自适应光学(AO)校正技术一开始被应用于实时校正大气扰动,到 20 世纪 90 年代才被用于高能激光领域进行像差校正[15]。AO 系统的典型结构如图 7 所示,控制系统根据探测系统反馈的相关信息,控制变形镜(DM)产生共轭面型,经其反射后即可实现像差校正。该技术不仅能够应用于脉冲激光器,也能够应用于 CW 型激光器进行像差校正[45],且对入射光束的光束质量要求也相对比较宽松。

根据探测系统所反馈信息的不同,可将 AO 系统分为两类:第一类为反馈波前信息的 AO 系统,其采用波前传感器探测光波的信息,驱动 DM 产生共轭面型,校正速度较快[15];第二类为无波前探测的 AO 系统,其采用聚焦光斑的相关参数作为反馈信息,通过寻优算法驱动 DM 找寻入射波前的共轭波前面型,不受闪烁等畸变的条件限制,结构也相对简单[50]。

国外方面,2007 年,美国诺·格公司的 S. Redmond 等人[51]将自适应光学校正技术应用于输出功率达到 15 kW 的单频板条激光器中进行像差校正。该系统采用哈特曼波前传感器作为反馈信息实现动态像差校正,并且能够连续工作

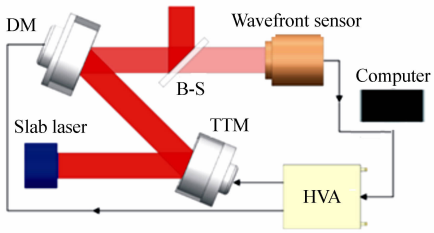

图 7　Schematic of AO system

Fig. 7　自适应光学校正技术原理示意图

22 min,最终获得了光束质量达到 1.28 倍衍射极限的激光输出。2008 年,英国斯特拉斯克莱德大学的 W. Lubeigt 等人[52]采用无波前 AO 校正技术进行腔内像差校正。其中,DM 作为腔镜,遗传(GA)算法作为 DM 的控制算法,光斑远场亮度信息作为反馈,实现了在不同结构板条激光器的腔内像差校正。第一组实验,针对侧面泵浦的 Nd:YAlO板条激光器,采用传统的 CMOS 相机探测出射光束的远场亮度信息,并作为反馈信息,通过 GA 算法控制 DM 产生相应的面型,实现腔内像差的校正。最终将初始的 6 W 多模激光输出,改善到 M^2 因子小于 1.3 的单模激光输出,且功率损失小于 5%。由此可见,腔内像差校正不仅能够提升光束质量,还能够改变输出激光的模式。第二组实验针对略入射式的 Nd:$GdVO_4$ 板条激光器,采用基于二次谐波的探测方式,主要是采用光电探测器件,将探测所产生的二次谐波亮度信息作为反馈信息,同样通过 GA 算法控制 DM 产生相应的面型,实现腔内像差的校正。最终将初始的功率为 15 W,两方向上的 M^2 因子分别 27 和 10.5 的激光输出,改善为 14 W,两方向上的 M^2 因子分别 9 和 3 的激光输出,有效提升了出射光束的光束质量。2009 年,诺. 格公司的 Stuart J. McNaught 等人[53]报道了 7 台 15 kW 板条激光器的相干合成实验结果,其实验原理图如图 8 所示。每一路功率放大器均由 4 个 4 kW 传导冷却端面泵浦的板条放大器(CCEPS)组成,经双程放大后,最终获得 15 kW 的激光输出。采用 7 套 AO 系统分别对 7 台放大器输出的激光进行像差校正,最终获得了功率达到 100 kW,平均光束质量因子达到 2.9 × DL 的激光输出。

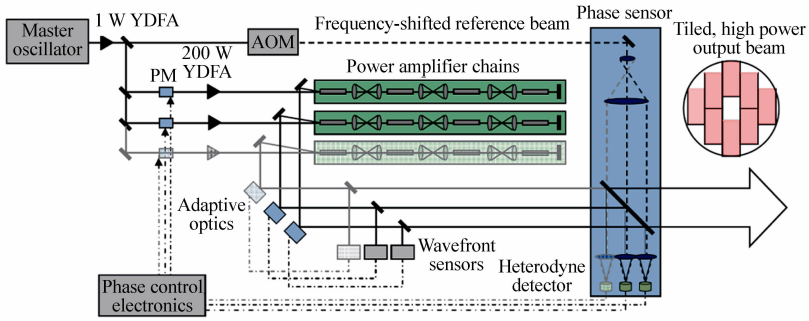

图 8 诺·格公司百千瓦相干合成实验原理图

Fig. 8 Schematic of the 100kW coherently combined laser system

国内方面,2012 年中国科学院光电技术研究所(简称中科院光电所)杨平[54]等人以光束聚焦光斑为反馈信息采用随机并行梯度下降控制算法(SPGD),对输出平均功率达到 265 W 的板条激光器进行像差校正,实验原理图如图 9 所示。

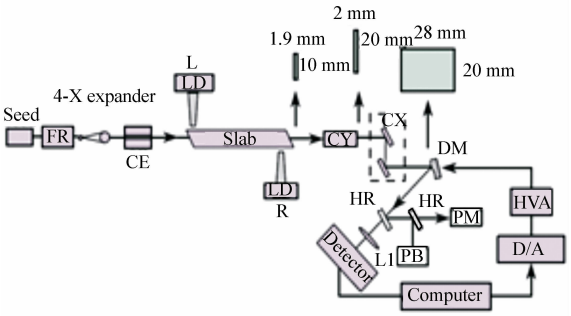

图 9 无波前探测 AO 像差校正的实验原理图

Fig. 9 Schematic of the wave-front sensor-less AO system

经校正后其光束质量 β 因子从 15.5 × DL 改善到了 6.2 × DL。2013 年,向汝建等人[55]采用 AO 系统对输出功率达到 11.3 kW 的板条激光放大器进行像差校正。通过分析输出光束的像差特性,研制了主动制冷型高空间分辨率的变形镜,将光束质量 β 因子从7.4 × DL(平均值)改善到了 4.06 × DL(闭环后平均值),有效改善了光束质量。2014 年,中科院光电所杨平[56]等人进一步将无波前探测 AO 系统应用于输出功率达到 1.3 kW的板条激光器中,将光束质量从 13.1 × DL 改善到了 2.3 × DL。2015 年,中国科学院理化技术研究所(简称中科院理化所)陈中正[13]等人报道了进一步的研究成果。在输出平均功率为 8.2 kW时,利用 AO 系统进行像差校正可将光束质量 β 因子从 6.8 × DL 改善到了 3.5 × DL。2018 年,杨平等人[57]采用 AO 系统辅以相应的低阶像差校正技术,对输出峰值功率达到 750 MW 的板条激光器进行光束净化,最终光束质量 β 因子为 1.64 × DL。

将近年来采用 AO 系统进行像差校正的成果总结列于表 1。诺·格公司采用的光束评价函数计算结果较光束质量 β 因子的计算结果偏小。

表 1 AO 系统进行像差校正的代表性成果

Tab. 1 Representative results of aberration correction used by AO system

年份	单位	功率	光束质量
2007	诺·格公司	15 kW(平均)	1.28 × DL
2009	诺·格公司	100 kW(平均)	2.9 × DL
2012	中科院光电所	265 W(平均)	6.2 × DL(β)
2013	国防科技大学	11.3 kW(平均)	4.06 × DL(β)
2015	中科院理化所	8.2 kW(平均)	3.5 × DL(β)
2018	中科院光电所	750 MW(峰值)	1.64 × DL(β)

AO 系统应用于板条激光器领域进行像差校正,虽然能起到较好的效果,但随着激光器功率的提升,仅采用 AO 系统对板条激光器进行像差校正,已经难以得到衍射极限的光束质量。主要原因有以下两个方面:第一方面,输出光束宽高比较小(一般 1∶10),这种光斑形状覆盖的 DM 驱动器越少,DM 在拟合共轭面型时处理细节的能力就越差,对波前局部畸变的校正能力将受到限制[58]。第二方面,随着功率的提升,板条激光器输出光束中含有像差的波峰波谷值(PV)从几微

米到几十微米(甚至 100 微米左右)变动[59],限制了变形镜的校正能力。这主要是因为驱动变形镜产生共轭面型的驱动器均有一定的行程限制,驱动器行程越大,变形镜能校正的波前畸变的 PV 值也越大。但是,由于受到现有加工工艺的限制,使得随着驱动器行程的增加,变形镜的空间分辨率呈下降趋势。这将导致变形镜对处理局部波前畸变的拟合能力有所下降,限制了其对高阶像差的校正能力。由于板条激光器的出射光束具有宽高比较小、波前畸变 PV 值较大的特点,在一定程度上限制了 AO 系统的校正能力[60]。

2.2.3　几何光学校正技术

几何光学校正方法是采用镜片组合,通过调整镜片的位置关系,引入特定的像差成分,最终达到像差校正的效果。这种校正方式适用于由“热效应”引起的低阶像差进行校正,该方法具有校正量大、结构简单、操作方便等优点[61]。

国外方面,2001 年,Gregory D. Goodno 等人[62]将柱面透镜加入到谐振腔内进行像差校正。针对不同的泵浦功率,通过调节透镜的间隔,校正不同功率下的热透镜效应。最终实现了功率为 228 W、M^2 < 1.7 的基膜线偏振激光输出。文中并没有对透镜的间隔调整量进行定量分析,也没有对校正原理进行过多的阐述。2007 年,诺·格公司在文献[63]中提及在采用 AO 系统进行像差校正时,采用扩束整形系统对光束进行整形,但文中并没有对像差校正效果进行介绍,仅给出经自适应光学系统校正后,光束质量能够达到 1.28 × DL。2007 年,Daijun Li 等人将柱面透镜引入到激光器谐振腔内,用于热透镜效应的校正。经热透镜校正后,实现了平均功率为 110 W,脉宽为 12 ns,重复频率为 10 kHz,光-光转换效率 39% 的激光输出[64]。2008 年,该团队采用板条激光器进行二次谐波产生的研究工作。其中采用单柱面透镜对板条激光器的热透镜效应进行校正,其实验装置图如图 10 所示,校正透镜位于激光器谐振腔内,经校正后获得了 24.2 mJ,7.1 ns,重复频率 1 kHz,光束质量 M^2 < 1.4 的激光输出。板条激光器输出的光束经整形系统整形后,入射到 LBO (lithium triboast)晶体中用于产生二次谐波,最终获得了近衍射极限的光束输出[65]。然而随着激光器功率的变化,其像差特性也会随之改变。因此,可以根据不同的像差特性,自动调整镜片组合的位置关系,实现像差的自动校正。

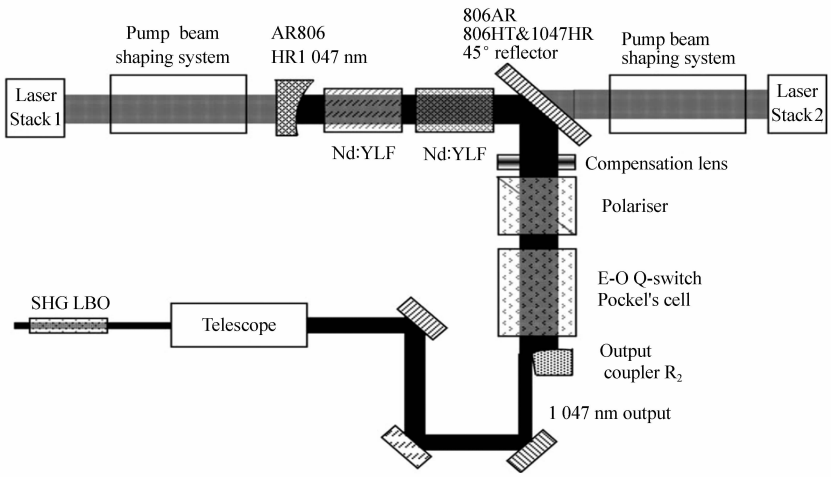

图 10　腔内像差补偿系统原理图

Fig. 10　Principle diagram of intracavity aberration compensation system

国内方面,2014 年 ,Liu 等人[66]提出一种基于反射式光束整形系统来校正板条激光器的低阶像差,其工作原理如图 11 所示。该系统采用两片柱面反射镜和一片球面反射镜组成的离轴三反式结构,以泽尼克系数(Z_4,Z_5,Z_6)为反馈,采用 PID (proportional-integral-derivative)算法对三片反射镜的间距进行优化调整,最终实现低阶像差的自动校正。实验中通过插入不同的相差板模拟板条激光器在不同功率下的低阶像差特性。实验结果表明:可将初始光斑尺寸为 30 mm × 5 mm 的矩形

光斑，整形为 7.44 mm×7.73 mm 的方形光斑，并且使光束的最大波前 PV 值由 87.7λ（λ=1 064 nm）下降到 0.50λ，RMS 由 19λ 下降到 0.09λ，显著提升了板条激光器的光束质量[66]。虽然，该系统通过采用优化算法实现了对模拟光源低阶像差的自动校正，但由于反射式校正系统结构相对比较复杂，在调整反射镜的间距时，会引起输出光束指向变动，在调整间距的同时还需要校正光束的指向偏差。此外，该系统采用三片凹面反射镜，势必会引起光束在空间中聚焦，形成一个实焦点，在激光器输出能量较高时，实焦点的存在会引入一些非线性效应[67]，从而降低输出光束的光束质量。为解决指向偏差和实焦点等问题，2015 年，Z. W. Xue 等人[68]对透射式的低阶像差校正系统进行研究。该系统采用透射式结构，根据波前传感器测量的入射光波的泽尼克系数（Z_4，Z_5），通计算机学习算法，实现了低阶像差的自动校正。实验中的像差由低阶像差产生器产生，主要由四片柱面透镜组成，通过调整透镜的间隔，将产生不同的像差成分。实验结果表明，经低阶像差校正后，能够将初始光束尺寸为 3.2 mm×32 mm的矩形光斑，整形为 32 mm×32 mm 的方形光斑，光束初始的波前 PV 值为 66.10λ（λ=1 064 nm），RMS 为 16.05λ，校正后分别下降到 0.48λ（λ=1 064 nm），RMS 为 0.1λ。有效提高了板条激光器的光束质量。两种结构均能够通过优化算法实现低阶像差的自动校正，但对于真实的板条激光器而言，其像差成分很难用像差板或透镜组合进行模拟。此外，采用优化算法将导致输出光束尺寸的变化不可预测。

2017 年，中科院光电所[69]提出了一种约束条件下的低阶像差自动校正技术，以出射光束尺寸为约束条件，通过建立低阶像差与透镜间隔之间的数学解析关系的方式，根据波前像差信息直接解算出满足需求的间隔调整量，最终实现了低阶像差的自动校正。实验结果表明：校正后出射光束的尺寸从 1.8 mm×11 mm 变换为 22 mm×22 mm 的近似正方形，波前 PV 值从 57.26 μm 减小到了 1.87 μm，光束质量得到了明显的提升，同时保证了光束尺寸和光束质量的要求。2018 年，中科院光电所对约束条件下的低阶像差自动校正方法进行了进一步的研究，基于建立数学解析关系的方法，提出了一种调整校正方法，更好地解决了像差随功率扰动的校正问题[70]。

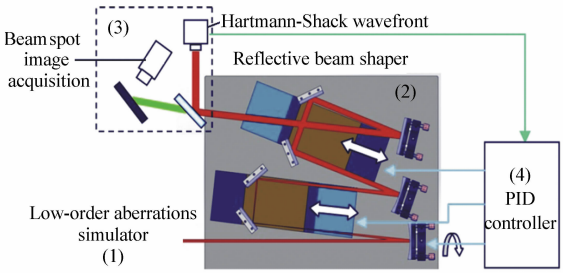

图 11 离轴三反像差校正系统实验原理图

Fig. 11 Principle diagram of offaxis tri-inversion aberration correction sytsem

几何光学校正技术适用于宽高比较小且具有较大波前 PV 值的板条激光器中的像差校正，因为其不仅能够满足后续应用中尺寸匹配的需求，还能对大波前 PV 值的低阶像差成分进行校正。然而，国外研究人员并没有过多的关注几何光学校正技术在板条激光器中像差校正的应用，仅将这种校正方式作为扩束整形的手段，来满足 AO 系统的需求，使用 AO 系统进行像差校正，忽略了其对低阶像差的自动校正能力。国内研究人员对这种校正技术虽然进行了相关仿真及实验工作，但仅在低功率下进行了实验验证，缺少进一步的研究工作。此外，采用泽尼克系数来表征具有小宽高比矩形光斑的波前信息会引入匹配误差，使校正结果变差[71-73]。

2.2.4 混合式像差校正技术

混合式像差校正技术是同时采用了多种上述校正技术，如 2016 年中科院光电所赖柏衡[74]等人，提出将几何光学校正技术与自适应光学校正技术相结合的技术方案，首先采用几何光学校正技术解决大幅值低阶像差的校正和光束尺寸匹配问题，之后采用自适应光学校正技术进行残余像差校正，系统原理如图 12 所示。并将该系统应用于输出功率达到 10 kW 的板条激光器中，经低阶像差校正系统校正后，光束质量达到了 7.3 倍衍射极限，进一步经自适应光学校正系统校正后，光束质量提升到了 1.9 倍衍射极限，达到了近衍射

极限的要求。

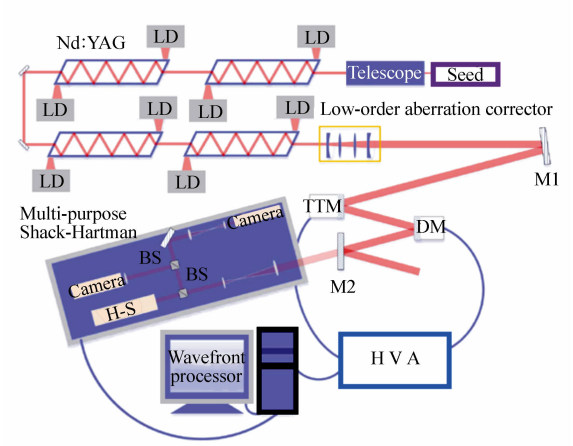

图 12　MOPA 激光器混合式像差校正系统示意图

Fig. 12　Schematic of the hybrid AO syetem for the MOPA laser

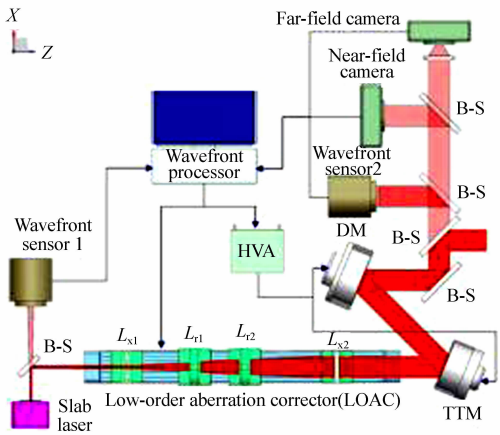

图 13　混合式像差校正系统.

Fig. 13　Schematic of the hybrid AO syetem

2017 年,中科院光电所杨平、董理治[75]等人,提出将基于几何光学校正原理的低阶像差校正系统结合自适应光学校正系统协同工作的技术方案,并将其应用于国家重大科研装备研制项目中,实现了 5 J/6.6 ns/200 Hs 固体板条激光器的光束净化工作,系统原理图如图13所示。在仅经低阶像差校正后,光束质量从 18 倍衍射极限左右提升到了 2.86 倍衍射极限,进一步经自适应光学校正系统校正后,光束质量提升到了 1.64 倍衍射极限,同时达到了高功率、高光束质量的需求。

混合式校正系统使几何光学校正技术和自适应光学校正技术协调工作,弥补各自的不足,充分发挥各自优势,为同时获得高功率、高光束质量的激光输出提供了技术支持。

3　总结与展望

本文对板条激光器光束质量控制技术现有的研究成果进行了归纳和总结,介绍了多种校正技术在板条激光器中取得的相关成果,并对现有的像差校正技术在研究中存在的一些问题进行了阐述。随着板条激光器输出功率的提升,仅采用单一的校正方法已经难以实现近衍射极限光束质量的要求。为进一步提升板条激光器的光束质量,应以优化校正方式为基础,开展相关的研究工作,通过优化激光器自身的相关参数,从源头抑制像差的产生,起到提高光束质量的作用。当然,非线性光学校正技术的全固化以及提升共轭保真度和反射率的研究也是未来发展方向之一;大行程、高空间分辨率的 AO 校正系统也是未来的重要研究方向。另一方面,对几何光学校正技术在板条激光器中的校正效果进行理论分析与实验研究以及对相关限制因素的探索工作也具有重要的研究意义。根据板条激光器大波前畸变和宽高比较小的特性,采用混合式校正技术是目前较为可行的校正策略。例如:采用大行程低空间分辨率的矩形变形镜,预校正低阶像差成分。然后,采用高空间分辨率的变形镜进行高阶像差校正;以及采用几何光学校正技术对其低阶像差进行预校正,之后采用 AO 系统进一步提升光束质量。

参考文献:

[1]　周寿桓,赵鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光,2009,36(7):1605-1618.
ZHOU SH H,ZHAO H,TANG X J. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2009,36(7):1605-1618. (in Chinese)

[2]　李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J]. 激光与光电子学进展,2008,45(7):16-29.
LI J M. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Pro-*

gress,2008,45(7):16-29. (in Chinese)

[3] MARTIN W S,CHERNOCH J P. Multiple internal reflection face-pumped laser:US,3633126[P]. 1972-01-04.

[4] CHEN X M,XU L,HU H,*et al*.. High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. *Optics Express*,2016,24(21):24517-24523.

[5] GOODNO G D,PALESE S,HARKENRIDER J,*et al*.. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. *Optics Letters*,2001,26(21):1672-1674.

[6] REDMOND S,MCNAUGHT S,ZAMEL J,*et al*.. 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]. Proceedings of 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics,IEEE,2007:1-2.

[7] MAO Y F,ZHANG H L,CUI J H,*et al*.. 25 MJ, 5 kHz, 3 ns, Nd:YAG discrete path slab ampliter using a hybrid resonator[J]. *Appl. Opt.*,2017,56(10):2741-2744.

[8] 王建磊,李磊,乔亮,等.端面抽运复合 Nd:YAG 陶瓷板条激光介质温度和应力分布的理论分析[J].中国激光,2009,36(7):1777-1783.
WANG J L,LI L,QIAO L,*et al*.. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2009,36(7):1777-1783. (in Chinese)

[9] 陈林,贺少勃,刘建国,等.新一代百千瓦高平均功率板条激光器研究进展[J].激光与光电子学进展,2009,46(1):37-42.
CHEN L,HE SH B,LIU J G,*et al*.. Progress of hundred-kilowatt high-average-power slab laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2009,46(1):37-42. (in Chinese)

[10] INJEYAN H,GOODNO G D. *High Power Laser Handbook*[M]. New York:McGraw-Hill Professional,2011:187-200.

[11] 靳强,魏晓羽,高健存,等.连续 16 W 二极管端面泵浦混合腔 Nd:YVO_4 板条激光器[J].量子电子学报,2005,22(4):528-533.
JIN Q,WEI X Y,GAO J C,*et al*.. Diode end pumped hybrid cavity Nd:YVO_4 slab laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*,2005,22(4):528-533. (in Chinese)

[12] MA X H,BI J Z,HOU X,*et al*.. Conductively cooled all-solid-state zigzag slab laser[J]. *Chinese Optics Letters*,2008,6(5):366-368.

[13] CHEN ZH ZH,XU Y T,GUO Y D,*et al*.. 8.2 kW high beam quality quasi-continuous-wave face-pumped Nd:YAG slab amplifier[J]. *Applied Optics*,2015,54(16):5011-5015.

[14] CHEN Y,LIU W,BO Y,*et al*.. High-efficiency high-power QCW diode-side-pumped zigzag Nd:YAG ceramic slab laser [J]. *Applied Physics B*,2013,111(1):111-116.

[15] 雷翔.板条固体激光器光束净化控制技术研究[D].成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2013: 13-20.
LEI X. Research on beam cleanup of slab lasers[D]. Chengdu:Institute of Optics and Electronics,Chinese Academy of Sciences,2013:13-20. (in Chinese)

[16] BANERJEE S,ERTEL K,MASON P D,*et al*.. DiPOLE:a 10 J, 10 Hz cryogenic gas cooled multi-slab nanosecond Yb:YAG laser[J]. *Optics Express*,2015,23(15):19542-19551.

[17] HUANG Y,MENG J Q,ZHANG L L,*et al*.. The analysis of the thermal effects of double-slab Nd:YAG laser medium [J]. *Proceedings of SPIE*,2005,5627:397-405.

[18] GANIJA M,OTTAWAY D,VEITCH P,*et al*.. Cryogenic, high power, near diffraction limited, Yb:YAG slab laser[J]. *Optics Express*,2013,21(6):6973-6978.

[19] HOU X,LU Y T. Thermal effects of Diode side-pumped solid-state slab laser[J]. *Proceedings of SPIE*,2005,5627:510-516.

[20] ERTEL K,BANERJEE S,MASON P D,*et al*.. Optimising the efficiency of pulsed diode pumped Yb:YAG laser amplifiers for ns pulse generation[J]. *Optics Express*,2011,19(27):26610-26626.

[21] 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]. *Chinese Optics Letters*,2015,13(6):061401.

[22] CHENG X J,XU J Q,HANG Y,*et al*.. High-power diode-end-pumped Tm:YAP and Tm:YLF slab lasers[J]. *Chinese*

Optics Letters,2011,9(9):091406.

[23] FU X,LI P L,LIU Q,*et al*.. 3 kW liquid-cooled elastically-supported Nd:YAG multi-slab CW laser resonator[J]. *Optics Express*,2014,22(15):18421-18432.

[24] SIEBOLD M,LOESER M,HARZENDORF G,*et al*.. High-energy diode-pumped D_2O-cooled multislab Yb:YAG and Yb:QX-glass lasers[J]. *Optics Letters*,2014,39(12):3611-3614.

[25] 赵爽. 高功率高光束质量全固态板条激光器的研究[D]. 济南:山东大学,2010:21-27.
ZHAO SH. Study on high power and high beam quality solid-state slab laser[D]. Ji′nan:Shandong University,2010:21-27. (in Chinese)

[26] RUTHERFORD T S,TULLOCH W M,SINHA S,*et al*.. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers[J]. *Optics Letters*,2001,26(13):986-988.

[27] 刘欢,李青华,高松,等. 角抽运复合板条激光器热焦距计算方法[J]. 中国激光,2012,39(6):0602008.
LIU H,LI Q H,GAO S,*et al*.. Theoretical study on thermal focal length of corner-pumped lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2012,39(6):0602008. (in Chinese)

[28] WANG J L,SHI X CH,YIN L,*et al*.. Derivation and analysis of frantz-nodvik equation for face-pumped zig-zag slab laser amplifier[C]. Proceedings of 2009 Conference on Lasers & Electro Optics & the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2009:1-2.

[29] PALESE S, HARKENRIDER J, LONG W,*et al*.. High brightness, end-pumped, conduction cooled Nd:YAG zig-zag slab laser architecture[C]. Proceedings of Advanced Solid State Lasers 2001,Optical Society of America,2001.

[30] LIU H, LIU Q,GONG M L. Efficient corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab 1.1 μm laser[J]. *Optics Express*, 2010,18(19):19603-19611.

[31] KÖRNER J,HEIN J,KAHLE M,*et al*.. High-efficiency cyrogenic-cooled diode-pumped amplifier with relay imaging for nanosecond pulses[J]. *Proceedings of SPIE*,2011,8080:80800D.

[32] BETT T H,BARNES A R,HOPPS N W,*et al*.. Development of static phase control elements for high-power solid state lasers[J]. *Proceedings of SPIE*,2001,4440:93-100.

[33] WILLIAMS W H. Simulations of a phase corrector plate for the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*,1999, 3492:355-362.

[34] BETT T H,BARNES A R,HOPPS N W,*et al*.. Application of static phase control elements to high-power solid state lasers[J]. *Proceedings of SPIE*,2001,4270:177-191.

[35] LUMER Y,MOSHE I,JACKEL S,*et al*.. Use of phase corrector plates to increase the power of radially polarized oscillators[J]. *Journal of the Optical Society of America B*,2010,27(7):1337-1342.

[36] 张锐,张小民,粟敬钦,等. 用于惯性约束聚变驱动器的静态相位控制元件[J]. 中国激光,2006,33(3):311-315.
ZHANG R,ZHANG X M,SU J Q,*et al*.. Static phase control elements for inertial confinement fusion drivers[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2006,33(3):311-315. (in Chinese)

[37] 李勇. 重复频率受激布里渊散射光束波前畸变补偿的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:7-22.
LI Y. Investigation on compensate phase aberration of repetition laser by SBS-PCM[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2008:7-22. (in Chinese)

[38] 宁永刚,聂劲松. 布里渊增强四波混频技术及其应用[J]. 光电技术应用,2005,20(1):17-19,23.
NING Y G,NIE J S. Study and application of BEFWM technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*,2005,20(1):17-19,23. (in Chinese)

[39] 王昊成,樊仲维,余锦,等. 带 SBS 相位共轭镜的高重复频率高功率激光系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014,51(4):040001.
WANG H CH,FAN ZH W,YU J,*et al*.. Research progress of high repetition rate and high power laser with SBS-phase conjugate mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2014,51(4):040001. (in Chinese)

[40] YASUHARA R,KAWASHIMA T,SEKINE T,*et al*.. 213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd:glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror[J]. *Optics Letters*,2008,33(15):1711-1713.

[41] 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,2013:25-50.
XU P. Research on output of radial slabs solid-state laser based on SBS[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013,25-50. (in Chinese)

[42] KOVALEV V I,HARRISON R G,SCOTT A M. 300 W quasi-continuous-wave diffraction-limited output from a diode-pumped Nd:YAG master oscillator power amplifier with fiber phase-conjugate stimulated Brillouin scattering mirror[J]. *Optics Letters*,2005,30(24):3386-3388.

[43] 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):2949-2953.
ZHAO ZH 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]. *Chinese Journal of Lasers*,2010, 37(12):2949-2953. (in Chinese)

[44] 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 CH W,XIAO SH. Investigation and discussion on high average-power fiber stimulated brillouin scattering phase-conjugation mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2015,52(6):070002. (in Chinese)

[45] 晏虎,雷翔,刘文劲,等. 37单元双压电片变形镜板条激光光束净化[J]. 强激光与粒子束,2012,24(7):1663-1666.
YAN H,LEI X,LIU W J,*et al*.. Beam cleanup of slab laser with 37-element bimorph deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2012,24(7):1663-1666. (in Chinese)

[46] ZENDZIAN W,JABCZYNSKI J K,KASKOW M,*et al*.. Diode side pumped Nd:YAG slab laser with self-adaptive resonator[J]. *Proceedings of SPIE*,2012,8702:870208.

[47] ZENDZIAN W,KASKOW M,JABCZYNSKI J K. Diode-pumped, actively Q-switched Nd:YAG laser with self-adaptive, reciprocal, closed-loop resonator[J]. *Optics Express*,2014,22(25):30657-30662.

[48] KASKOW M,GALECKI L,ZENDZIAN W,*et al*.. Side-pumped neodymium laser with self-adaptive, nonreciprocal cavity [J]. *Opto-Electronics Review*,2016,24(1):10-14.

[49] 孙哲,李强,程秋桐,等. 高效率连续半导体抽运开环互易式全息光栅Nd:YVO_4板条激光器[J]. 中国激光,2014,41(7):0702003.
SUN ZH,LI Q,CHENG Q T,*et al*.. Efficient continuous diode-pumped Nd:YVO_4 slab laser with an opened-loop reciprocal dynamic holographic cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2014,41(7):0702003. (in Chinese)

[50] 宋阳. 基于SPGD的无波前探测自适应光学技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2015:9-15.
SONG Y. Study on non-wavefront sensor adaptive optics technology based on stochastic parallel gradient descent algorithm[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,2015: 9-15. (in Chinese)

[51] REDMOND S,MCNAUGHT S,ZAMEL J,*et al*.. 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]. Proceedings of 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics,IEEE,2007.

[52] LUBEIGT W,VALENTINE G,BURNS D. Enhancement of laser performance using an intracavity deformable membrane mirror[J]. *Optics Express*,2008,16(15):10943-10955.

[53] MCNAUGHT S J,ASMAN C P,INJEYAN H,*et al*.. 100-kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array[C]. Proceedings of Frontiers in Optics 2009,Optical Society of America,2009.

[54] YANG P,XU B,LEI X,*et al*.. Correction of static and thermal aberrations of a zigzag slab amplifier employing a wavefront sensor-less adaptive optics system[J]. *Chinese Optics Letters*,2012,10(S24):S21409.

[55] 向汝建,何忠武,徐宏来,等. 固体板条MOPA激光光束质量主动控制[J]. 强激光与粒子束,2013,25(2):358-362.
XIANG R J,HE ZH W,XU H L,*et al*.. Closed-loop beam quality control for MOPA solid slab laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2013,25(2):358-362. (in Chinese)

[56] YANG P,WANG SH,DONG L ZH,*et al*.. Adaptive beam cleanup of a 1.3 kW pulsed slab amplifier[C]. Proceedings of CLEO:Science and Innovations 2014,Optical Society of America,2014.

[57] 于信.板条激光低阶像差自动校正技术研究[D].成都:电子科技大学,2018:1-14.
YU X. Research on automatic low-order aberration correction of slab laser[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2018:1-14. (in Chinese)

[58] 胡诗杰.全光路像差校正自适应光学技术和双变形镜自适应光学技术研究[D].成都:电子科技大学,2009:1-14.
HU SH J. The study of technology of the adaptive optics for all path aberration correction and double deformable mirrors adaptive optics[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2009:1-14. (in Chinese)

[59] 顾殿雨.反射式光束整形系统的低阶像差校正方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013:1-8.
GU D Y. Study on compensation of low order aberrations based on beam shaping system[D]. Changsha:National University of Defense Technology,2013:1-8. (in Chinese)

[60] 傅筱莹.板条固体激光器光束整形扩束系统设计研究[D].成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2015:1-14.
FU X Y. Research on beam shaping system design of slab lasers[D]. Chengdu:Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences,2015:1-14. (in Chinese)

[61] 郭建增,刘铁根,王振华,等.基于整形光路的低阶像差校正方法[J].强激光与粒子束,2012,24(8):1797-1800.
GUO J Z,LIU T G,WANG ZH H,*et al*.. Method for lower order aberration correction based on beam shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2012,24(8):1797-1800. (in Chinese)

[62] GOODNO G D,PALESE S,HARKENRIDER J,*et al*.. High average-power Yb:YAG end-pumped zig-zag slab laser[C]. Proceedings of Advanced Solid State Lasers 2001,Optical Society of America,2001.

[63] GOODNO G D,KOMINE H,MCNAUGHT S J,*et al*.. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Optics Letters*,2006,31(9):1247-1249.

[64] LI D J,MA ZH,HAAS R,*et al*.. Diode-pumped efficient slab laser with two Nd:YLF crystals and second-harmonic generation by slab LBO[J]. *Optics Letters*,2007,32(10):1272-1274.

[65] LI D J,MA ZH,HAAS R,*et al*.. Diode-end-pumped double Nd:YLF slab laser with high energy, short pulse width, and diffraction-limited quality[J]. *Optics Letters*,2008,33(15):1708-1710.

[66] LIU W G,ZHOU Q,FENG F,*et al*.. Active compensation of low-order aberrations with reflective beam shaper[J]. *Optical Engineering*,2014,53(9):096103.

[67] FLECK J A J R,LAYNE C. Study of self-focusing damage in a high-power Nd:glass-rod amplifier[J]. *Applied Physics Letters*,1973,22(9):467-469.

[68] XUE ZH W,GUO Y D,CHEN ZH ZH,*et al*.. Actively compensation of low order aberrations by refractive shaping system for high power slab lasers[J]. *Optics & Laser Technology*,2015,75:71-75.

[69] YU X,DONG L ZH,LAI B H,*et al*.. Automatic low-order aberration correction based on geometrical optics for slab lasers[J]. *Applied Optics*,2017,56(6):1730-1739.

[70] YU X,DONG L ZH,LAI B H,*et al*.. Automatic low-order aberrations compensator for a conduction-cooled end-pumped solid-state zigzag slab laser[J]. *Optics Communications*,2017,402:483-488.

[71] GRÉDIAC M. Method for surface reconstruction from slope or curvature measurements of rectangular areas[J]. *Applied Optics*,1997,36(20):4823-4829.

[72] DAI G M,MAHAJAN V N. Orthonormal polynomials in wavefront analysis:error analysis[J]. *Applied Optics*,2008,47(19):3433-3445.

[73] SUN W Q,CHEN L,TUYA W,*et al*.. Analysis of the impacts of horizontal translation and scaling on wavefront approximation coefficients with rectangular pupils for Chebyshev and Legendre polynomials[J]. *Journal of the Optical Society of America A*,2013,30(12):2539-2546.

[74] LAI B H,DONG L ZH,CHEN SH Q,*et al*.. Hybrid adaptive optics system for a solid-state zigzag master oscillator power amplifier laser system[J]. *Chinese Optics Letters*,2016,14(9):091402.

[75] YU X, DONG L ZH, LAI B H, *et al*.. Adaptive aberration correction of a 5 J/6.6 ns/200 Hz Solid-state Nd:YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2730-2733.

作者简介:

闫钰锋(1978—),男,吉林长春人,博士,副教授,博士生导师,主要从事精密仪器设计及光电检测方面的研究。E-mail:yanyufeng_cust@126.com

于 信(1988—),男,吉林四平人,博士,讲师,主要从事像差检测、校正及精密仪器设计方面的研究。E-mail:41213100@qq.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4 开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4;国内外公开发行,邮发代号:国内 12-140,国外 BM6782。

★ 荷兰 Scopus 数据库
★ 美国《乌利希国际期刊指南》
★ 美国《化学文献》
★ 波兰《哥白尼索引》
★ 俄罗斯《文摘杂志》
★ 美国工程索引(Ei)数据库
★ 美国 ESCI 数据库
★ 中国精品科技期刊
★ 中国科技核心期刊
★ 中国光学学会会刊
★ 中国科技论文与引文数据库
★ 中国期刊全文数据库
★ 万方数字化期刊全文数据库
★ 中国科技期刊数据库
★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版:《中国光学》编辑部
投稿网址:http://chineseoptics.net.cn
邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zggxcn@126.com
联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061
编辑部地址:长春市东南湖大路 3888 号(130033)