

高功率板条激光技术现状与发展趋势

王辉华, 林龙信, 叶 辛

(海军研究院, 北京 102442)

摘要: 作为非常典型的高功率固体激光器,“之”字光路板条激光在过去二十年取得了重要的进展,相继发展提出了高平均功率面泵浦板条放大器、多段掺杂板条、高亮度泵浦 Yb: YAG 板条等新技术。文章对板条激光的技术发展历程进行了回顾、分析和评述,包括它的设计原则、传输功率放大规律以及为了优化性能而产生的各种改进方法。在对板条激光功率定标能力进行一般性讨论基础上,针对性地分析讨论了提高输出功率和改善光束质量的技术发展趋势,预期高平均功率板条激光技术未来还有相当大的发展空间。

关键词: 板条激光; 高平均功率; 二极管泵浦

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190456

Status and development trend of high power slab laser technology

Wang Huihua, Lin Longxin, Ye Xin

(Naval Research Academy, Beijing 102442, China)

Abstract: As a typical high-power solid-state laser, high average power zigzag slab lasers achieved great progress in past two decades. Which fields got many innovations, such as face-pumped slab amplifier, multi-segment bonded slab structure, high-brightness pumped Yb: YAG slab amplifier and so on. This paper reviewed the technology progress of the slab lasers, including its design principles, transmission power amplification rules and various improvement methods for optimizing performance. On the basis of the general discussion on the laser power calibration capability of the slats, the technical development trend of improving the output power and beam quality was analyzed and discussed. It was expected that there will be considerable development space for high average power slab laser technology in the future.

Key words: slab lasers; high average power; diode pumping

收稿日期:2019-12-05; 修订日期:2020-02-20

作者简介:王辉华(1979-),男,高级工程师,博士,主要从事装备论证方面的工作。Email: racle@126.com

0 引言

近年来,电驱动二极管泵浦固体激光器(Diode pumping solid-state laser, DPSSL)的平均输出功率获得了极快的增长。连续波输出的固体激光器已经达到了 100 kW 量级,并且拥有很好的光束质量。这与近年来材料、加工、激光二极管(LD)泵浦源、可定标激光器设计和波前校正技术的进步密不可分。

顾名思义,固体激光的激光介质在受激辐射过程中不会流动,大量聚集的废热必须从表面散出,这通常会导致激光介质存在很大的温度梯度。此外,固体激光都一般采用光泵浦,所以要特别考虑泵浦源的选择以及泵浦光耦合到增益介质的光学条件。高平均功率固体激光器实质上是一个亮度增强器,即把低亮度泵浦光束转换成高亮度的激光输出,并由于热力学第二定律的约束伴随着总功率降低及废热的产生。因此,高平均功率固体激光器的设计主要需要考虑减小输出光束的热光畸变,从而使亮度尽可能提高。文中主要关注高平均功率固体板条激光技术,试图对板条激光的技术发展历程进行回顾、分析和评述,在此基础上,研究板条激光的未来可能功率定标途径。

高平均功率固体激光器基本上都是基于掺 Nd³⁺和 Yb³⁺的 YAG 材料^[1],这两种激活离子具有大的受激发射截面和吸收截面、以及长的上能级荧光寿命。而 YAG 基质材料具有良好的传导热学、力学和光学性质,并且允许较高的激活离子掺杂浓度。

高平均功率固体激光技术的发展一直聚焦在功率提升和光束质量因子的改善这两个主题上,而两者又是相互制约的^[2]:高功率泵浦负载下大量废热从增

益介质表面散出过程会产生温度梯度并引起热光畸变,恶化输出激光的光束质量。激光增益材料上的热负载决定了材料的热应力极限,从而限制了增益介质的尺寸和储能,最终限制了激光器的输出功率。因此高平均功率固体激光的技术发展基本上围绕热管理来展开的。在均匀泵浦和均匀冷却的理想无限长板条中,“之”字光路彻底消除了一阶热聚焦、应力双折射和退偏效应,很好地匀化了光束波前畸变。但是在工程实践中,有限宽度和长度的板条的边缘效应和端面效应都会产生畸变。这是由于在掺杂区/非掺杂区的交界处因冷却和泵浦吸收存在温度梯度,在此区域将形成一种局部的热透镜效应。这部分区域是不能进行激光提取的,而且会影响到泵浦—信号的交叠效率,进而影响到激光器的激光效率。在高功率泵浦下,板条仍然存在因有限宽度导致的边缘应力不均匀性所产生的退偏现象。在高储能高增益板条放大器中,放大自发辐射(ASE)会损耗反转粒子数密度和小信号增益,限制了激光材料的储能能力,也影响着激光效率和光束质量^[3-4]。非轴对称的板条不可避免会产生像散,使光束在两个垂直方有不同的光斑大小、光腰位置和波面曲率。为此需要在板条构型、光学结构设计、冷却结构、激光材料介质上做许多的革新。

1 板条激光技术发展历程

依靠激光在板条内走“之”字光路来解决板条大面冷却带来的本征光学畸变问题的思路是 1972 年 Martin 和 Chernock 首先提出的^[5]。传统的圆棒状激光增益介质在冷却过程中产生径向的温度梯度(图 1(a)),

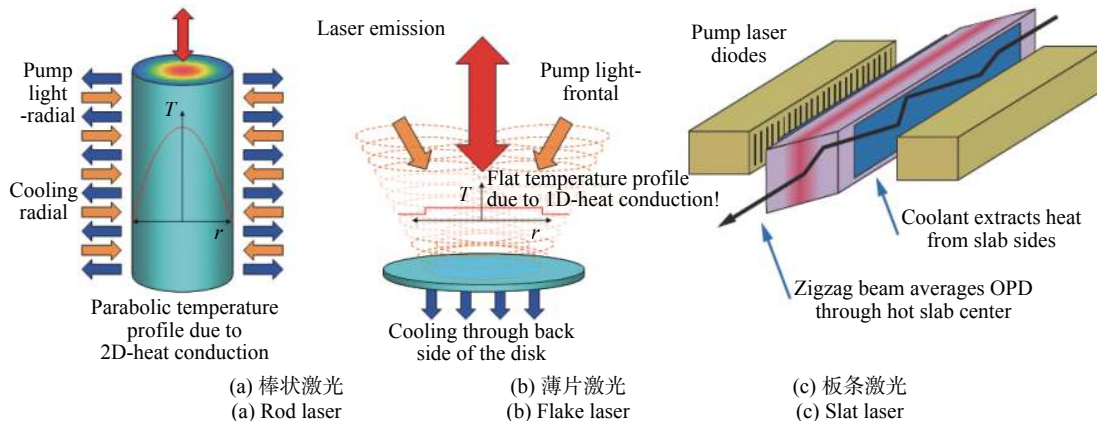


图 1 固体激光构型改变对热光畸变的改善

Fig.1 Improvement of thermo-optical distortion by solid laser configuration change

由此带来热透镜、应力退偏等热效应,最终导致输出功率下降,光束质量降低。为了降低固体激光中热畸变的影响先后发展出了薄片激光(图 1(b))和“之”字光路板条激光(图 1(c))。后两者的基本思想是在激光提取过程中,激光传播方向的某一方向分量与温度梯度方向重合;这样,光束波前在一阶近似的条件下,不会受到温度梯度的影响。在其后 30 余年,依靠对高亮度泵浦耦合、高效散热、以及端面形变等问题的逐步解决,板条激光首先突破了 100 kW 输出,并逐步成为高平均功率固体激光的代表性技术方案。现在其技术发展历程进行系统回顾是颇有教益的。

板条激光的发展早期,受制于闪光灯亮度的限制,主要采用双大面泵浦的方式来实现高功率泵浦(图 2(a)),这带来如下几个问题:(1) 受限于泵浦强度不足,常温下只能使用 Nd:YAG 作为增益介质;(2) 为透过泵浦光,板条的两个冷却面只能依靠水冷,其冷却能力有限;(3) 板条必须是高掺杂的,以实现泵浦光的有效吸收,对 Nd:YAG 板条这可能带来较严重的浓度淬灭效应^[6]。其后在 1985 年,Robbins 提出使用两块掺杂浓度相对较低的板条来提升泵浦吸收效率的思路(图 2(b))^[7],这是后来达信公司的高平均功率 ThinZag 谐振腔式板条激光增益模块的雏形^[8]。随后,Kuchar 在 1989 年提出将板条的两个大面焊接在金属热沉上,通过传导冷却来提高板条散热能力的思想(图 2(c))。显然,此结构下只能通过端面来耦合泵浦光^[9],那么板条端面由于吸收泵浦光后产热会产生形变,这严重影响到输出激光的光束质量。端面形变的问题最终在 2000 年通过在板条两端各键合一段无掺杂的 YAG 晶体得以解决(图 2(d))^[10]。必须指出,相对于面泵浦,端泵浦对泵浦亮度的要求高得多;2000 年以后,随着大功率 LD 的技术进步,高亮度泵浦源的问题也得以解决,这使得 Grumann 公司的研究人员在 2005 年利用主振荡器+放大器(MOPA)结构实现了 12.5 kW 激光输出,其放大链路包含 4 个放大模块,通过角度选通技术实现双通放大(图 3),以平衡各模块间的激光通量,实现相近的能量提取。2007 年,输出功率被进一步提升到 15.3 kW,电光转换效率 19.3%,采用自适应光学主动控制后光束质量达到 1.58 倍衍射极限,并最终在 2009 年通过 7 条 MOPA 链路的相干合成实现 105 kW 激光输出。

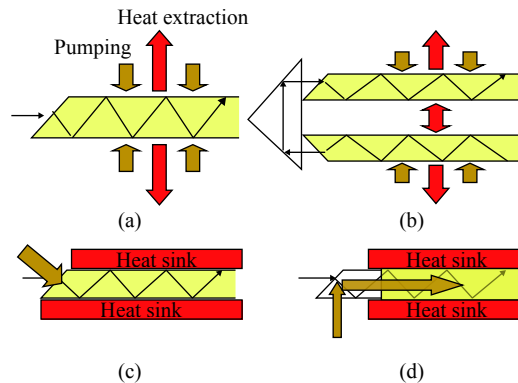


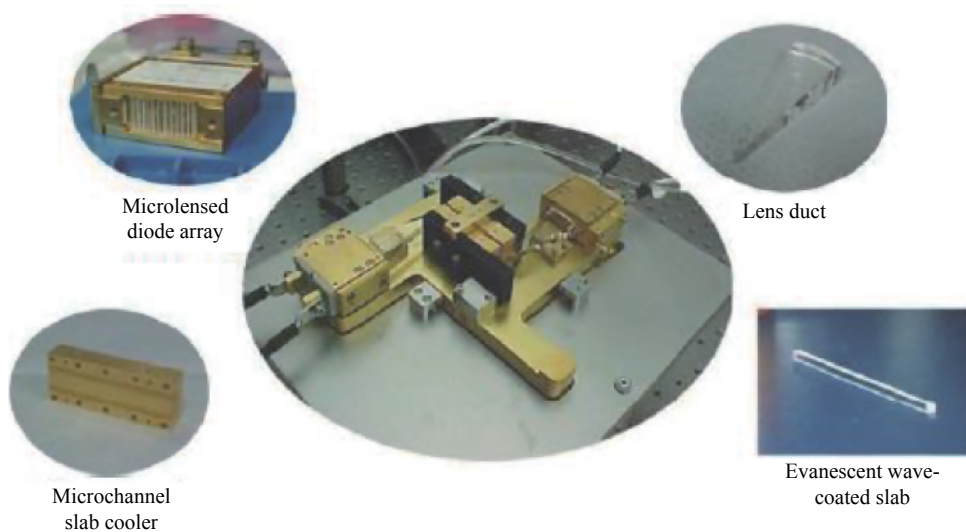
图 2 连续波泵浦板条激光技术的发展历程

Fig.2 Development process of continuous wave pumped slab laser technology

除面泵浦和端泵浦方案外,板条激光在其发展历史中还尝试过边缘泵浦方案^[11],但泵浦光沿板条宽度方向的指数吸收导致的温度梯度带来难以解决的光学畸变。它导致的热透镜效应随着激光的放大光程的增加变得越来越严重,所以现代高平均功率板条激光基本不采用边缘泵浦方案。

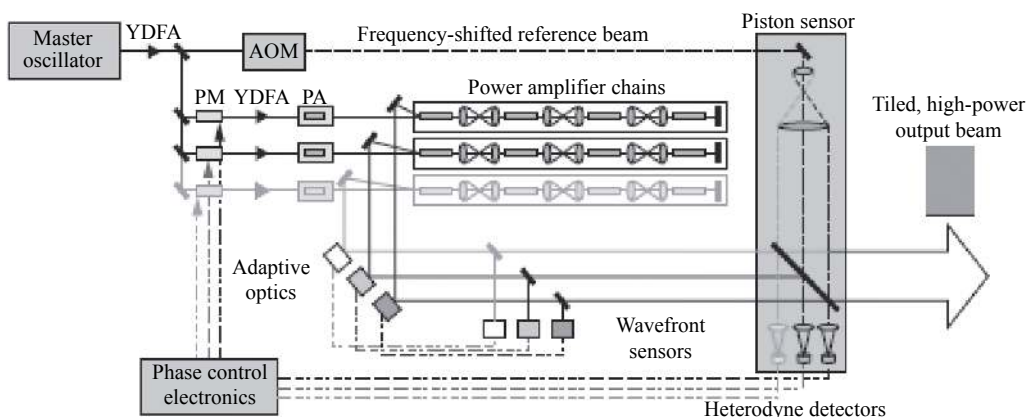
Grumann 公司的端泵浦板条采取了连续波(CW) LD 巴条阵列的泵浦模式。众所周知,在热负载相同的情况下,准连续(QCW)泵浦的固体激光拥有高得多的小信号增益,进而可以对介质内的储能实现更高效的激光提取,但 QCW 巴条发散角比 CW 巴条大得多。因此,高平均功率板条采用 QCW 模式工作时,很难通过端面耦合将足够高平均功率的 LD 泵浦光耦合进板条。参考文献 [12-13] 采取了单面泵浦、另一面传导冷却的方式(图 4)来平衡泵浦耦合和冷却需求;在泵浦匀化器和板条之间,进一步使用直接水冷的方式,以减小板条厚度方向的温度差异进而降低热应力。2014 年,使用单个 QCW 泵浦的大尺寸陶瓷板条实现 4.35 kW 输出^[14],光-光效率达到 43.6%,泵浦脉宽 200 μs,重复频率 400 Hz;2015 年,在 QCW 模式下实现 8.2 kW 输出^[15]。在 2016 年的 Photonics Asia 会议上,报道了 20 kW 以上的 QCW 板条激光输出,这是目前所公开报道的单板条放大链路的最高输出功率。

对 CW 泵浦板条和 QCW 泵浦板条的优缺点进行比较(见表 1),对于理解板条激光的技术特点是非常有帮助的。除了上述在泵浦耦合、热管理、以及小信



(a) 传导冷却、连续端泵浦板条增益模块和关键组成部分

(a) Conductive cooling, continuous-end pumped slab gain module and key components



(b) Grumann 公司 100 kW 板条激光示意图

(b) Schematic diagram of Grumann's 100 kW slab laser

图 3 Grumann 公司的 100 kW 级 CW 端泵浦传递冷却板条激光模块及 MOPA 链路结构。未变灰的部份表示两个放大链路的拷贝。YDFA: Yb 掺杂光纤放大器; PM: 相位调制器; AOM: 声光调制器; PA: 预放大器

Fig.3 Grumann's 100 kW CW-end pumped cooling slab laser module and MOPA link. The un-grayed parts represent copies of the two amplified links. YDFA: Yb doped fiber amplifier; PM: phase modulator; AOM: acousto-optic modulator; PA: pre-amplifier

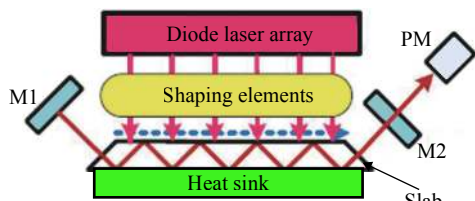


图 4 QCW 单面泵浦传递冷却板条激光模块

Fig.4 QCW single-sided pumped cooling slab laser module

号增益方面的差异外, QCW 面泵浦板条无需在两端键合无掺杂的 YAG, 这降低了其材料成本。但面泵浦的 Nd:YAG 板条为了提高吸收效率同时避免浓度淬灭问题, 其厚度不能太薄。那么受限于热应力, 它

主要依靠增加板条的横向尺寸来实现功率定标放大, 这又进一步增加了板条与热沉间单面焊接的技术难度。但端泵浦板条在沿板条长度方向的储能是不均匀的, 而其可承载的最高泵浦功率受限于键合面处的热应力。换句话说, 端泵浦板条未能充分利用其储能能力, 面泵浦方式对板条的储能能力则利用得更充分一些。最后需要指出, 板条激光放大器中放大的自发辐射 (ASE) 是由板条尺寸和饱和增益、而不是小信号增益决定的。因此 QCW 泵浦板条中的 ASE 并不比 CW 严重, 因为 QCW 放大器中激光的峰值功率很高, 进而将饱和增益抑制在一个较低的水平。

表 1 CW 端泵浦和 QCW 面泵浦板条激光特征对比

Operating mode	Advantage
CW end pump	LD bar has high average power, low quantity and low cost
	Low requirements on media size
	Thin slabs and high energy storage density
	No pulse drive power supply, the power supply is small
	Heat sink welding technology is less difficult
QCW surface pump	High small signal gain, high energy conversion efficiency
	No need to bond undoped YAG at both ends
	Uniform energy storage
	Thickness of the slab is relatively thick, and the diffraction loss between amplification stages is small
Brightness can be improved by coaxial non-coherent timing synthesis technology ^[16]	

2 板条激光技术发展趋势

任何固体激光器都可看做由数个增益模块和特定光学结构组成的。一个完整的增益模块部分通常包括增益介质、泵浦光源、泵浦耦合系统、热管理系统和辅助系统等。而光学结构主要是指为实现不同激光输出的功率放大结构、光束整形系统和光束合成系统等，例如典型的稳定/非稳定谐振腔结构、MOPA 结构、相干/非相干合束和自适应光学 (AO) 等。决定固体激光定标能力的是激光器中增益模块的储能损耗比。因此固体激光器的功率提升可以通过两条途径：一个是增加增益模块数目；另一个是增加单模块储能。

2.1 单模块输出与增益模块数量极限

单模块的最高储能受限于热效应、ASE、材料生长工艺等因素；而由于衍射/透射/散射/反射等因素的存在，激光损耗的绝对总功率随增益模块数目的增加而增加，但提取效率却随激光通量的增加而增加。这些因素耦合在一起，造成光-光效率随增益模块数目的变化曲线存在拐点。在此拐点之后尽管输出功率仍然可以增加，效率却开始下降。特别是激光通量非常高时，激光通过增益介质提取到能量不再能弥补其损耗，即激光不再被放大。这给出了输出功率的理论极限：

$$P_{\max} < \eta_o \eta_{st} \eta_{ext} P_{in} / \eta_d \quad (1)$$

式中： P_{in} 为单增益模块泵浦功率； η_o 、 η_{st} 、 η_{ext} 和 η_d 分别为泵浦耦合效率、Stokes 效率、能量提取效率和单

增益模块的总损耗。能量守恒则意味着增益模块数目最多为：

$$m_{\max} \leq \eta_o \eta_{st} / \eta_d \quad (2)$$

在功率提升时，光束质量将随着功率的提升迅速恶化，导致难以满足研究人员对高功率、高光束质量激光输出的需求。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。这要求激光在其光程上的累积热致像差不能有太大增加。如前文所述，固体激光材料中产生的废热决定了固体激光的输出亮度：首先，热负载产生的应力限制了激光材料的极限储能，反过来限制了激光功率定标的能力。其次，热光效应导致的光学畸变最终恶化输出激光的光束质量。最后，热效应产生材料表面形变和热致双折射与退偏振等同样恶化激光光束质量。

因此，板条激光的定标放大可以归结为：在保证光束质量条件下，增加单模块储能、提升光光效率、增加增益模块数。另外还可以通过光束合成方式实现功率定标，但其本质上是增益模块数目的增加，增益模块数量增加带来可靠性设计难度也将同步增加，这不在文中中展开论述。

2.2 提升单模块储能的技术途径

公式 (1) 决定了固体激光功率定标的理论极限。在激光效率一定的条件下可以通过提升单模块储能来实现固体激光输出功率的进一步提升。增加单模块储能主要有两种方式：一是增大介质尺寸；二是增加储能密度。

其中,增加介质尺寸是一种典型的功率提升方式。但是,板条的热应力限制了板条厚度和热负载功率密度,进而限制了板条储能的增加。此外,衍射损耗也是限制板条储能的重要因素,它主要由于厚度方向的衍射引起,依靠减小板条厚度、增加板条长度来提升储能却会导致衍射损耗的显著增加。因此,通过增加板条尺寸来增加单模块储能只能通过增加横向尺寸来实现。但是大尺寸高光学性能增益材料的生长/制备存在很大的难度。原理上高光学质量多晶透明陶瓷可以突破这种生长工艺的限制,美国 Textron 公司已在其 ThinZag 激光中成功使用了超大横向尺寸薄激光陶瓷。需要注意的是:增加板条横向尺寸还应计入热致累积像差、ASE 和寄生振荡等因素的影响。

除了增加板条尺寸外,可以通过增加板条的储能密度来增加单模块的储能。这里讨论的增加储能密度是指在板条尺寸和热负载等一定的前提下来提升板条的储能密度。因此,只有通过降低增益材料的产热和在热负载一定条件下提升泵浦密度和均匀性才可以实现储能密度的增加。

2.3 关于技术发展趋势的探讨

趋势 1: 采用多段变掺杂结构

图 5 中上图所示,普通双端泵浦单掺杂板条,受增益介质热负载均匀性制约,在一定泵浦吸收效率的前提下,其中心位置的储能密度是受限的。换言之,这种板条并未达到其极限储能能力。如果,板条分段键合而成,由两端低掺杂、中间高掺杂组成(如图 5 下图所示),则可有效发挥板条中间段的储能能力。2016 年,李密等^[17]利用多段掺杂板条,将单个板条模块的稳定腔功率从 3.8 kW 提高的 5.16 kW,表明利用多段变掺杂板条来提升激光输出功率的可行性。

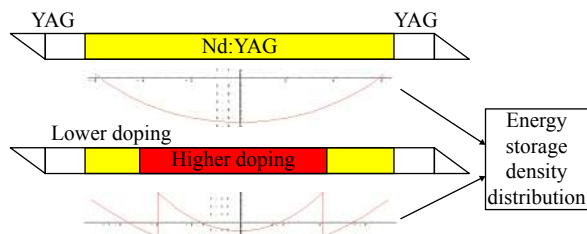


图 5 多段变掺杂板条(下)与单掺杂板条(上)的泵浦储能对比

Fig.5 Comparison of pump energy storage between multi-segment variable-doped slabs (bottom) and single-doped slabs (top)

必须强调,与单掺杂板条相比较,输出功率的提升与热负载的提升基本成线性比例关系,这也意味着热致光学畸变也是成比例的增加。考虑到光束质量控制难度,追求太高的输出功率很难保证光束质量。

趋势 2: 采用低产热增益材料

提高板条储能密度的最根本的方法是用低产热的增益材料,940 nm 泵浦的 Yb:YAG 只有 9% 的量子亏损,是首选材料。但室温下 Yb:YAG 晶体的激光过程体现出准三能级结构特征,这对泵浦亮度和信号光亮度都提出极高要求。如果在保证吸收的泵浦功率密度不变(进而热负载功率密度不变)的前提下提高泵浦亮度,只能减小吸收系数,进而减小掺杂浓度。换句话说,要实现高亮度泵浦只有两种方法:一是通过结构设计大幅度减小热应力,如 Yb:YAG 薄片那样;二是在热应力不变的前提下降低掺杂浓度,此时需要考虑如何保证对泵浦光的吸收效率。

对于连续泵浦板条激光而言,采用 Yb:YAG 作为增益介质具有良好的发展潜力。2001 年,Goodno 等人^[18]使用一个 3×2×60 mm 的连续端泵浦 Yb:YAG 板条,通过稳定腔实现了 415 W 激光输出,光光效率 30%。2016 年,Chen 等人^[19]使用 MOPA 结构,在一块泵浦区尺寸仅仅为 5×1.8×70 mm 的连续端泵浦 Yb:YAG 双掺板条中提取到 3.16 kW 的平均激光功率,光光效率 41%,展现出 Yb:YAG 板条激光的巨大潜力。2018 年,连续波 Yb:YAG 板条 MOPA 的输出功率已经达到 22.3 kW^[20]。

对于准连续泵浦 Yb:YAG 板条放大器,则存在两个问题:首先,由于高效提取对泵浦光强度有很高要求,不能再采用面泵浦方案。其次,由于 Yb:YAG 的荧光寿命较长,常温下粒子数反转阈值又较高;因此每个泵浦脉冲打开后,都需要一段时间来形成粒子数反转,然后在需要一段时间达到稳态提取,这段时间内的泵浦能量很大程度上都被浪费了。

2.4 关于光光效率的探讨分析

相较于数 kW 光纤激光的 80% 以上的光光效率, Yb:YAG 板条放大器约为 50%~55% 的光光效率还有较大差距。图 6 给出了一个典型 Yb:YAG 板条放大器从泵浦注入到激光放大的能量转化过程。将 Yb:YAG 板条与光纤放大器做对比,假设光纤的主放大器长度约为 20 m,则导致约 5% 的选模损耗,与板

条的衍射损耗相当, 到其 0.5% 左右的材料散射损耗, 比板条的散射损耗低很多; 此外, 光纤放大器中尾纤泵浦的电光效率比 LD 巴条约低 10%, 但模式交叠效率要高 12% 以上; 若两者泵浦吸收效率相当。那么光纤激光的高效率得益于很低的材料散射损耗、极高的提取效率和模场交叠效率。此外, 尽管两者的衍射损耗相当, 光纤放大器的注入信号功率相对泵浦加载功率的比率却比板条激光小得多, 这使得板条存在相对较大的绝对能量损耗, 进而降低了板条放大器的光光效率。再注意到固体材料的散射损耗很难降低到石英光纤的水平, 因此, 要进一步提升板条放大器的效率, 只能在提升泵浦—信号的模式交叠效率方面着力。

束质量控制能力, 其后在 2009 年通过相干合成使得固体激光的平均输出功率在历史上首次突破了 100 kW。近年来, 随着固体激光定标放大技术需求推动, 加快了准连续面泵浦板条放大器、多段掺杂板条放大器、高亮度端泵浦 Yb:YAG 板条放大器等新技术的发展。文中通过基本的物理分析, 指出了多段掺杂增益介质、低产热增益介质等技术途径与发展趋势。

最后, 简要对比一下板条放大器与其它两类也实现了较高平均功率的固体激光方案: Yb:YAG 薄片激光和分布式增益固体激光的技术差异, 后两者均采用大口径谐振腔的构型。2013 年, Boeing 公司宣布它们的 Yb:YAG 薄片激光达到了 30 kW 以上输出, 以及接近 30% 的电光转换效率。这种激光器中 Yb:YAG 的厚度约在 0.2 mm 左右, 必须采用非常复杂的多通泵浦耦合方式才能实现对泵浦光的有效吸收、同时满足 Yb:YAG 材料对高强度泵浦的要求。此外, 薄片激光由于单程增益长度不足, 只能采用振荡器而难以采用功率放大器方式实现储能提取; 而且, 因为焊接面是反射面, 薄片激光对焊接技术的要求极高。这些因素使得高平均功率薄片激光器的光束质量控制要远比板条激光难度大。2015 年, 通用原子公司宣布其分布式增益固体激光实现了 50 kW 输出, 其激光头体积仅仅 0.26 m³。该激光器的核心要点是通过折射率匹配的方式完全抑制模块间的插入损耗, 进而可以在增益模块插入很多块增益介质, 这意味着热负载可以分散到这些增益介质中, 进而允许大幅度增加增益模块的储能。但分布式增益固体激光中, 激光束需要通过很多层冷却流体。由于液体的热光系数比固体介质高两个量级, 冷却流体的温度扰动对光束质量的影响很大, 故此激光器对光束质量控制技术的要求非常高。故总体而言, 板条构型兼顾到了较高的泵浦储能、较长的增益光程、以及高效的激光提取能力。特别是其较长的增益光程允许使用 MOPA 结构, 这种结构对光束质量控制技术的要求远低于 Yb:YAG 薄片激光和分布式增益固体激光。因此可以预期高平均功率板条激光技术未来还有相当大的发展空间。

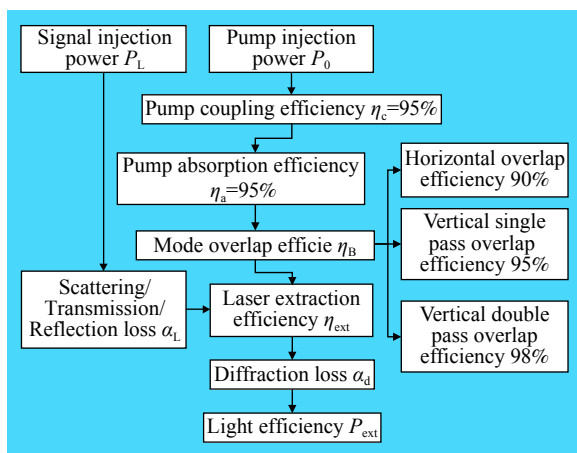


图 6 板条放大器中的功率转化流程

Fig.6 Power conversion process in a slab amplifier

3 结论

20 世纪 70 年代初期, 由 Martin 和 Chernock 发明的“之”字光路板条开启了固体激光发展史上一个新的模式。利用激光在增益介质内的传输光路设计来匀化一个方向上的温度梯度的思想是固体激光器功率定标放大的基石, 在过去 20 年, “之”字光路板条是固体激光器功率放大方面最常见的结构, 许多团队在此方向取得了重要的进展。文中对板条激光的技术发展历程进行回顾、分析和评述, 包括它的设计原则、传输功率放大规律以及为了优化性能而产生的各种改进方法。

自 Grumann 公司的研究人员发展出端面泵浦、传导冷却的键合板条技术后, 板条激光的输出功率快速从 kW 水平提高到 15 kW 以上, 并展现出优异的光

参考文献:

[1] Rutherford T S, Tulloch W M, Sinha S, et al. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers. [J]. *Opt Letter*, 2007, 26(13):

- 986-988.
- [2] Koechner W. Solid State Laser Engineering[M]. 6th ed. Berlin: Springer, 2006.
- [3] Sridharan A K, Saraf S, Byer R L. Zig-zag slabs for solid-state laser amplifiers: batch fabrication and ASE suppression issues [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(14): 3340-3351.
- [4] Eggleston J M, Frantz L M, Injeyan H. Derivation of the Frantz-Nodvikequation for zig-zag optical path, slab geometry laser amplifiers [J]. *Quantum Electron*, 1989, 25: 1855-1862.
- [5] Martin W S, Chernoch J P. Multiple internal reflection face-pumped laser:US Patent, 3633126 [P].1972-12-05.
- [6] Wang X J, Cai Z, Jiang J F, et al. Thermal unbalance by an amplified spontaneous emission absorber in an Nd:YAG thin-disk laser [J]. *Opt Letter*, 2010, 35(20): 3381-3383.
- [7] Robbins A G. Multiple host face-pumped laser: US Patent, 4528671[P].1985-07-09 .
- [8] Klimek D E, Mandl A. Power scaling of flashlamp-pumped Cr:LiSAF thin-slab zig-zag laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38: 1607.
- [9] Kuchar N R. Temperature control of a solid state face pumped laser slab by an active siderail:US Patent, 4852109[P]. 1989-07-25.
- [10] Injeyan H, Hoefler C S. End pumped zigzag slab laser gain medium:US patent, 6094297[P]. 2000.
- [11] Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K, et al. Edge-pumped quasi three level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36(2): 205-219.
- [12] Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, et al. Dielectric thermal analysis of high power solid slab laser with an output power of 11kW [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2807-2809. (in Chinese)
王超, 唐晓军, 徐臻婧, 等. 输出功率11 kW的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2807-2809.
- [13] Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, et al. Design and experimental study of 10 kW solid slab laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 7-10. (in Chinese)
高清松, 胡浩, 裴正平, 等. 10 kW级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 7-10.
- [14] Chen J, Li J, Xu J L, et al. 4350 W quasi-continuous-wave operation of a diode face-pumped ceramic Nd:YAG slab laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 63(63): 50-53.
- [15] Chen Z Z, Xu Y T, Guo Y D, et al. 8.2 kW high beam quality quasi-continuous-wave face-pumped Nd:YAG slab amplifier [J]. *Appl Opt*, 2015, 54(16): 5011-5015.
- [16] Xu J, Gao H, Xu Y, et al. A hybrid incoherent sequence combining of pulsed lasers based on refraction-displacement-pulsed-combining and polarization beam combining [J]. *Optics Communications*, 2013, 297: 85-88.
- [17] Li Mi, Hu Hao, Tang Chun, et al. Research on high power double doped slab laser technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 226-232. (in Chinese)
李密, 胡浩, 唐淳, 等. 高功率双掺杂浓度板条激光技术研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 226-232.
- [18] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, et al. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization. [J]. *Optics Letters*, 2007, 26(21): 72-74.
- [19] Chen X, Xu L, Hu H, et al. High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature [J]. *Opt Express*, 2016, 24(17): 24517-24523.
- [20] Wang D, Du Y, Wu Y, et al. 20 kW-class high-beam-quality CW laser amplifier chain based on Yb:YAG slab at room temperature [J]. *Opt Letter*, 2018, 26: 153-157.