

# 直接液体冷却薄片固体激光器研究进展

叶志斌<sup>1</sup>, 陈勇<sup>1</sup>, 涂波<sup>2</sup>, 王柯<sup>2</sup>, 尚建力<sup>2</sup>, 于益<sup>2</sup>

(1. 衢州学院电气与信息工程学院, 浙江衢州 324000; 2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621000)

**摘要:** 在 高能 固体 激光器 中, 通常 每 增加 一 片 增益 介质 都 要 增加 与 其 对 应 的 一 整 套 冷却 系统, 随着 高能 固体 激光器 功率 的 进 一 步 提高, 激光器 系统 体积 越 来 越 庞大, 并且 对 激光器 的热 管理 提出 了 越 来 越 高 的 要求。直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 因 其 优越 的 热 管理 及 非常 小 的 体积 输出 功率 比, 近年 来 成 为 新型 固体 激光器 研究 的 热点。本文 介绍 了 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 概念 的 提出, 阐述 了 该类 激光器 的 特性, 并 提出 了 该类 激光器 的 分类。分析 了 两类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 的 研究 进展 以及 在 获取 高 光束 质量 方面 的 技术 挑战。

**关键词:** 激光器; 薄片; 直接液体冷却; 冷却液

**中图分类号:** TN248.1    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.003

## Advances in direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser

YE Zhi-bin<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>1</sup>, TU Bo<sup>2</sup>, WANG Ke<sup>2</sup>, SHANG Jian-li<sup>2</sup>, YU Yi<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In high-energy solid lasers, a set of cooling system corresponding to each gain medium is usually added. With the further improvement of the power of high-energy solid lasers, the volume of the laser system becomes larger and larger, and higher and higher requirements are put forward for the thermal management of lasers. because of their excellent thermal management and very small volume output power ratio, direct-liquid-cooled thin-disk solid-state lasers have attracted considerable interests as novel laser sources. in the paper, the concept of direct-liquid-cooled thin-disk solid-state lasers is introduced, and the characteristics are presented, and the classification of such lasers is proposed. The latest progresses on two kinds of direct-liquid-cooled thin-disk solid-state lasers and the technical challenges in obtaining high beam quality are analyzed.

**Key words:** lasers; thin-disk; direct-liquid-cooled; coolant

### 1 引言

液体激光器具有固体介质储能密度高的特点, 同时又具有气体介质热管理方便的优势, 但此类液体激光器激活介质的上能级寿命通常较短, 通常难以实现高功率激光输出<sup>[1-4]</sup>, 并且该类激光器吸收谱线很难匹配半导体激光器的发射谱线。因此人们

又提出了将固体激光器中使用的各类稀土激活离子(如 Nd<sup>3+</sup>)溶解到液体中的新型液体激光器的方案。但为避免液体中轻质量原子导致的强烈荧光淬灭, 已知的能够溶解稀土激活离子的溶液大都具有腐蚀性, 并通常伴有毒性(如氢氧化硒), 给实际应用带来诸多不便<sup>[5-8]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 51605253); 浙江省自然科学基金项目(No. LY16E050011); 衢州市科技计划项目(No. 2016Y012); 衢州学院师资队伍专项经费项目(No. BSYJ201705)资助。

**作者简介:** 叶志斌(1989-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事高亮度固体激光器方面的研究。E-mail: 350491873@qq.com

**收稿日期:** 2018-11-12; **修订日期:** 2018-12-24

为解决上述问题,美国通用原子航空技术公司(GA-ASI)重拾 20 世纪七、八十年代所提出的“浸入”式激光器的替代解决方案。该方案将固体增益介质直接浸入到冷却液中,从而很好地解决了轻质量原子所导致的荧光淬灭的问题<sup>[9]</sup>,为与全固态激光器相区分,此类激光器有时仍被称为“液体激光器”。GA-ASI 通过使用 LD 代替闪光灯有效降低了冷却液的温度,进而通过减小增益介质厚度并增加介质数目在大幅降低固体材料所受到的热应力的同时保证了高功率输出的可行性,GA-ASI 称其为“分布式增益激光器”<sup>[10]</sup>,关于该类激光器的叫法仍然没有获得统一,有学者称其为“浸入式激光器”,但因其增益介质仍然是固体,液体只是起到冷却的作用,因此现在更普遍的叫法为“直接液体冷却薄片固体激光器”,本文后续也采用这种称谓。

## 2 直接液体冷却薄片固体激光器特征

在 高能 固体 激光器 中,尤其是 大口径 激光器 中,各类 激光器 最大的 不同 之处 在于 增益 模块 的 设计。而在 增益 模块 的 设计 中 最 重要 的 当 属 增益 介质 的 储能 以及 其 热 管理 方式,再 考虑 实际 应用 方面,其 体积 功率 比 也 是 要 着重 考虑 的 问题。前 文 提到 GA-ASI,他们 在 2002 年 提出 了 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器,其 装置 如图 1 所示<sup>[10-11]</sup>。将 多片 增益 介质 以 一定 的 角度 摆 放 在 冷却 器 中,冷却 液 直接 流 过 增益 介质 表面 实现 对 介质 的 换热,其 换热 方式 不再 是 传统 的 传导 冷却 方式,而是 强制 对流 换热,通过 控制 液体 的 流速 或者 选择 合适 的 流道 厚度 即可 实现 对 激光 增益 介质 的 有效 散热。同时,不再 像 传统 的 固体 激光器 每 增加 一片 增益 介质 都 需要 额外 增加 一套 冷却 器,整个 激光器 系统 十分 庞大。直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 中,一个 冷却 器 就能 实现 对 数片 乃至 数十 片 激光 增益 介质 的 换热,使得 整个 系统 非常 小巧 紧凑,便于 实现 轻量化 和 小型化 设计,这是 该类 激光器 一个 十分 突出 的 特点。并且 激光 透射 穿过 薄片,可以 很好 地 避免 像 普通 大口径 薄片 焊接 到 冷却 器 上 时 带来 的 表面 形变,以及 由 反射 式 提取 引起 的 光轴 漂移 等 诸多 问题。值得 指出 的 是,由于 通常 增益 模块 内 固液 界面 非常 多,在 设计 该类 激光器 时,必须 选择 合理 的 液体 使其 折射 率 和 增益 介质 的 折射 率 匹配 或者 采用 布鲁 斯特 角 设计,从而 降低 腔内 插入 损耗 对 输出 功率 的 影响。另外,由于 激光 会 穿过 流体,流

体 的 流动 以及 流体 的 热光 效应 所 引起 的 激光 波前 畸变 是 需要 重点 解决 的 问题。2008 年,GA-ASI 提出 采用 10 个 15 kW 的 增益 模块 串接 实现 150 kW 的 激光 输出,而其 总质量 不 超过 750 kg 的 计划。2015 年 4 月,他们 进一步 公布 了 研究 计划 的 最新 进展,第三代 激光 系统 成功 通过 了 美国 联合 技术 办公室 关于 输出 功率 和 光束 质量 的 测试,实现 了 激光 功率 输出 大于 50 kW,并在 30 s 运行 时间 内 保持 光束 质量 (BQ) 不变,这是 固体 激光器 报道 输出 功率 最高 的 计划 案例,然而 关于 激光器 的 具体 细节 及其 设计 并未 涉及。

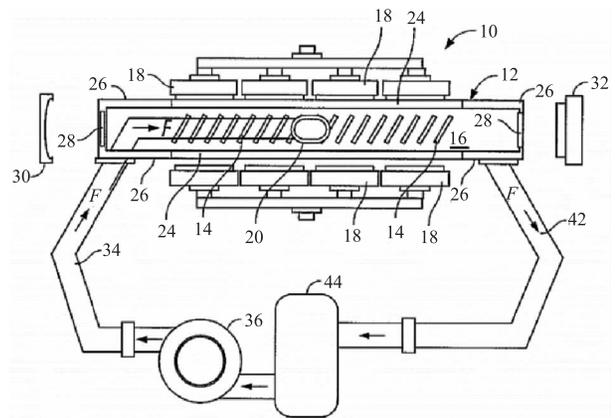


图 1 GA-ASI 公司提出的“分布式增益激光器”

Fig. 1 Laser containing a distributed gain medium proposed by GA-ASI

直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 根据 激光 与 薄片 的 夹角 情况,可以 分为 两类,一类 是 激光 垂直 穿过 薄片(下文 称 其为 第一类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器),另外 一类 是 激光 以 布鲁 斯特 角 穿过 薄片(下文 称 其为 第二类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器)。由于 第一类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器,其 冷却 液 流动 方向、抽运 光 传播 方向 和 激光 传播 方向 两两 垂直,薄片 的 装夹 比较 容易 实现,光路 的 设计 相对 比较 简单。下文 先 分析 第一类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 的 研究 进展,随后 再 分析 第二类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器 的 研究 进展。

## 3 直接液体冷却薄片固体激光器研究进展

### 3.1 激光垂直穿过薄片的直接液体冷却薄片固体激光器

第一类 直接 液体 冷却 薄片 固体 激光器,典型 的 是 2013 年 清华 大学 课题 组 以 单片 Nd:YAG 薄片 作为 激光器 的 增益 介质,采用 去离子 水 作为 冷却 液,将 增益 介质 直接 浸入 在 冷却 液 中,激光 垂直 于 薄片 在 腔内 振荡。最终,在 流速 2 m/s,抽运 功率 54.8 W

时获得 17.1 W 的输出,光光效率为 31.2 % ,其结构如图 2 所示<sup>[12]</sup>。增益模块由单一薄片,两个流道和两片石英窗口组成,为降低插入损耗,薄片和窗口都需要镀相对于水的特殊介质膜层来实现对激光的高透,冷却液体直接流过薄片的表面实现对介质的冷却散热。通过控制冷却液流速、抽运光功率以及改变抽运光斑位置研究了其对输出激光的光束质量和功率的影响。研究发现,在薄片端面,由于伴随微小的湍流成分,激光器输出功率和光束质量下降。而在薄片的中心层流区域,可以获得更高的输出功率和光束质量的。实验中,随着抽运功率的进一步提高,在湍流区,激光器甚至出现不出光的现象。上述实验验证了直接液体冷却薄片固体激光器的出光,同时也初步指出了湍流对激光器出光的影响。但这只是该类激光器实验上的一个很好的开端,光光效率、光束质量因子都是亟待解决的问题,同时激光器内只包含了一块增益介质,并未体现出直接液体冷却薄片固体激光器体积小优势。

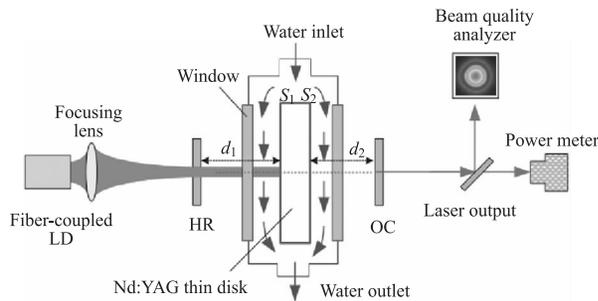


图 2 单片介质双流道直接液体冷却薄片固体激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of single medium double channels direct-liquid-cooled thin-disk solid-state oscillator

同年,该课题组分别从理论<sup>[13]</sup>和实验<sup>[14]</sup>上详细分析了直接液体冷却薄片固体激光器中湍流场对波前畸变的影响。图 3 是实验测量装置,其激光器部分与图 2 中一致,将 HeNe 光通过增益模块实现对波前畸变的测量,通过测量不同流动状态(不同流速,层流和湍流)和不同抽运状态下的波前畸变,指出在其装置中相对于层流场,湍流场是造成波前畸变的主要因素之一,在湍流场中模块的波前畸变量是层流场中的 2 倍以上。同时模块的波前畸变量可以很好的用泽尼克多项式里面的个别项表征出来,并对像差的起因进行了解释。在理论研究方面,他们采用大窝仿真(LES)模型对热流场进行建模分析,获得了实时湍流场对激光光束波前畸变的影响情况,如图 4 是湍流流

场波前畸变在 1~4 s 内的分布变化,湍流场对激光波前畸变的影响具有时间和空间的随机性。同时,研究结果显示,波前畸变主要发生在流场的热边界层,在流场的中心处,几乎不产生波前畸变量。同时,他们还对比了采用 LES 模型和采用基于雷诺平均模型在计算湍流场分析波前畸变上的区别,指出在分析湍流场造成波前畸变时,采用 LES 模型更具适用性。然而,在上述的流场对光束波前畸变的计算分析中,他们将薄片和冷却液两者分开独立分析,并未将流场和固体场耦合起来综合进行考虑,这和实际波前畸变情况必将产生一定的误差。

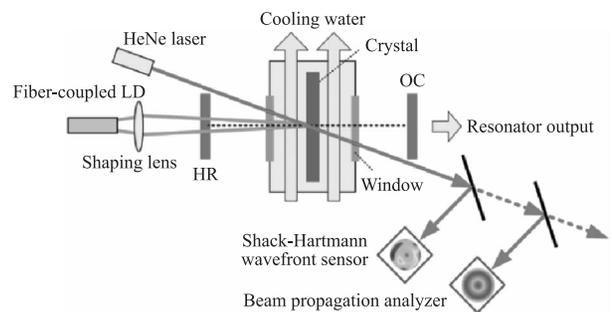


图 3 HeNe 光探测直接液体冷却薄片固体激光器的实验装置

Fig. 3 Experimental setup for HeNe detection of a direct-liquid-cooled thin-disk solid-state oscillator

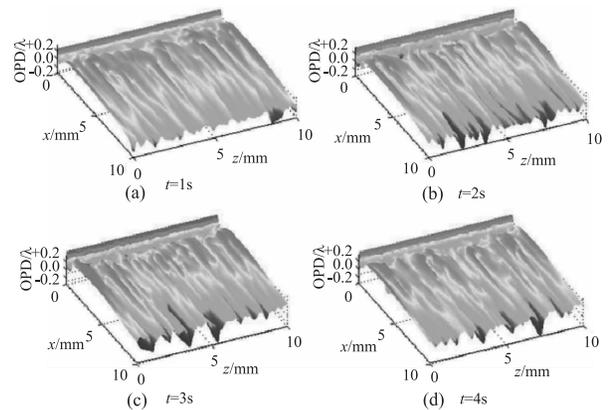


图 4 计算获得的 1~4 s 内二维波前畸变

Fig. 4 Calculated two-dimensional wavefront aberrations in 1~4 s

2016 年,本课题组采用 10 片不同掺杂浓度的 Nd : YLF 晶体作为增益介质,折射率匹配液作为冷却液,共同组成增益模块。通过设计耦合系统,获得均匀性 92 % 的抽运光,实验中研究了不同流速和不同输出反射率腔镜对激光器输出功率的影响,最终,采用稳定腔,在输出镜耦合输出率为 10 % ,流场平均流速为 5 m/s,抽运功率为 5202 W 时,获得 1.047 μm 线偏振多模激光输出 1120 W,光-光效率为 21.5 % ,

斜效率为 30.8%，实验装置如图 5 所示<sup>[15]</sup>。据我们所知，这是目前国内外所报道的第一类直接液体冷却薄片固体激光器平均输出功率的最高水平。

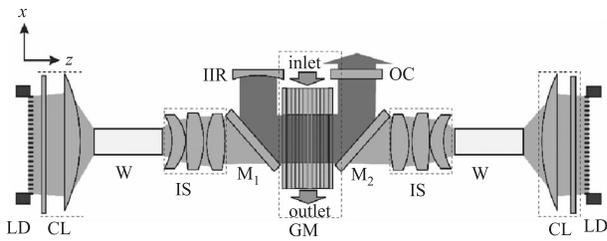


图 5 直接折射率匹配液冷却 Nd:YLF 薄片谐振腔实验装置

Fig. 5 Experimental setup of the direct-refractive index matching liquid-cooled Nd:YLF thin-disk resonator

### 3.2 激光以布鲁斯特角穿过薄片的直接液体冷却薄片固体激光器

第一类直接液体冷却薄片固体激光器虽然其在增益模块内部结构的设计及薄片装夹上比较方便，因为抽运光方向，激光方向，流场方向两两垂直，无需角度特殊的设计。然而为使每片薄片的抽运功率基本相同，薄片的掺杂浓度通常是靠近抽运光两端的浓度最低，向中间掺杂浓度逐渐升高。随着薄片数量的增加，对薄片掺杂的选择要求越来越高，很难满足要求。采用第二类直接液体冷却薄片固体激光器可以采用侧面抽运的方式，每片薄片的掺杂浓度都可以相同，无需设计。

2014 年，清华大学报道了 3 kW 的直接液体冷却薄片固体激光器装置<sup>[16]</sup>。增益介质采用 Nd:YAG 晶体，冷却液采用重水，抽运方式仍然采用端面抽运。为了提高晶体的热加载极限，晶体采用“软装夹”。最终，在抽运功率为 19960 W 时，获得激光输出功率 3006 W，光-光效率 15.1%，斜效率 21.2%。随着功率的进一步提升，2016 年本课题组报导了 7 kW 的直接液体冷却薄片固体激光器<sup>[17]</sup>，实验装置如图 6 所示。采用 20 片掺杂浓度相同的 Nd:YAG 晶体作为增益介质，重水作为冷却液，采用侧面抽运方式，抽运光在薄片以全反射的方式在薄片端面传输，激光则以布鲁斯特角穿过薄片，最终，在抽运功率为 24.9 kW 时，获得激光平均输出功率 7.48 kW，光-光效率 30%。这是目前国内外所报道的直接液体冷却薄片固体激光器采用单模块平均输出功率的最高结果。近年来，课题组也一直在从事非稳腔方面的研究，有望在获得高功率的同时获得优越的光束质量。

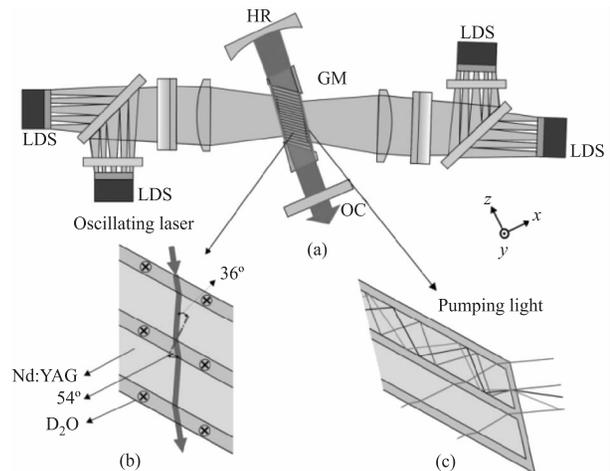


图 6 直接液体冷却侧泵 Nd:YAG 薄片激光谐振腔装置图

Fig. 6 Configuration of direct-liquid-cooled side-pumped Nd:YAG thin-disk laser resonator

在低功率方面，2014 年，西安光机所报道了采用准连续工作方式的直接液体冷却薄片固体激光器，其装置如图 7 所示<sup>[18]</sup>。2 片 Nd:YAG 薄片浸入在四氯化碳中并与振荡激光呈布鲁斯特角，抽运光通过薄片的两个大面进行抽运，四氯化碳溶液作为冷却液自下而上流过薄片表面对其进行冷却，整个增益模块的窗口进行了分区域镀膜，从而有效实现了抽运光最大程度的被增益介质吸收以及实现腔内激光损耗尽可能的低。在抽运能量 2.18 J，重复频率 1 Hz，脉宽 300 μs 时，采用稳腔获得了单脉冲能量 653 mJ 的激光输出，光光效率为 30%。然而四氯化碳有毒，因此装置必须充分考虑到液体的封装，以防止其泄露，同时，装置中仅包含了两片增益介质，体积功率比并不能降低。

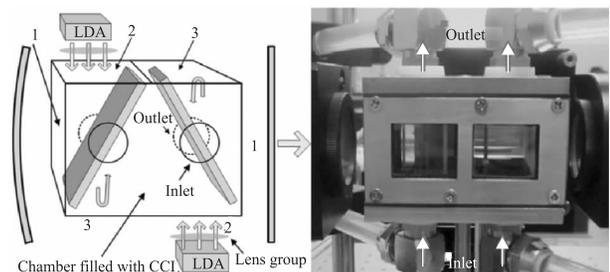


图 7 直接液体冷却 Nd:YAG 薄片激光谐振腔装置图

Fig. 7 Configuration of direct-liquid-cooled Nd:YAG thin-disk laser resonator

上述直接液体冷却薄片固体激光器都采用稳定腔作为输出，通常由于薄片口径比较大，菲涅尔数很大，因此激光器以多模运转，光束质量比较差，光束质量因子  $M^2$  通常大于  $10^{[12,16]}$ 。为了提高功率的同时

进一步获得高的光束质量输出,2015年,清华大学课题组采用非稳腔从理论上预测了实现31 kW功率连续激光输出,光束质量因子 $\beta < 2$ ,光-光效率26.1%<sup>[19]</sup>,装置如图8所示,为实现腔内高增益,将两个激光增益模块串接在非稳腔中,增益模块的设计与文献[16]相同。同时流场设计为层流,避免湍流场对光束波前畸变的影响。值得说明的是两个增益模块中流场的流动方向恰好是相反的,这样较好地补偿了单增益模块中固有的像差,实现了激光器中像差的自补偿,其补偿原理如图9所示。可以看到在流动方向上,采用双增益模块,波前畸变大大降低,尤其在中间区域,波前畸变量几乎为零。上述结果虽然未在实验中得到验证,但从理论分析来看,采用多增益模块串接,设计直接液体冷却薄片非稳腔激光器,获得高功率高光束质量激光输出的方案是可行的。

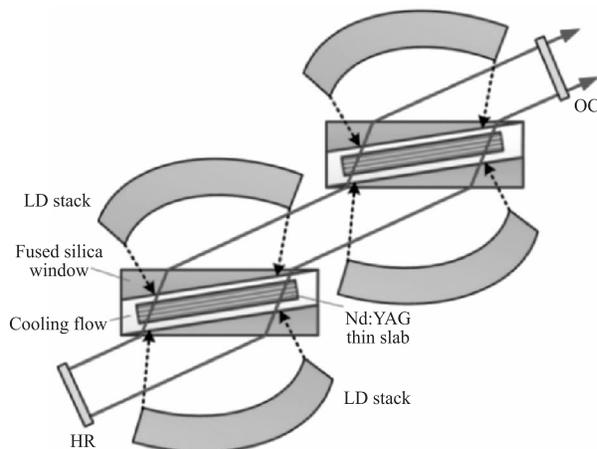


图8 包含两个流动方向相反双增益模块的直接液体冷却薄片固体激光振荡器的装置

Fig. 8 Configuration of direct-liquid-cooled thin-disk solid-state oscillator that has two same gain modules with opposite flow direction

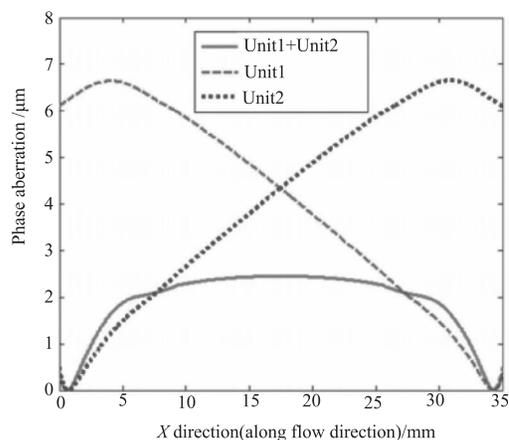


图9 延流动方向上的像差(单增益模块和双增益模块)  
Fig. 9 Phase aberration along the flow direction (single gain module and double gain modules)

## 4 结 语

直接液体冷却薄片固体激光器是一类新型的固体激光器。由于其优越的热管理,正逐渐受到研究人员的关注。目前,采用稳腔获得千瓦量级激光输出的技术已经比较成熟,采用非稳腔技术,获得高光束质量输出近年来也取得了一定的进展。然而由于激光穿过流场,当流场产生湍流时,必须对流场导致的激光光束波前畸变进行研究,从而对光束波前畸变进行补偿,以获得高光束质量的激光输出。而湍流场存在时间和空间的随机性,因此研究湍流场对光束波前畸变的影响仍然是直接液体冷却薄片固体激光器未来研究的一个重要方向。这也是采用直接液体冷却薄片固体激光器获得高光束质量输出的报道仍然非常少的重要原因。尽管如此,直接液体冷却薄片固体激光器因其体积功率比远远小于传统的固体激光器,因此有望超越传统的采用板条、薄片等作为增益介质的高能固体激光器,并在军事应用等方面发挥巨大潜力。本文回顾和总结了直接液体冷却薄片固体激光器的产生背景、发展以及今后的趋势和挑战,提出了直接液体冷却薄片固体激光器的两种分类方法,为从事直接液体冷却薄片固体激光器的研究提供了有价值的参考建议。

## 参考文献:

- [1] Schäfer F P, Schmidt W, Volze J. Organic dye solution laser[J]. Applied Physics Letters, 1966, 9(8): 306-309.
- [2] Snavely B B. Flashlamp-excited organic dye lasers [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8): 1374-1390.
- [3] Peterson O G, Tuccio S A, Snavely B B. CW operation of an organic dye solution laser [J]. Applied Physics Letters, 1970, 17(6): 245-247.
- [4] Soffer B H, McFarland B B. Continuously tunable, narrow-band organic dye lasers [J]. Applied Physics Letters, 1967, 10(10): 266-267.
- [5] Heller A. Liquid lasers-design of neodymium-based inorganic ionic systems [J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 1968, 28(1): 101-117.
- [6] Anikiev I G, Zhabotinskii M E, Kravchenko V B. Inorganic liquid lasers [J]. Moscow Izdatel Nauka, 1986.
- [7] Batyaev I M. Luminescence and lasing properties of neodymium-and uranium-activated inorganic laser liquids [J]. Journal of Applied Spectroscopy, 1997, 64(5): 620-632.

- [8] Batyaev I M, Kabatskii Y A, Mokhova E A, et al. Luminescence and lasing properties of  $\text{SOCl}_2\text{-GaCl}_3\text{-Nd}^{3+}$  inorganic laser liquids [J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1989, 50(4): 394 – 397.
- [9] Ryan R E. Glass bead laser amplifier with phase conjugate mirror; U. S. , 4803439 [P]. 1989 – 2 – 7.
- [10] Perry M D, Banks P S, Zweiback J, et al. Laser containing a distributed gain medium; U. S. , 7366211 [P]. 2008 – 4 – 29.
- [11] Perry M D, Banks P S, Zweiback J, et al. Laser containing a distributed gain medium; U. S. , 6937629 [P]. 2005 – 8 – 30.
- [12] Fu X, Liu Q, Li P, et al. Direct-liquid-cooled Nd : YAG thin disk laser oscillator [J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(3): 517 – 521.
- [13] Li P, Fu X, Liu Q, et al. Analysis of wavefront aberration induced by turbulent flow field in liquid-convection-cooled disk laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(8): 2161 – 2167.
- [14] Fu X, Liu Q, Li P, et al. Wavefront aberration induced by beam passage through a water-convection-cooled Nd : YAG thin disk [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055704.
- [15] Ye Z, Liu C, Tu B, et al. Kilowatt-level direct-'refractive index matching liquid'-cooled Nd : YLF thin disk laser resonator [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1758 – 1772.
- [16] Fu X, Li P, 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.
- [17] Wang K, Tu B, Jia C, et al. 7kW direct-liquid-cooled side-pumped Nd : YAG multi-disk laser resonator [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 15012 – 15020.
- [18] Nie R Z, She J B, Zhao P F, et al. Fully immersed liquid cooling thin-disk oscillator [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(11): 115808.
- [19] Fu X, Liu Q, Li P, et al. Numerical simulation of 30 kW class liquid-cooled Nd : YAG multi-slab resonator [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18458 – 18470.