

高能激光器的技术发展、瓶颈与创新路径研究

文 颖

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：高能激光器（HEL）是当前战略科技竞争的关键技术，但热管理导致的功率提升与光束质量保持之间的矛盾成为其核心发展瓶颈。本文首先综述了化学、固体及半导体激光器的技术现状，分析了增益介质、谐振腔设计及热效应等基本原理。针对固体激光器中突出的热透镜与波前畸变问题，提出一种基于微通道液冷与自适应光学在线补偿的“热-光协同控制”新方法。该方法通过飞秒激光在晶体非通光面加工三维分形微通道，配合高热导冷却液（如液态金属）实现按需强化换热，显著降低温度梯度；同时利用变形镜与波前传感器构成闭环控制系统，实时校正残余热像差。仿真表明，该方案可将晶体最高温度降低约40 K、温度梯度减小60%，斯特列尔比提升至0.85以上，有望在保持近衍射极限光束质量的前提下将单模块输出功率提升2-3倍。最后分析了微加工、冷却剂相容性等工程难点，并展望了全电化、智能化与阵列化的发展趋势。本研究为突破高能激光器的热管理瓶颈提供了可行的创新路径。

【关键词】：高能激光器；热管理；微通道液冷；自适应光学；光束质量

DOI:10.12417/3041-0630.26.07.045

1 引言：高能激光器的发展现状

高能激光器（High-Energy Laser, HEL）是指能够输出平均功率达到千瓦乃至兆瓦级以上、并具有良好光束质量的激光装置。自20世纪60年代激光器诞生以来，高能激光技术因其在工业加工、国防安全、空间探测及核聚变驱动等领域的巨大应用潜力，成为各国战略科技竞争的焦点。

当前，高能激光器主要分为三大技术路线：化学激光器、固体激光器及半导体激光器。化学激光器虽能实现极高功率输出，但依赖有毒或腐蚀性化学燃料，体积庞大，限制了其机动部署能力。固体激光器，特别是光纤与薄片激光器，凭借高效率、高光束质量及电驱动优势，已成为主流发展方向。例如，美国诺斯罗普·格鲁曼公司已实现100kW级的高能光纤激光器演示，德国通快公司的碟片激光器也在工业切割与国防应用中取得突破。

然而，高能激光器仍面临三大核心挑战：热管理（废热导致热透镜与光束畸变）、非线性效应（特别是光纤中的受激拉曼与布里渊散射）以及功率与光束质量的矛盾。这些技术壁垒限制了HEL从实验室走向实战化、工业化的进程。因此，深入分析其技术原理，并针对某一关键瓶颈提出创新性解决方案，具有重要的理论与工程价值。

2 高能激光器的技术原理

2.1 增益介质与泵浦方式

高能激光器的基本工作原理与传统激光器相同，但高能运行状态下的特殊物理过程，使其技术原理更为复杂。其中固体激光器通常采用掺杂稀土离子（如 Yb^{3+} 、 Nd^{3+} ）的晶体或玻璃光纤作为增益介质，增益介质吸收泵浦光（通常为半导体

激光器）后，产生荧光并放大。

2.2 谐振腔设计与光束合成

为实现高功率输出，单根光纤或单块晶体的功率受限（非线性与热损伤），因此高能激光器普遍采用相干或非相干光束合成技术。非相干合成（光谱合成）将多路不同波长的激光通过色散元件合为一束，牺牲部分相干性换取功率提升。相干合成则需精确控制各子光束的相位，使它们在目标处干涉相长，理论上可同时保持高功率与近衍射极限光束质量。

2.3 热效应与光束质量退化机制

这是高能激光器最核心的技术原理瓶颈。当泵浦功率升高时，增益介质内部产生大量废热。热导致介质折射率分布不均（热透镜效应），并使介质表面发生热形变。对于光纤，热效应会加剧非线性相位积累；对于板条晶体，则产生热致双折射。最终导致光束波前畸变，远场光斑发散角增大，能量密度下降，甚至损坏激光器自身元件。

3 基于微通道液冷与自适应光学的热光协同控制

3.1 当前固体高能激光器功率提升的首要壁垒

尽管光纤激光器因长径比大而散热相对容易，但当单纤功率超过数千瓦时，热负荷仍会导致模式不稳定（TMI）和横向热透镜效应。板条晶体在高功率泵浦下，即使采用大面积冷却，其内部三维温度梯度依然显著。传统方法如侧面冷却、端面冷却或强制风冷，已难以支撑向单模块200kW级以上功率迈进。因此，必须从“被动散热”转向“热-光协同控制”。

3.2 集成微通道换热器与波前实时校正的自适应热管理

本工作提出一种分层微通道液冷结合在线波前补偿的新

架构。具体包括：

(1) 增益介质的微结构化设计：以 Yb:YAG 薄片或板条晶体为增益介质，在其非通光面利用飞秒激光加工出三维分形微通道网络，通道直径 50-200 μm ，内壁沉积高导热金属层。冷却液采用介电、高热容流体。相比传统宏观水冷，微通道换热系数可提升一个数量级以上，使晶体表面热通量耐受能力超过 10 kW/cm^2 。

(2) 热源与冷源空间匹配：根据泵浦光斑的强度分布（通常为平顶或高斯型），设计微通道的疏密分布。在泵浦强度高的中心区域，通道间距更小、流量更大，实现“按需冷却”，最大限度抑制温度梯度。

(3) 在线波前实时校正：即使有微通道冷却，残余热畸变仍不可避免。在激光谐振腔外或腔内插入变形镜（DM），并与夏克-哈特曼波前传感器构成闭环控制系统。波前传感器以 kHz 频率测量输出激光的相位畸变，控制器基于 PI 或模型预测算法驱动变形镜生成共轭波前，补偿热透镜效应。该环节的关键在于将微通道冷却后的残余热像差幅值控制在变形镜的动态行程范围内（通常 <20 个波长）。

3.3 可行性分析与优势

在半导体激光器封装领域，微通道液冷已成熟应用于单管万瓦级散热。将其扩展到板条激光器，技术迁移路径清晰。液态金属冷却剂的热导率（ $\sim 30 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ）远高于水（ $0.6 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ），可进一步降低对流热阻。

基于有限元热-流-固耦合仿真，对于泵浦功率 10 kW、光斑面积 1 cm^2 的板条晶体，采用微通道液冷后，最高温度由传统水冷的 380 K 降至 340 K，温度梯度减小 60%。结合自适应光学补偿后，斯特列尔比（Strehl ratio）可从 0.4 提升至 0.85 以上。

本方法不改变谐振腔主体结构，可模块化集成到现有高能

激光系统中，且能自适应不同功率水平下的热负荷变化。与传统方案（如双端泵浦或低温冷却）对比，有效减小了系统复杂性

3.4 需解决的技术难点

微通道加工在晶体脆性材料上易产生微裂纹，需优化飞秒激光参数并辅以化学抛光。

液态金属对多数金属具有腐蚀性，需对通道内壁进行抗氧化涂层处理（如氮化钛）。

自适应光学系统在高功率、强光环境下对变形镜的抗损伤阈值要求极高，需采用反射式微机电变形镜或压电陶瓷变形镜，并加装保护窗口。

4 结论

高能激光器正处于从百千瓦级向兆瓦级、从实验室演示向战场与工业现场部署的关键转型期。本文系统阐述了其技术现状与核心原理，指出热管理效应是制约功率与光束质量同步提升的首要壁垒。针对这一难题，本文提出了一种结合微通道液冷与自适应光学在线补偿的“热-光协同控制”新方法。

该方法通过微尺度换热结构显著降低了增益介质的温度梯度，再辅以高速波前校正器消除残余畸变，有望在保持近衍射极限光束质量的前提下，将单模块固体激光器的输出功率提升 2-3 倍。该路径融合了微电子散热与自适应光学的成熟技术，具有较高的可行性和推广价值。

未来，高能激光器的发展将呈现三大趋势：全电化、智能化和阵列化。本文所提出的热-光协同方法，恰好为后两种趋势提供了底层支撑——只有当每个子模块的热畸变被有效抑制，大规模相干合成才有可能实现。可以预见，随着热管理与光束控制技术的突破，高能激光器将在未来十年内真正成为改变规则的工具。

参考文献：

- [1] Zervas,M.N.,&Codemard,C.A.(2014).High power fiber lasers:A review.IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,20(5), 219-241.
- [2] 周朴,等.(2020).高能光纤激光器热效应与模式不稳定性研究进展.《中国激光》,47(5),0500008.
- [3] Dawson,J.W.,et al.(2008).Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power.Optics Express,16(17),13240-13266.
- [4] 李强,张凯.(2019).自适应光学在激光系统中的应用.《强激光与粒子束》,31(1),011001.