

# 高亮度固体激光器技术发展研究

唐晓军, 王钢, 刘娇, 耿林, 姜东升

(华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘要:** 激光推进、激光传能等重大科研方向对高亮度固体激光器技术提出了重大需求, 使得相关研究持续成为国际关注焦点。本文阐述了高亮度固体激光器技术的宏观需求, 梳理国内外的技术研究现状并总结发展趋势, 凝练技术进一步发展所面临的问题; 据此完成高亮度固体激光器的关键技术分析, 并结合国情提出未来发展建议。板条激光器和光纤激光器由于具有突出优点成为研究热点, 在单台激光器输出功率不断提升的同时, 可配合光束合成方法来实现高亮度激光输出。研究表明, 应着重推动新型激光材料、高端半导体激光泵浦源、高精度封装工艺、自适应光束控制、光束合成关键器件等方面的技术攻关, 尽快形成核心技术体系; 科学布局以表层增益板条激光器技术为代表的、具有良好发展潜力的固体激光器技术研究课题, 加强共用基础技术与积淀, 为未来固体激光器输出亮度、转换效率、功率质量比的持续提升奠定坚实基础。

**关键词:** 固体激光器; 高亮度; 技术路线; 关键技术

**中图分类号:** O437   **文献标识码:** A

## Development of High Brightness Solid-State Laser Technology

Tang Xiaojun, Wang Gang, Liu Jiao, Geng Lin, Jiang Dongsheng

(Key Laboratory of Science and Technology on Solid-State Lasers, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Laser propulsion, laser energy transfer, and other major research directions have proposed a major demand for high brightness solid-state laser technology, making relevant research remain the focus of international attention. This paper presents the macro demand for high brightness solid-state laser technology and summarizes the current situation of technology research in China and abroad, its development trend, and the problems for further development. Based on this, the key technologies of high brightness solid-state lasers are analyzed, and some suggestions are proposed for future development. The slab laser and fiber laser have become the focus of research owing to their outstanding advantages. While the output power of a single laser is constantly improving, the laser output with high brightness can be realized using the beam combination method. Key technologies should be promoted to form a technical system as soon as possible, such as new laser materials, high-ranking semiconductor laser pump source, high precision packaging process, adaptive beam control, and key components for beam combination. It is proposed to establish research projects for the solid state laser technology that is represented by the surface gain slab laser technology and has a good potential for development. The research and accumulation of common basic technologies should be strengthened to lay a solid foundation for the continuous improvement of output brightness, conversion efficiency, and power mass ratio of solid-state laser in the future.

**Keywords:** solid-state laser; high brightness; technical route; key technology

收稿日期: 2020-03-28; 修回日期: 2020-05-18

通讯作者: 唐晓军, 华北光电技术研究所研究员级高级工程师, 研究方向为固体激光技术; E-mail: txj0012@vip.sina.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国激光技术与应用 2035 发展战略研究”(2018-XZ-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

### 一、前言

高亮度激光技术是指高功率、高光束质量的激光产生、传输与控制技术，高亮度固体激光器技术特指以固体材料为增益介质的激光产生技术。随着工业加工、国防装备等领域对高功率、高光束质量激光的需求持续加大，高亮度固体激光器因其潜在的经济和军事价值而吸引着学术界和工程界的研究兴趣与探索热情。

从增益介质构型的角度来看，高亮度固体激光器主要分为板条、薄片、光纤等类别。板条激光器和光纤激光器因其突出优点而成为高亮度固体激光器领域的热点研究方向。板条激光器技术最早实现了百千瓦级高亮度激光输出，经过一段时间的技术沉淀，近期陆续实现了新的技术突破。光纤激光器技术单纤受限于物理极限，输出功率止步于数十千瓦量级（2013年实现最高单纤20 kW输出），而合成技术进一步提升了输出功率。

本文从高亮度固体激光器的宏观需求出发，梳理国内外具有代表性的、体现前沿水平的高亮度固体激光器技术及其发展趋势，提出实现兆瓦级以上功率激光输出的优选技术路径，针对领域发展瓶颈论证关键技术及其攻关路径，还就我国高亮度固体激光器领域的未来发展提出对策建议。

### 二、高亮度固体激光器技术宏观需求

#### 1. 激光推进

传统的航天发射依赖大型运载火箭。由于化学推进剂的能量密度不高，使得运载火箭的质量构成以推进剂为主要方面，相应入轨有效载荷占比仅为1.5%左右、发射成本高达10000美元/kg。作为未来新的航天发射方式，激光推进利用激光与工质相互作用产生的等离子体爆炸气团来进行驱动，有效载荷占比可达15% [1]，估算发射成本较常规方式可降低两个数量级；同时由于采用非含能工质，航天发射的安全性显著改善。根据激光推进的工程应用设想 [2]，采用平均功率为350 MW的脉冲激光器，可以将1000 kg有效载荷发射至近地球轨道。

#### 2. 激光无线能量传输

激光具有单色性好、方向性强、能量集中等突出特征，可以较高效率将光能远距离地传输到配备

有光电转换器件的用电设备上，从而实现无线能量传输。激光作为载体进行能量传输，所需设备的体积和质量仅为微波类设备的1/10，且不干扰微波通信信号。无人机、微型飞行器、微型卫星、空间探测器、无线传感网络等移动负载对新型能源供给方式提出迫切需求，因而激光传能应用潜力巨大。

#### 3. 激光器军事应用

利用定向发射的高能激光光束持续聚焦在目标表面来摧毁目标或使之失效，这是激光器军事应用的重要方面。这类应用模式具有打击无延迟、作战成本低、反应速度快、附带损伤小、抗电磁干扰能力强、兼顾软硬杀伤等独特优势。常规战场打击火力密度和效能不足的问题较为突出，而激光器军事应用有望改变传统火力交战模式，被视为改变未来战争形态和作战概念的颠覆性技术。

### 三、高亮度固体激光器技术发展现状

#### （一）国外发展现状

##### 1. 板条激光器

板条激光器采用薄板状结构增益介质，激光激射在增益介质长度方向，而散热在增益介质厚度方向，由此实现高功率、高能量连续或脉冲激光输出，光束质量优良。2009年，美国诺斯罗普·格鲁曼公司发布了7路传导冷却端面泵浦板条（CCEPS）相干合成激光输出的实验结果：输出功率为105.5 kW，光束质量BQ因子小于3，电光转换效率达19.3%，从零到满负荷输出的时间仅为0.6 s，累计运行时间超过85 min [3,4]。这一实验成为高亮度固体激光器发展的里程碑。2010年，美国达信公司发布了有关定向能武器（J-HPSSL）的阶段性研究进展，在浸入式板条（ThinZag）激光的单孔径实验室中获得了平均功率超过100 kW的输出 [5]。

##### 2. 薄片激光器

薄片激光器的增益介质为片状结构，散热和激光传输均在增益介质厚度方向，因而散热路径短、通光孔径大，可实现高功率、高能量的连续或脉冲激光输出。2012年，美国波音公司集成了德国Yb:YAG薄片技术，通过多个碟片组合获得了功率为30 kW的激光输出，电光效率大于30%；主要技术指标达到了耐用电子激光器倡议（RELI）第一阶段

要求, 后续开展 50~100 kW 激光器系统研制 [6]。美国通用原子-航空系统公司提出技术方案: 将数十至上百片的薄片激光介质直接浸入冷却液中, 使用亚微米尺度的流体通道来进行激光介质的高效散热冷却; 2010 年实现了单模块 60 kW 功率输出, 2015 年实现两模块 150 kW 功率输出, 完成了基于相关技术途径的 800 kW 功率输出概念设计 [7]。

### 3. 光纤激光器

光纤激光器以可柔性操作的掺杂光纤作为增益介质, 光束质量优良、电光效率高 (约 40%), 易于散热、可靠性好、适装性强。单纤激光功率输出存在上限 (理论值为数万瓦), 需要通过相干/偏振/光谱/色谱/空间等多种合成方式来实现更高功率输出。美国 IPG 公司 2009 年获得了 10 kW 功率的光纤激光输出; 2012 年采用 1018 nm 泵浦并基于主振荡功率放大器 (MOPA) 结构实现了 17 kW 功率 1075 nm 激光输出, 光光转换效率达到 94%, 输出光纤纤芯直径为 50  $\mu\text{m}$ , 输出光束质量  $M^2$  因子为 2; 2013 年实现了单纤 20 kW 功率的激光输出 [8]。美国洛克希德·马丁公司 2015 年采用光谱合成的方式实现了高光束质量激光输出, 合成功率达到 30 kW; 2017 年实现了 60 kW 级的光纤光谱合成光源样机; 2019 年实现了 150 kW 级光纤光谱合成激光输出 [9]。

## (二) 国内发展现状

目前, 我国高亮度固体激光器技术的研究集中在板条和光纤两方面。

### 1. 板条激光器

我国在 20 世纪 90 年代开始了板条激光器技术的研究。中国电子科技集团有限公司第十一研究所 2008 年采用 MOPA 结构实现了功率为 11 kW 的板条激光输出 [10], 这是国内首次实现万瓦以上激光输出; 2018 年利用表层增益板条单模块双程放大方式实现了功率为 2.6 kW 的激光输出 [11]。2018 年, 中国工程物理研究院应用电子学研究所采用分段掺杂板条获得功率为 20 kW 的激光输出 [12]。2019 年, 中国科学院理化技术研究所采用常规大尺寸板条在低温深冷条件下获得功率为 60 kW 的激光输出 [13]。

### 2. 光纤激光器

关于高功率光纤激光器, 国内较多机构开展

了深入研究, 在基础理论和工程技术方面形成了良好积累。中国工程物理研究院激光聚变研究中心 2017 年设计了 976 nm 直接单端抽运的单纤激光系统, 采用全国产光纤材料和光纤器件实现了单纤激光系统的 10.6 kW 功率输出 [14]; 2018 年采用长距离分布式侧面泵浦技术, 基于 MOPA 结构实现了最大功率为 11.23 kW 的稳定激光输出, 其斜率效率为 82.5% [15]。2017 年, 清华大学采用单一种子源, 通过双向泵浦结构和增益光纤长度控制实现了 3.9 kW 功率的拉曼激光输出, 光束质量  $M^2$  因子为 1.49 [16]; 国防科技大学基于时域稳定种子源和 1018 nm 激光同带泵浦技术, 实现了单纤万瓦级功率输出, 光束质量  $M^2$  因子为 1.86 [17]。2019 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所利用自主研发的大模场双包层增益光纤和无源器件, 采用双端抽运技术实现了 10.14 kW 输出功率; 中心波长为 1070.36 nm, 3 dB 光谱带宽为 5.32 nm, 主放大级最大光光转换效率为 87.8%, 斜率效率为 89.2% [18]。

## 四、高亮度固体激光器技术发展趋势

### (一) 技术路线梳理

#### 1. 从激光器技术特点角度

目前, 实现输出功率 100 kW 以上的激光器技术路径主要是光纤激光器、板条激光器、浸入式液冷薄片激光器, 其他技术路线距离实际应用仍有一定差距。

光纤激光器方面, 单纤激光功率输出存在上限, 需通过相干/偏振/光谱/色谱/空间等多种合成方式实现更高功率输出, 目前主要有普通线宽、窄线宽两种技术路线。

板条激光器方面, 单链路输出功率可以很高, 并且可以通过相干/偏振/光谱/时序等合成方式来实现更高功率输出, 但与光纤激光相比可靠性略差、热管理较为复杂。

浸入式液冷薄片激光器方面, 虽然可以解决高能激光器增益介质废热过于集中的问题, 但由于激光通过冷却液体传输、液体热光系数比固体高两个数量级而带来液体折射率分布不均匀现象, 严重影响输出激光的光束质量, 且电光效率也比较低。

光纤激光器在可靠性、热管理和平台适装性等方面具有优势, 但由于单纤输出功率受限, 实现兆

瓦级激光输出的难度很大。目前，板条激光器的兆瓦级功率输出关键技术已获得突破，在保证光束质量的前提下，有望比光纤激光器更早、更容易实现兆瓦级以上的功率输出应用。

2. 从激光器研发实践角度

梳理国内外各种技术路线（见图1和图2），可以获得以下初步技术判断：①在数十千瓦输出功率等级内，对于高光束质量、连续输出、对激光光谱线宽无特殊要求的情况，光纤激光技术因其效率高、可靠性高、适装性好而具有比较优势，有望更早实现工程应用；在100~200 kW输出功率等级内，光纤激光技术在高光束质量、高可靠性方面的优势仅能勉强保持；在300 kW以上输出功率等级内，光纤激光技术已经不符合高亮度的基本要求，光束质量也难以保证。②相对而言，以板条和薄片为代表的块状固体激光技术，对于数十千瓦至数兆瓦范围的功率需求，在连续体制、脉冲体制、激光线宽压窄要求等方面均有高功率高光束质量输出的技术方案；但光路设计复杂、空间分立元件较多，高效率和高可靠的激光产品技术攻关周期会有所加长。

(二) 发展趋势

(1) 光纤激光技术难以满足300 kW以上高亮度输出功率应用要求，以板条和薄片为代表的块状固体激光技术是实现兆瓦级以上功率输出的优选途

径（见图3）。

(2) 新型大尺寸增益介质的研究进展，如高质量激光晶体/陶瓷可以大幅度提升单增益模块的输出功率，为单路激光器功率持续提升提供了重要支持。

(3) 为了提升固体激光器的亮度、转换效率、功率质量比、功率体积比等性能，根本性的措施有：通过合成提升亮度，通过增益介质深冷来提高亮度和效率，进行增益模块结构创新设计。

五、高亮度固体激光器发展面临的挑战

激光的亮度与功率成正比关系，与光束质量 $M^2$ 因子的2次方成反比关系，可以通过提高功率、改善光束质量这两种途径来提高激光的亮度。由于受到“热效应”的影响，光束质量随着功率的提升呈下降趋势，最终导致激光亮度并没有按预期随着激光器功率的提升而增加，甚至造成激光亮度的下降。为此，高亮度固体激光器在发展过程中需着力解决以下方面的技术挑战。

(1) 增益介质是实现增益模块高功率的核心部件。单口径激光器输出功率的提升，面临着高功率激光放大器模块难以兼具高光学质量、高光学精度、耐受高热流密度等性能特征的难题。如无法攻克这一问题，固体激光器的输出能力将受到严重制约。

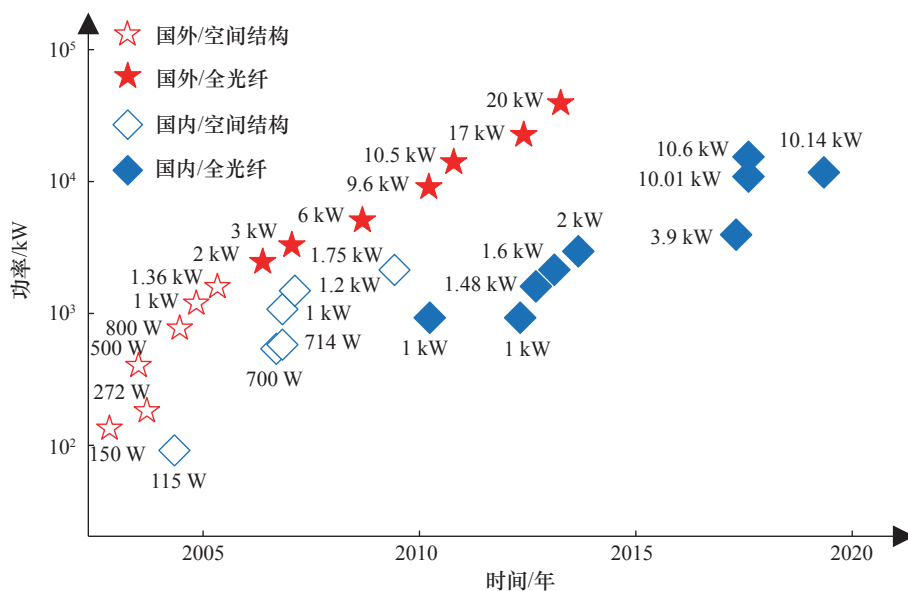


图1 单纤输出光纤激光器发展情况

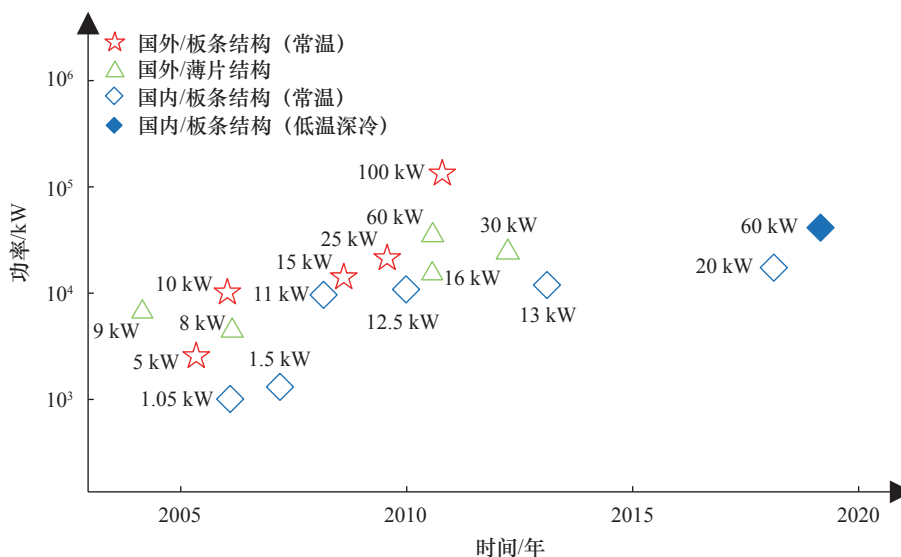


图2 以板条和薄片为代表的块状结构单口径固体激光器发展情况

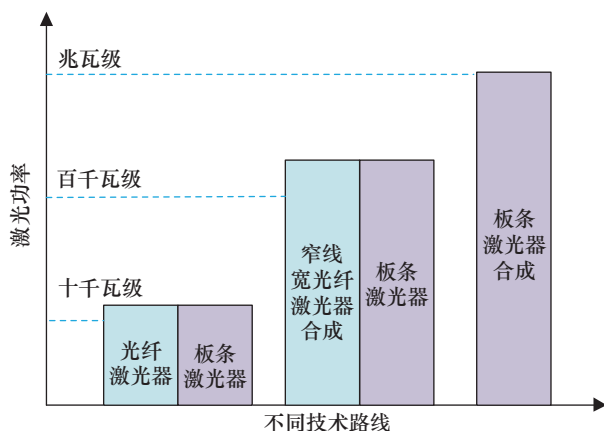


图3 不同技术路线固体激光器的输出能力比较

(2) 高亮度固体激光器对于泵浦光的均匀性有着极高要求，而高功率激光二极管泵浦源因其固有的结构特点，面临着光束发散角较大且水平/垂直方向不一致、光束强度分布不均匀等难题。这对固体激光器的输出功率和光束质量构成了明显约束。

(3) 激光增益模块在工作时产生的大量废热需要及时处。如果废热无法被及时、均匀地冷却而累积在增益介质中，将引起增益介质的热应力和热畸变，进而严重影响激光器的输出功率和光束质量。

(4) 随着输出功率的不断提升，固体激光器面临的热效应因素趋于突出，输出激光所含像差随着功率提升而逐渐增加，甚至超出了用于激光光束净化的自适应光学系统的空间分辨率与像差校正能力极限，进而造成像差无法校正的结果。

(5) 半导体激光泵浦技术促成了固体激光器的高效率和高亮度输出，引领了激光领域的技术变革。由于介质的非线性效应、热损伤等物理机制研究不够透彻，在当前技术状态下的单台激光器平均亮度仍然受限。

## 六、高亮度固体激光器关键技术分析

开展百千瓦到兆瓦级高亮度固体激光器的全链路技术和工艺研究，着力突破高性能增益介质材料、高功率密度泵浦耦合、高热流密度散热控温、强光传输抗损伤、波前调控、光束合成等关键技术，为未来兆瓦级高亮度激光输出及工程应用奠定技术基础。

### 1. 高性能增益介质结构设计、制备与测试

增益介质结构决定了固体激光器的核心性能，引导了泵浦耦合、散热控温等基础性设计方向。为实现高亮度激光输出，增益介质结构应具有高的增益和低的波前畸变，亦即满足高功率高效率均匀泵浦耦合、高热流密度散热、高功率激光传输、高非线性阈值等性能要求。

对于表层增益板条设计，涉及研究内容包括：掌握不同构型增益介质的吸收、增益、散热特性，开展泵浦、冷却结构的选型设计，分析结构设计参数的可调节范围，结合工艺可实现性提出结构设计方案。对于在用的增益介质结构方案，按照加工工艺要求全面开展要素分析，通过建模优化寻求最佳

结果；建立相关激光放大运转的数学模型，通过实验修正仿真结果；通过多次迭代形成不同功率等级的功率放大增益介质结构设计优化方案。

### 2. 高功率密度泵浦光场分布设计与控制技术

针对高功率激光二极管泵浦源、高集成度泵浦耦合光学组件开展研究，着力突破泵浦光高效高功率耦合及匀化技术，具体包括：激光二极管的高效高功率输出、阵列输出激光的线宽控制、发散角控制、高密度堆叠，泵浦耦合光学组件的高效变换、集成化、波导化设计等。

激光二极管泵浦源由于其固有的结构特点导致应用领域和范围较窄，不同的应用场合需要激光二极管具有不同的输出光斑与光场。应重视输出光束的准直与整形研究，利用多种工程分析软件来开展各类半导体激光器的建模仿真，形成提高输出光束质量的先进设计方案。

### 3. 高热流密度传导冷却技术

具体包括散热热沉设计与加工、增益介质与热沉的均匀热接触、低应力封装等，涉及热场分析、流场仿真、热沉结构应力场分析、验证环境搭建等技术环节。相变换热热沉、纳米尺度热界面材料制备等也是有价值的前沿方向。低应力、低热界面空洞率的真空焊接封装技术是板条增益介质激光器的核心技术。

对于增益模块的高热流密度传导冷却，主要采用微通道换热技术。相关研究的重点有：微通道结构优化设计、微通道结构加工工艺改进、冷却剂选择优化、各类参数（通道截面形状和高宽比、微通道内的摩擦系数、不同冷却剂等）对微通道内流动和散热性能的影响等。

### 4. 波前调控技术

输出激光的光束质量是高亮度固体激光器的核心指标，对于激光光束净化的自适应光学系统在空间分辨率与像差校正量方面提出了极高要求。探索构建多变形镜组合的自适应光学系统，利用处于相位共轭位置的多个不同类型的波前校正器，分别对像差中最适合校正的分量进行补偿，从而将不同类型的波前校正器优势予以有机整合来优化自适应光学系统的时间和空间特性。开展自适应光学系统实时处理子系统的架构与性能研究，掌握大单元数自适应光学系统的适应性边界，有效压缩实时处理时延以提升自适应光学系统闭环速度。

### 5. 激光合成技术

合成技术是实现固体激光器输出功率定标放大的有效途径，用于克服固体激光器单孔径输出功率增加受限于增益介质尺寸的制约，实现高平均功率、高光束质量的固体激光输出。相关研究的重点有光谱合成、相干合成、时序合成等。

在光谱合成方面突破窄线宽且具有特定频谱的激光器子束、性能好且损伤阈值高的色散元件、高集成度的密集组束等技术。在相干合成方面研究激光器子束单频（优于兆赫兹线宽）特性控制、高精度波前控制、多路初相位同步控制、高集成度的密集组束等技术。在时序合成方面攻关脉冲体制激光器子束、高抗光损伤、高稳定性的合束器件等技术。

## 七、对策建议

### （一）加强探索性研究，注重技术创新

研究建立高亮度激光器技术评估体系，加强领域技术预见、研判和跟踪研究。坚持问题导向，把握技术发展趋势，在可能引发高亮度固体激光器技术变革的颠覆性技术方面提前布局，扎实开展前瞻性基础研究，尤其要重视增益介质结构创新的特殊波导、表层增益等新体制激光技术。对于原创性强、尚未形成共识的探索性研究给予必要的支持，鼓励科学家自由探索、勇于攻克前沿科学难题，力争在原创理论和原创发现方面取得突破，以技术创新引领高亮度固体激光器领域的重大进展。

### （二）实施重大项目部署，突破关键技术

以国家未来重大需求为出发点，依据领域发展战略规划，立足固体激光器材料和器件技术领域已经取得的良好基础，设立并实施新一代高亮度固体激光器技术重大科技项目，在高平均功率且高峰值功率输出以及高频谱功率密度输出的激光器技术方向积极布局。同时，针对我国高亮度激光器技术发展的迫切需求和薄弱环节，找准技术突破口并凝练主攻方向，充分发挥国家级基础研究基地的仪器设备和人才优势，力争突破一批关键共性技术和前沿引领技术，尽快实现高亮度固体激光器的工程应用示范，为科技强国建设和智慧社会发展提供有力支撑。

### (三) 加强国际交流, 建立高水平人才队伍

多类渠道布局, 鼓励与国际知名的激光技术研究机构建立起经常性的学术交流机制和科研合作关系。加强激光技术人才培育和梯队建设, 创造有利于优秀青年人才成长的客观条件, 培养造就一批具有国际视野和较高水平的战略科技人才、科技领军人才、青年科技人才和技术创新团队。

#### 参考文献

- [1] 张凌. 固态工质激光推进的机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学(博士学位论文), 2008.  
Zhang L. Mechanism Investigation of laser propulsion with solid propellant [D]. Hefei: University of Science and Technology of China (Doctoral dissertation), 2008.
- [2] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. *Astroautics and Aeroautics*, 1972, 10(5): 74–76.
- [3] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]. San Jose: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2009.
- [4] McNaught S J, Asman C P, Injeyan A, et al. 100-kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array [C]. San Jose: Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest, 2009.
- [5] 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.
- [6] Selinger M. Boeing fires new thin-disk laser, achieving solid-state laser milestone [EB/OL]. (2008-06-03) [2019-10-01]. [http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080603a\\_nr.html](http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080603a_nr.html).
- [7] Wilmington M A. Textron defense systems awarded funding for the DARPA HELLADS Program [EB/OL]. (2008-10-03) [2019-10-01]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/hellads.html>.
- [8] Jeong Y C, Boyland A J, Sahu J K, et al. Multi-kilowatt single-mode ytterbium doped large-core fiber laser [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, 13(4): 416–422.
- [9] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-berthelemot A, et al. Power scaling of fiber lasers with all-fibre interferometric cavity [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(14): 692–693.
- [10] 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.  
Wang C, Tang X J, Xu L J, et al. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2807–2809.
- [11] 李宁, 张伟桥, 刘洋, 等. Yb:YAG表层增益板条激光放大器的研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1–5.  
Li N, Zhang W Q, Liu Y, et al. Yb:YAG surface gain slab laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1–5.
- [12] 唐淳. 高能固体激光系统光束质量主动校正技术 [C]. 成都: 第四届大气光学及自适应光学研讨会, 2019.  
Tang C. Active beam quality control technology for high energy solid laser system [C]. Chengdu: The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics, 2019.
- [13] 郭亚丁. 高能固体激光自适应光学光束质量控制 [C]. 成都: 第四届大气光学及自适应光学研讨会, 2019.  
Guo Y D. Beam quality control technology for high energy solid laser system [C]. Chengdu: The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics, 2019.
- [14] 林宏玺, 唐选, 李成钰, 等. 全国产单纤激光系统获得10.6 kW激光输出 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 329.  
Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. Home-made single-fiber laser system achieved 10.6 kW laser output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 329.
- [15] Lin A X, Zhan H, Peng K, et al. 10 kW-level pump-gain intergrated functional laser fiber [C]. Hangzhou: 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2018.
- [16] 巩马理, 闫平, 肖启榕. 高功率光纤激光器技术与未来 [C]. 威海: 先进高功率高能激光技术与应用研讨会, 2017.  
Gong M L, Yan P, Xiao Q R. High power fiber laser technology and future development [C]. Weihai: Seminar on Advanced High Power High Energy Laser Technology and Application, 2017.
- [17] 刘泽金, 周朴, 马鹏飞. 大功率光纤激光研究进展与分析 [C]. 威海: 先进高功率高能激光技术与应用研讨会, 2017.  
Liu Z J, Zhou P, Ma P F. Research progress and analysis of high power optical fiber laser [C]. Weihai: Seminar on Advanced High Power High Energy Laser Technology and Application, 2017.
- [18] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化10 kW光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 415–417.  
Chen X L, Lou F G, He Y, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. *Acta Optical Sinica*, 2019, 39(3): 415–417.