

## 浅论强激光系统的物理受限问题

张小民<sup>1\*</sup>, 胡东霞<sup>1</sup>, 许党朋<sup>1</sup>, 王静<sup>2</sup>, 程鑫彬<sup>3</sup>, 刘军<sup>4</sup>, 韩伟<sup>1</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 李明中<sup>1</sup><sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;<sup>2</sup>上海交通大学物理与天文学院激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240;<sup>3</sup>同济大学物理科学与工程学院, 精密光学工程技术研究所, 上海 200092;<sup>4</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 输出能力和光束质量是研制强激光装置时追求的两个核心性能,通常受制于增益能力、光束品质、热负载、功率负载、通量负载受限条件。对于具有不同应用目标、不同运行机制、不同技术途径的强激光装置或系统,5类受限条件对输出能力和光束质量的影响权重是不同的。其中,解决增益能力与光束品质两类受限问题是研发连续强激光和脉冲强激光装置的共性问题;对于连续(或准连续)强激光,破解热负载受限是核心问题;对于脉冲强激光,破解功率负载受限是核心问题。深入研究5类受限机理、基本规律及相互之间的影响关系,融合近期发展的新材料、新方法、新技术,对积极推进以高峰值功率、高能量(高平均功率)和高重复频率激光(简称“三高激光”)为基本特征的先进强激光装置或系统具有积极意义。

**关键词** 激光技术;强激光;增益能力;光束品质;热负载;功率负载;通量负载

中图分类号 O437 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1201002

## 1 引言

单脉冲峰值功率不小于  $10^{11}$  W 的高峰值功率激光(HPL)、持续时间内激光平均功率不小于 10 kW 或能量不小于 10 kJ 的高能量激光(HEL)这两类强激光装置<sup>[1]</sup>因在国家安全、前沿科技和国民经济等重大领域具有广泛应用,一直是激光技术与工程领域研究的主攻方向,装置或系统的总体规模与性能已成为一个国家在强激光领域综合实力的集中体现和典型标志。图 1 是强激光技术与工程发展现状与趋势示意图<sup>[2]</sup>,左下方区域涉及的各类中小功率激光器已广泛应用于工业制造、光电对抗、激光通讯、医疗卫生等多个领域。

I 区所示为国际现役或规划研发的高峰值功率激光装置,这类强激光装置采用“主振荡器+放大器(MOPA)”总体技术途径,通过增大光束口径,数十年来逐步提升激光脉冲峰值功率或平均功率,为实验室内开展高能量密度物理实验研究提供了不可或缺的研究手段。最终目标是研发能单脉冲运行、输

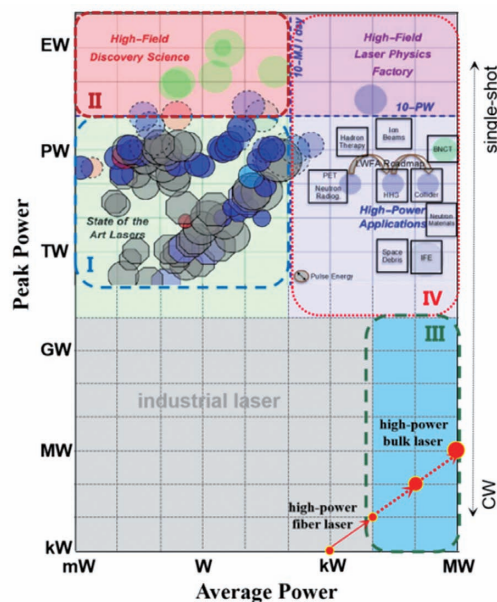


图 1 强激光技术与工程发展现状与趋势<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Status and trends for the development of high-power, high-energy lasers<sup>[2]</sup>

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-05-05; 录用日期: 2021-05-08

\* E-mail: zhangxiaomin@caep.cn

出能力为数兆焦耳能量/数百太瓦(TW,  $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ )、面向聚变点火的高峰值功率激光装置(下文简称“高功率激光”),其典型代表是美国 Livermore 国家实验室(LLNL)于 2007 年建成的国家点火装置(NIF)<sup>[3]</sup>、法国在建的兆焦耳装置(LMJ)及已投入运行的中国神光系列装置<sup>[4]</sup>。

II 区所示是在高功率激光发展基础上,借助啁啾脉冲放大(CPA)技术发展的超强超短激光装置,其峰值功率可达到拍瓦(PW,  $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$ )以上。1985 年,Strickland 等提出了 CPA 的基本概念<sup>[5]</sup>,有效缓解了长期制约超短激光脉冲放大的能量抽取效率偏低及非线性受限两大难题,大幅度提升了脉冲激光峰值功率,是高能量密度物理等前沿科学研究开拓疆界的利器<sup>[6-7]</sup>,已成为欧盟、美国、中国等在前沿科学领域竞相角逐的重大方向。其中,在皮秒激光领域,典型装置有美国 LLNL 的皮秒 Petawatt 装置<sup>[8]</sup>、日本大阪大学 GEKKO XII 激光装置<sup>[9]</sup>及中国神光 II 皮秒拍瓦装置<sup>[10]</sup>;在飞秒激光领域,典型代表有欧洲 ELI 极端光强设施<sup>[11]</sup>、中国工程物理研究院激光聚变研究中心的 CAEP-5PW 装置<sup>[12]</sup>、中国科学院张江“羲和”激光装置<sup>[13]</sup>、中国科学院物理所的钛宝石 PW 装置<sup>[14]</sup>、韩国先进光子学研究所的 4.2 PW 钛宝石激光装置<sup>[15]</sup>、日本量子科学技术研究所的 J-KAREN-P 装置<sup>[16]</sup>、德国马克斯-普朗克研究所(MPI)的高重复频率拍瓦场诊断装置(PFS<sup>[17]</sup>)及美国 Rochester 大学在建的 EP OPAL 装置<sup>[18]</sup>。超强超短激光发展的终极目标是实现激光脉冲峰值功率为  $10^{18} \text{ W}$ (EW)、靶面光强为  $10^{23} \text{ W/cm}^2$  的激光,简称“EW/ZW 激光”或“超强超短激光”<sup>[19]</sup>。

III 区所示为国防军事“能用、好用、管用”牵引研发的一类高平均功率激光(又称“高能激光”),同样也是大国在军事领域激烈竞争的焦点之一。激光发明数十年来,美国、前苏联/俄罗斯、中国、欧洲、以色列等根据各自的国防发展需求,先后研发了化学、固体、气体等高能激光样机,验证了高能激光用于军事领域战略战术效应和作战场景的有效性,使强激光有望走出科幻世界,迈进未来战场<sup>[20-22]</sup>。

IV 区所示是文献[2]在总结强激光技术发展未来重大需求牵引的基础上,预测的强激光装置发展的未来趋势,其基本特点是高峰值功率、高平均功率、高重复频率,本文简称为“三高激光”。“三高激光”的重大应用包括激光聚变能(IFE)、激光尾场加速、先进加速器、高能辐射源(粒子、中子、电子、X 射线等)、太空激光、核材料处理等,是强激光技术与工程亟待开发的

“处女地”,目前国际上的“代表作”是英国卢瑟福实验室(RAL)研发的 Diode Pumped Optical Laser for Experiments(DiPOLE)系统,其核心是基于低温气体冷却多板条 Yb:YAG,实现了输出脉冲能量 100 J 级/脉宽 ns 级/重复频率 10 Hz<sup>[23]</sup>的总体能力,成为“三高激光”的“处子秀”。

简而言之,高功率激光、超强超短激光、高能激光、“三高激光”作为强激光领域的典型代表,在强激光发展的未来愿景中仍将是“主旋律”。回顾强激光发展历程,相继探索与开发了具有化学、固体、气体、准分子、自由电子等多种介质和机制的强激光装置或系统<sup>[24]</sup>,其中采用电泵的固体激光因具有储能密度高、构型种类多、结构紧凑、应用适应性强等特点,成为现阶段强激光研发的重点方向。

本文将重点讨论固体强激光装置输出能力<sup>[25]</sup>和光束品质等 5 类受限条件、机理与解决思路。5 类受限条件包括增益能力、光束品质及规定条件下装置安全运行的热负载、功率负载、通量负载。对于不同技术途径与特点的固体强激光系统,尽管 5 类受限条件对其输出能力和光束品质的影响权重不尽相同,但在物理层面具有“共性”。5 大受限问题尽管物理机制、影响过程完全不同,但集中在一个复杂系统,相互制约、相互影响。从工程应用角度,增益能力与光束品质是决定强激光系统应用效能的直接要素,热负载、功率负载和通量负载则是直接决定装置增益能力与光束品质的主要“共性”因素,它们构成了影响强激光应用稳定性和安全性的直接因素。

解决增益能力与光束品质受限是研发连续强激光和脉冲强激光系统的共性问题。但对于高功率激光和超强超短激光,制约输出能力的首要因素是功率负载受限;对于高能激光,制约输出能力的首要因素是热负载受限;对于“三高激光”,必须同时突破功率负载受限和热负载受限,这成为强激光领域研究的新命题。因此,深入研究 5 类受限机理、基本规律及其相互影响,融合近期发展的新材料、新方法、新技术、新构型,对研发后续发展的“三高激光”具有积极意义。

## 2 增益能力受限问题

### 2.1 基本问题

足够的增益能力是强激光系统输出能力(激光能量或功率)设计时必须解决的首要问题。系统总增益首先取决于激光增益介质材料、泵浦源、系统构型或运行模式等关键要素。一般意义上,优质材料

是核心, 高效泵浦是条件, 系统或增益单元构型是二者相互融合的工程集成载体。在增益能力足够的前提下, 再考虑光束品质、热负载、功率负载、通量负载等因素对系统输出能力的影响或限制才是有意义的。强激光系统最终的性能取决于 5 大受限条件的平衡或折中。

激光增益介质作为强激光装置系统的核心材料, 直接决定了系统的输出能力和其他性能。强激光系统的总增益首先取决于激光增益单元的小信号增益系数  $g_0$ , 即单位长度介质的增益。 $g_0$  的表达式为

$$g_0 = \Delta N \cdot \sigma, \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为激光增益介质的受激发射截面;  $\Delta N$  为反转粒子数密度。具有较高  $\sigma$  的增益介质对固体强激光系统是有利的。首先, 对给定的任何跃迁, 以较少的注入光子就可达到饱和状态, 无论是对于泵浦过程还是受激发射过程, 可放宽对产生或放大激光的其他要求, 同时降低光学材料损伤几率; 此外, 高的增益能力使得整个系统对各类损耗的容忍度更高, 从而扩大了强激光系统的设计空间。

激光介质的另一个关键参数是上能级自发辐射光子的荧光寿命  $\tau$ 。对于脉冲强激光系统, 较长的上能级寿命  $\tau$  (毫秒量级) 有利于长脉冲泵浦, 实现泵浦能量的高效储存; 对于连续强激光系统, 可有效降低实现粒子数反转所需要的泵浦功率密度。

反转粒子数密度正比于泵浦功率密度  $\Delta N = \tau R$ , 其中  $R$  为单位体积、单位时间的光子数。因此, 可用  $\sigma\tau$  作为固体激光介质材料的品质因子,  $\sigma\tau (= g_0/R)$  表征了给定泵浦速率下的激光增益。图 2 为几类典型固体激光增益介质的品质因子<sup>[26]</sup>。

品质因子  $\sigma\tau$  反映了激光增益介质的基本特性, 除此之外, 优良的增益介质还应考虑发射带宽、浓度淬灭因子、荧光峰值等主要激光参数, 及增益介质材料的光学、热光、机械特性等。光学特性主要涉及本征频谱的吸收系数、光学折射率、非线性折射率、阿贝常数、温度-系数折射率等参数; 热光特性主要涉及热传导、热扩散系数、比热、热膨胀系数、玻璃转换温度等; 机械特性主要涉及材料密度、泊松比、断裂

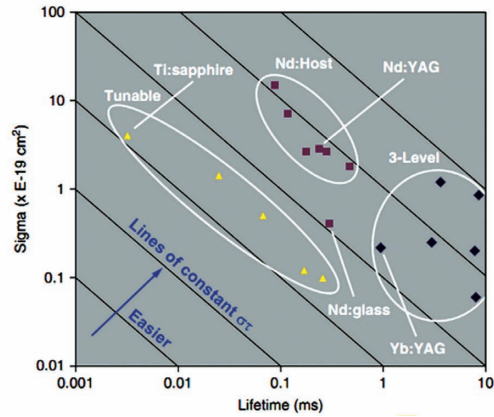


图 2 典型固体激光增益介质的品质因子<sup>[26]</sup>

Fig. 2 Figures of merit for common solid state laser gain media<sup>[26]</sup>

韧性、硬度、弹性模量、耐热骤变性等指标。

电泵浦高能激光本质上是将空间域低亮度的泵浦光子转换为高亮度的受辐射光子, 其增益能力主要受限于泵浦效率等因素。对于脉冲型的高功率或高能激光, 系统总体增益能力取决于增益介质最大储能及激光束能够从介质中抽取储能两大环节。系统本征频谱的总体能量转换效率  $\eta_T$  一般可表达为介质储能效率 ( $\eta_{st}$ ) 与储能抽取效率 ( $\eta_{ext}$ ) 的乘积:

$$\eta_T = \eta_{st} \times \eta_{ext} \quad (2)$$

## 2.2 脉冲固体激光的储能效率受限

对于脉冲固体激光系统, 影响增益介质储能效率的主要因素包括光谱匹配、自发辐射 (SE) 和放大的自发辐射 (ASE)。

有效调控泵浦源发射光谱与激光增益介质荧光吸收峰光谱的匹配, 是实现高效率泵浦、解决激光增益介质储能受限的基础。相比其他光泵模式 (如氙灯泵浦), 激光二极管 (LD) 泵浦具有更强的光谱选择性和方向性 (光谱窄至数 nm), 因而具有更高的泵浦效率, 同时也奠定了增益介质废热管控的基础, 成为强激光领域的研究热点。美国 LLNL 对比了 NIF 装置 (相同的功率水平下) 采用氙灯泵浦和 LD 泵浦的储能效率<sup>[27]</sup>, 如表 1 所示。仅仅考虑泵浦光传输效率和吸收效率, LD 泵浦的介质储能效率 (~96%) 约是氙灯泵浦 (~25%) 的 4 倍。

表 1 氙灯泵浦和 LD 泵浦的储能效率比较<sup>[27]</sup>

Table 1 Comparison of energy storage efficiency for flashlamp and LD pumping<sup>[27]</sup>

unit: %

Scheme	Power conditioning	Diodes /Lamps	Pump transport	Absorption
Flashlamp-pumped	82	50	63	40
LD-pumped	88	60	98	98

有效抑制激光增益介质内部的自发辐射是解决

激光增益介质储能受限的前提条件之一。对于脉冲



强激光系统,增益介质上能级储能需要一定的泵浦时间( $t_p$ )。泵浦过程中伴随的自发辐射将消耗介质的上能级粒子数密度,降低储能密度,这部分损耗可用泵浦效率  $\eta_{SE}^{[28]}$  表征:

$$\eta_{SE} = \frac{\tau_f}{t_p} [1 - \exp(-\frac{t_p}{\tau_f})], \quad (3)$$

式中: $\tau_f$ 为掺杂离子的荧光寿命。 $t_p$  时间内介质累积的储能为

$$E_{st} = R_p \tau_f [1 - \exp(-\frac{t_p}{\tau_f})], \quad (4)$$

式中: $R_p$  为泵浦速率,正比于泵浦光强。当泵浦光强和增益介质材料一定时, $E_{st}$  仅与泵浦时间相关。图 3 为介质内泵浦效率  $\eta_{st}$  和相对储能  $E_{st}/(R_p \cdot \tau_f)$  随相对泵浦时间  $t_p/\tau_f$  的变化规律,同时给出以 Yb:YAG 为增益介质的“三高激光”的泵浦时间与泵浦效率。当泵浦脉宽与离子能级寿命相当时,储能效率接近 60%<sup>[29-30]</sup>,证明了短脉冲泵浦的有效性。未来进行“三高激光”研发时,尚需进一步改进增益材料与高功率 LD 泵浦特性,同时提高二者在频域、时域和空域的匹配关系。

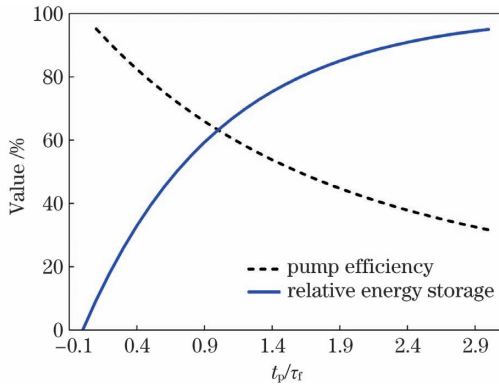


图 3 高功率激光增益介质内泵浦效率随相对泵浦时间的变化关系

Fig. 3 Pump efficiency versus relative pump duration within high-power laser gain media

有效抑制放大自发辐射是缓解激光增益介质储能受限的又一关键环节。随着介质储能的累积,自发辐射发光会将被增益介质或系统再次放大,在介质内部产生寄生振荡,消耗介质储能。特别是对于大口径、高储能的高功率激光,必须有效抑制放大自发辐射。通常设计高功率激光时,控制放大自发辐射的经验公式<sup>[31]</sup>为

$$g_0 D \leq 3, \quad (5)$$

式中: $D$  为增益介质的对角线长度。发展各类包边技术,适时吸收或损耗放大自发辐射,是解决系统内寄生振荡的必要措施。

### 2.3 脉冲固体激光的储能抽取效率受限

对于脉冲高功率激光,决定储能抽取效率( $\eta_{ext}$ )的主要因素包括增益介质饱和通量( $F_s$ )、系统运行状态( $F_{out}/F_s$ )和系统增益损耗比( $g_0/\alpha$ ),其中  $\alpha$  为系统损耗系数。

Frantz 等<sup>[32]</sup>早期研究了激光脉冲放大动力学问题,在忽略介质损耗条件下,给出了输出激光通量( $F_{out}$ )的解析表达式,即经典的 Frantz-Nodvik(F-N)方程:

$$F_{out} = F_s \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{F_{in}}{F_{out}}\right) - 1 \right] \exp(g_0 l) \right\}, \quad (6)$$

式中: $F_{in}$  为输入的激光通量; $l$  为增益介质长度。

$$F_s = \frac{h\nu}{\gamma\sigma}, \quad (7)$$

式中: $\gamma$  为与介质能级驰豫时间有关的系数。 $F_s$  揭示了介质与系统增益能力的基本关系,定性地表征了激光脉冲放大过程中的基本规律,即线性放大还是饱和放大。

范滇元等<sup>[33-35]</sup>研究了脉冲激光在四能级系统单程、多程和脉冲串放大三类条件下的增益变化规律与基本特性,并由 F-N 方程出发,给出了放大系统局部抽取效率的解析表达式:

$$\eta(z) = \frac{1 - \exp[-F(z)/F_s]}{\gamma} - \frac{1}{\gamma} \times \frac{\alpha}{g_0} \times \frac{F(z)}{F_s}. \quad (8)$$

当激光通量为  $F_s$  时,反转粒子数停留在激发态的几率为  $1/e$ 。图 4 给出了  $\gamma=1$  时,不同增益损耗比情况下的抽取效率随输入通量的变化规律。对于给定的激光通量,增益损耗比( $g_0/\alpha$ )越大,抽取

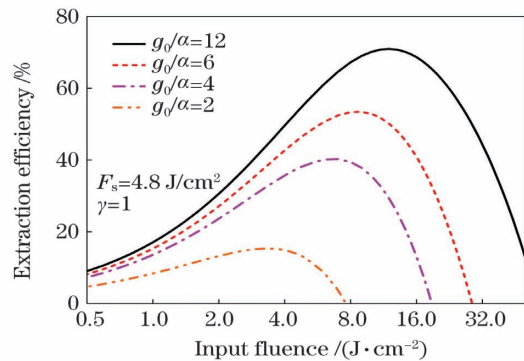


图 4 在不同增益损耗比条件下,脉冲激光放大系统抽取效率与输入通量的关系

Fig. 4 Simulated extraction efficiency versus input fluence of pulse laser amplification system under different gain-loss ratio

效率  $\eta_{\text{ext}}$  越高,因此适度提升激光脉冲放大的饱和程度有利于提高系统储能抽取效率。其次,对于一定的增益损耗比,每条曲线都存在抽取效率极大值。因此,为获得高的效率,脉冲激光放大器的工作区应选择抽取效率极大值附近。

### 3 光束品质受限问题

#### 3.1 基本问题

光束品质既是强激光系统重大应用必须关注的核心指标,更是装置自身安全、稳定运行的核心要素<sup>[36]</sup>。激光束质量通常采用  $M^2$  因子来度量,即描述光束发散角相对于高斯光束的增长程度。激光束的衍射发散角(半角) $\theta_d$  与  $M^2$  因子的关系为

$$\theta_d = M^2 \left( \frac{\lambda}{\pi w} \right), \quad (9)$$

式中: $w$  为高斯光束的束腰半径。

高能光纤激光器输出光束的质量直接决定输出模式,通常直接采用  $M^2$  因子来表征输出光束质量或高能输出条件下单一模式的控制能力。部分工业制造领域应用的强激光系统因束靶耦合或传输条件相对宽松,光束质量的评价也采用  $M^2$  因子。 $M^2$  因子能在物理本质上充分体现光束质量,适用于光束理论研究和部分光学系统的设计,但因其精确测量

时需要知道光强分布的详细结构,在诸多重要的激光领域受到应用限制。特别是在强激光领域,光束质量度量或评价往往与应用目标和传输条件直接关联,光束质量受限条件不尽相同,故研究形成了自成体系的度量或评价体系。

强激光系统光束质量通常包括远场质量和近场质量,前者与强激光束的波前有关,后者与强激光束的空间强度分布有关。文献[22]从任务需求与应用效能角度出发,系统地介绍了影响高能激光系统近、远场光束质量的主要因素,及表征和评价高能激光束近、远场质量的特征参量。

#### 3.2 高功率激光装置空域质量的受限问题

图 5 为高功率激光装置一典型束线 (beamline) 的光路示意图<sup>[26]</sup>。对于数纳秒、万焦耳级输出的典型束线,一般配置约 45 件口径为 400 mm 的各类光学元件,其中增益元件有 18 件。为了有效提高激光放大器储能抽取效率,控制装置安装体积与总体规模,大幅度提升总体性价比,采用四程放大构型。系统内部等效光路长达 350 m,等效光学元件数约 120 件,近 400 个光学表面/界面;而输出光束的远场光束质量要求不大于 3 倍衍射极限,以满足系统自身高效频率转换的基本要求。

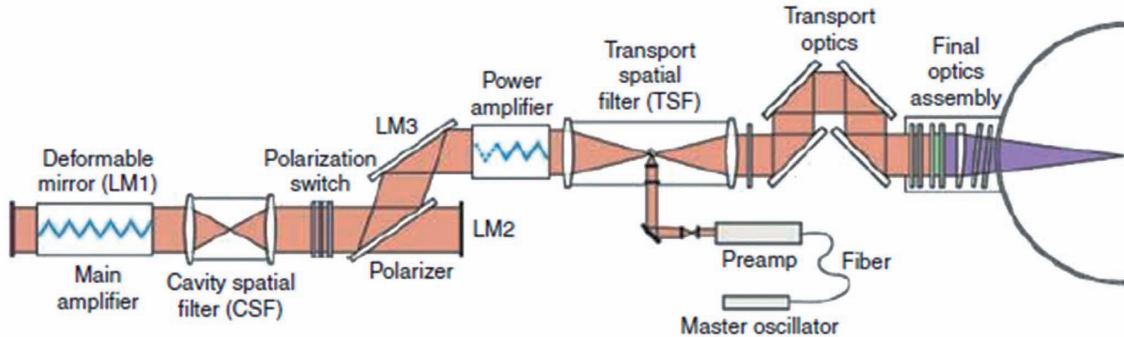


图 5 高功率固体激光装置典型束线的光路示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Schematic of the typical beamline for high-power solid laser<sup>[26]</sup>

根据物理实验与系统安全运行的基本要求,空域质量通常涉及远场质量和近场质量两个方面的内涵,其表征指标、影响要素、效应与机理、控制手段或技术如图 6 所示,有关光束空域质量的定义或表征可参考相关标准<sup>[1]</sup>。

高功率激光装置光束质量的总管控涉及三个层次、四大要素,基本思路是全程协调、总体达标。如图 7 所示,第一个层次是管控光学元件的光学品质或性能,这是光束空域质量管控的核心要素;第二个层次是管控激光传输线性效应与非线性传输效

应;第三个层次是光束的自主或主动补偿,包括相位补偿和强度补偿等<sup>[37]</sup>。

高功率激光空域质量管控的核心是研究量化三类基本关系。第一类是束线输出远场质量与近场质量的关系,这是定量预测与评估物理实验束靶耦合效应的物理基础;第二类是高功率激光脉冲放大、传输、变频、调控过程中线性效应与各类非线性效应相互作用的关系,这是空域质量“动态”管控的基础;第三类是束线内数十件大口径光学元件光性参数与系统输出光束质量的关系,这是空域质量“静态”管控

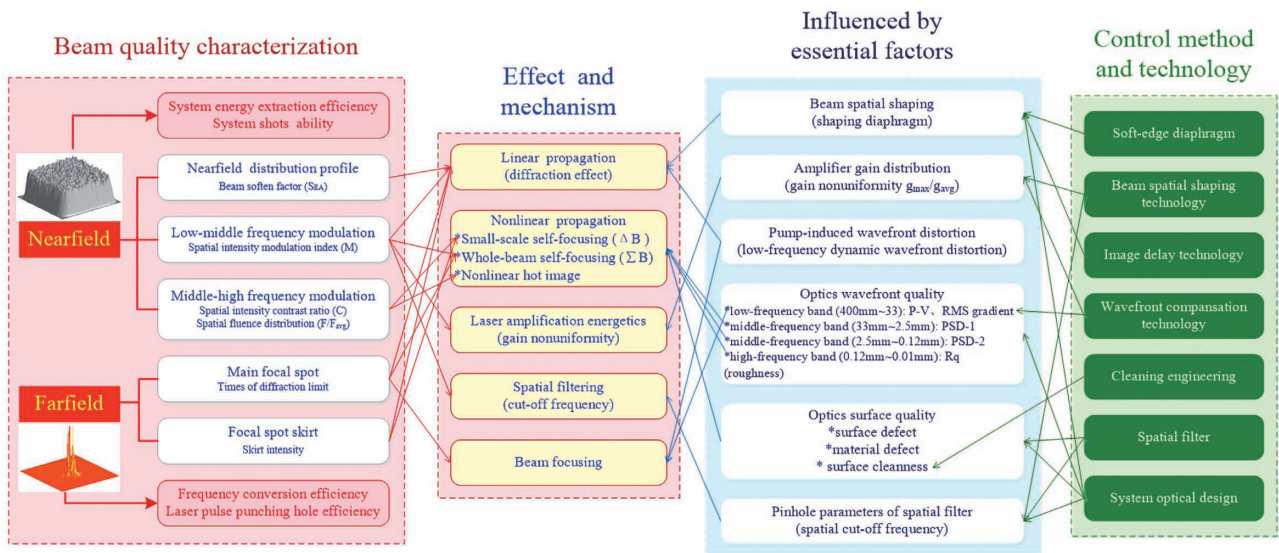


图 6 高功率固体激光系统光束质量管控示意图

Fig. 6 Beam quality management of high-power solid laser facilities

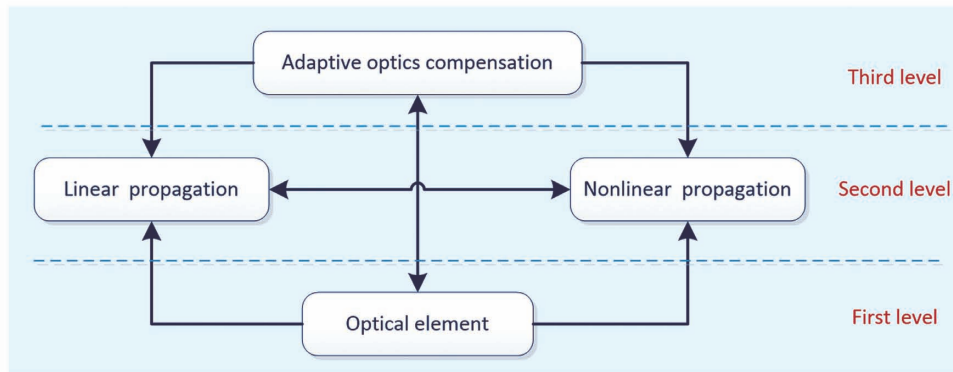


图 7 高功率固体激光装置光束质量管控的主要内容<sup>[37]</sup>

Fig. 7 Key points of beam quality management for high-power solid laser facilities<sup>[37]</sup>

的基础。

光束近远场分布的基本关系遵循空域的傅里叶变换,因此引入空间功率谱密度(PSD)分析方法,首先实现远场强度分布管控的“全谱”覆盖、分段表征,为精确管控远场分布质量、服务物理实验提供了量化基础<sup>[38-40]</sup>,如图 8 所示;其次,科学、合理地把握影响光束质量的相关要素,量化确定各类光束管控技术功能定位与相互“接口”关系;第三,科学、合理地确定光学元件波前特性与束线输出激光波前特性的量化关系,解决多年困扰高功率激光系统的设计难题<sup>[40-41]</sup>。

采用 PSD 分析方法,建立了图 9 所示的光束近场分布空间谱曲线分析图<sup>[39-41]</sup>,量化分析研究脉冲激光强度、注入光束近场质量、光学元件相位型调制缺陷、线性/非线性传输效应对光束近场分布均匀性

的影响,合理确定高功率激光系统运行通量,确保系统稳定安全运行。从图 9 可以看出:系统平均运行通量设计点偏低,可以稳定运行,但输出偏低,系统效率偏低;系统平均运行通量设计点适中,不易发生“低频段”的损伤事件,但“中高频”段仍易发生不可逆转的损伤事件;系统平均运行通量设计点偏高,运行安全性差,极易发生不可逆转的损伤事件。

大口径光学元件的质量直接决定高功率激光系统总体输出的光束质量。其中,波前指标直接决定光束的近场和远场质量,是元件设计、制造、检验、使用的基本依据,如图 10 所示。其中,波前的梯度均方根(GRMS)指标直接决定远场焦斑尺寸与分布,是元件波前质量管控的源头性指标。合理分解、设计光学元件波前指标,不但满足了物理实验需求,同时也是装置安全运行、控制成本的前提条件<sup>[42]</sup>。



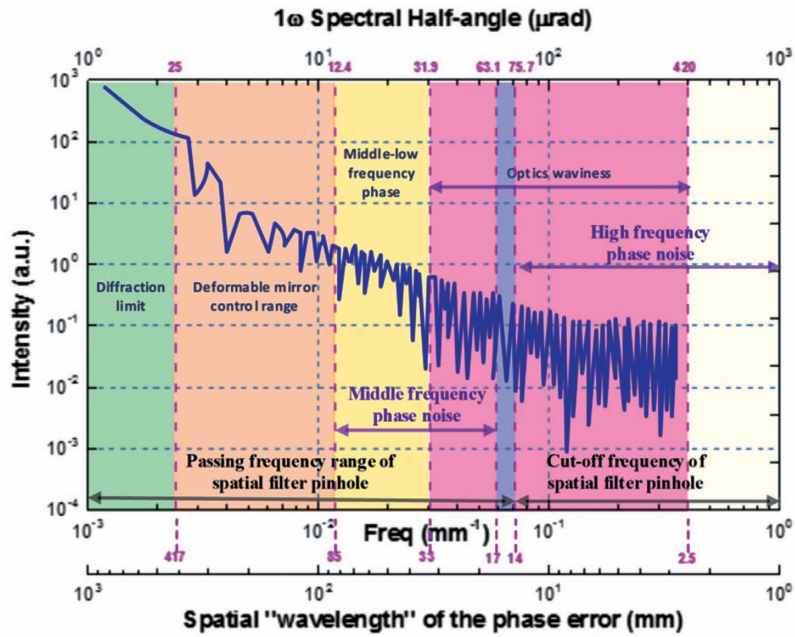


图 8 高功率固体激光装置光束远场强度“空间谱”分布<sup>[38-40]</sup>

Fig. 8 Spatial spectral distribution of the far-field intensity for high-power solid laser facilities<sup>[38-40]</sup>

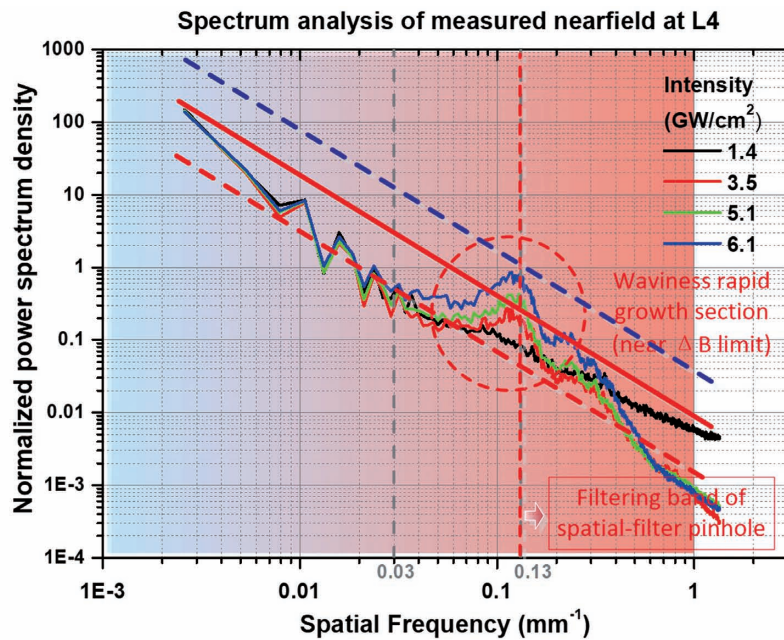


图 9 高功率固体激光装置光束近场分布空间谱曲线<sup>[39-41]</sup>

Fig. 9 Spatial spectral curve of beam near field distribution for high-power solid laser facilities<sup>[39-41]</sup>

黄晚晴等<sup>[38]</sup>长期跟踪研究神光Ⅲ系列装置建设过程中数百件光学元件的波前特性,发现了小批量制造条件下大口径钜玻璃元件波前综合梯度的概率密度函数满足瑞利分布的基本规律,并给出了主要光学元件波前 GRMS 的解析表达式,实现了光束近场分布与远场分布的定量分析。

$$R_{GRMS} = \frac{\iint \text{grad}^2(x, y) dx dy}{\iint dx dy}, \quad (10)$$

式中: 综合波前梯度  $\text{grad}(x, y) = \sqrt{\text{grad}_x^2(x, y) + \text{grad}_y^2(x, y)}$ , 即对两个维度的梯度求均方根;  $\text{grad}_x(x, y) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x}$  和  $\text{grad}_y(x, y) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial y}$  分别为波前分布函数  $W(x, y)$  沿  $x$  和沿  $y$  方向的一阶微分。

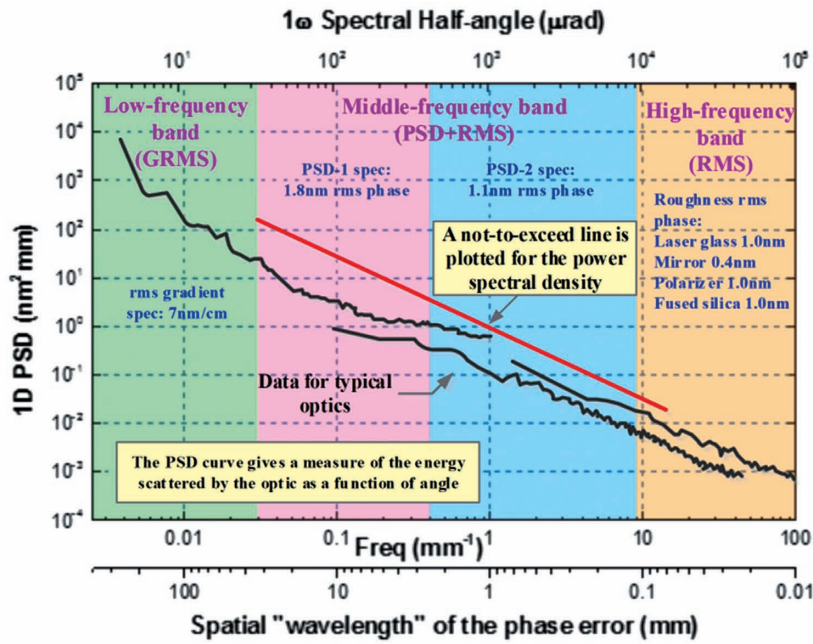


图 10 高功率固体激光装置光学元件波前指标设计示意图<sup>[43]</sup>

Fig. 10 Wavefront index design of optical elements for high-power solid laser facilities<sup>[43]</sup>

### 3.3 超强超短激光装置时域质量的受限问题

所谓时域质量,系指强激光脉冲时域特性。对于高功率激光,主要体现:一是激光脉冲时间波形调制度以及时间波形调控的精度,简称“瞬时功率平衡”;二是多束线激光脉冲时间波形和幅度的一致性,简称“束间功率平衡<sup>[1]</sup>”。对于超强超短激光,未来强场物理实验典型要求之一是脉冲信噪比<sup>[1]</sup>应大于  $10^{12}$  量级,这是一项极富挑战性的指标要求。

本质上,“宽带”激光脉冲的时间结构取决于其频域质量,两者在数学上满足傅里叶变换关系:

$$E(t) = F^{-1} \left[ \sqrt{I(\omega)} e^{i\varphi(\omega)} + \sqrt{I_n(\omega)} e^{i\varphi_n(\omega)} \right], \quad (11)$$

式中: $\omega$  为频率; $t$  为时间; $E(t)$  为光场复振幅的时域分布; $I(\omega), \varphi(\omega)$  分别为主脉冲的谱强度与谱相位分布; $I_n(\omega), \varphi_n(\omega)$  分别为放大器引入的非相干噪声光场的谱强度与谱相位分布; $F^{-1}$  为频率域到时间域的傅里叶逆变换。

纵观高功率激光与超强超短激光的发展,“宽带”为强激光调控提供了一个极为重要的自由度,但是也带来了脉冲时域质量管控的系列难题。一方面,根据(11)式,宽带激光脉冲的时域保真不仅要与传输放大过程中各类时域调制作斗争,还要与各类频域调制(即幅频效应,FM-to-AM)作斗争<sup>[44-45]</sup>,包括谱强度调制和谱相位调制;另一方面,对于宽带激光放大器,信号激光和放大器噪声均为宽带,甚至有着完全重叠的光谱范围,因此无法通过带通滤波进

行降噪;需要发展光学带内滤波(in-band filtering)<sup>[46]</sup>技术。

时域质量问题中最具挑战性的是超强超短激光的脉冲信噪比问题。对于面向强场物理实验的超强超短激光,不仅要管控主脉冲的时域分布,以实现超高峰值功率,还要管控主脉冲前沿的噪声光场。通常要求噪声光场强度小于靶的电离阈值( $\sim 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>),为此要求拍瓦级激光(峰值光强 $\sim 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>)的脉冲信噪比(主脉冲与时域噪声的强度之比)大于  $10^{10}$ ;对于目前在建的百拍瓦激光(峰值光强 $\sim 10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>),脉冲信噪比的指标需相应提升至  $10^{12}$ 。这一超高的脉冲信噪比指标要求是强激光技术的巨大挑战。

超强超短激光脉冲的典型时域结构如图 11 所示,主要分为主脉冲(飞秒尺度)、主脉冲附近的噪声波包(皮秒尺度)和时域噪声衬底(纳秒尺度)三部分,各部分的时域质量退化因素和管控方法亦不同。

纳秒尺度的噪声衬底对应着放大器引入的非相干噪声,如钛宝石放大器中 ASE 和光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)中的参量荧光(PSF),此部分噪声可独立于信号激光存在。其基本特征是谱相位  $\varphi_n(\omega)$  呈随机分布,因此几乎不可压缩,最终这部分噪声的时间宽度与泵浦窗口相当。为抑制此类噪声,目前的超强超短激光装置普遍采用“双啁啾脉冲放大(double-CPA)”方案<sup>[48]</sup>,基本思想是将种子脉冲先经过一级 CPA 放大到毫焦耳量级(预放大器),对其



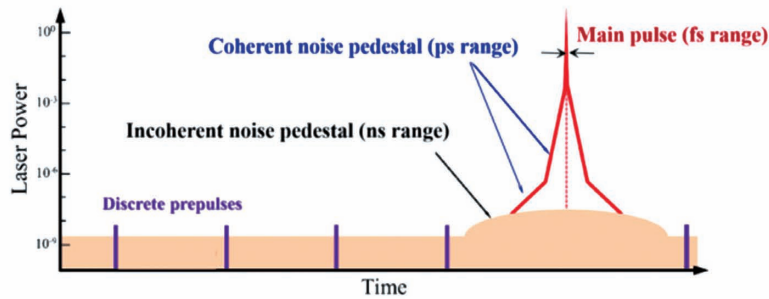


图 11 基于 CPA 或 OPCPA 技术途径产生的超强超短脉冲的典型时间结构<sup>[47]</sup>

Fig. 11 Typical temporal structure of the ultraintense ultrashort laser produced via CPA or OPCPA<sup>[47]</sup>

进行时域滤波后再注入第二级 CPA 放大器(主放大器),并在两级 CPA 放大器间采用交叉偏振波产生(XPW)<sup>[49]</sup>等非线性光学技术进行时域滤波<sup>[41]</sup>,实现噪声隔离。

皮秒尺度的噪声波包对应着信号激光在传输放大过程中引入的各类高频光谱调制,包括谱强度  $I(\omega)$  上的调制和谱相位  $\varphi(\omega)$  上的调制;此类噪声无法独立于信号激光存在,也被称为寄生噪声<sup>[50]</sup>。传统的脉冲信噪比提升技术(double-CPA 和 XPW 等)无法隔离此类噪声,导致目前的超强超短激光在主峰附近数皮秒时间窗口内的脉冲信噪比仅有  $10^6 \sim 10^8$ ,已成为制约强场实验效果的瓶颈性问题。相干噪声的来源主要包括以下内容。

光学元件层面(线性效应):展宽/压缩器由于特有的“空间( $x$ )-光谱( $\omega$ )耦合”环境,光栅、反射镜等光学元件的表面粗糙度直接烙印在信号激光谱相位上,引入了相干噪声<sup>[51]</sup>;此外,光学元件表面的残余反射<sup>[52]</sup>、光学介质不均匀导致的瑞利散射<sup>[53]</sup>、宽带膜层的传递函数不理想均会引入相干噪声。

非线性效应层面:在非线性光学过程中,相干噪声也发生非线性转移和非线性增长。以 OPCPA 为例,由于采用非线性光参量放大,在放大过程中不可避免地存在泵浦噪声转移<sup>[54]</sup>、后沿次峰向前沿转移<sup>[52]</sup>、噪声间非线性相互作用<sup>[55]</sup>等过程,这些过程均会导致皮秒时间尺度的相干噪声波包非线性增长。此外,克尔非线性也会助长相干噪声<sup>[56]</sup>。

飞秒尺度的主脉冲时域质量主要取决于信号激光的谱强度  $I(\omega)$  和谱相位  $\varphi(\omega)$  所经历的低频调制,如光谱窄化和(高阶)色散效应。可通过“精密测量压缩脉冲光谱及谱相位→种子激光光谱的主动补偿”这一闭环控制(feedback loop)实现主脉冲时域质量管控。其中,飞秒脉冲光谱及谱相位测量技术主要有自参考光谱干涉(SRSI)技术<sup>[57]</sup>和频率分辨光开关(FROG)技术<sup>[58]</sup>;种子脉冲光谱主动补偿主

要有基于“空间色散+空间光调制器”的飞秒脉冲整形技术<sup>[59]</sup>和声光可编程色散滤波(AOPDF)技术<sup>[60]</sup>。

总体来说,目前对超强超短激光纳秒尺度和飞秒尺度的时域质量管控措施多、效果好,但是缺少针对皮秒尺度相干噪声的主动控制技术。考虑到相干噪声本质上是叠加在信号激光上的高频光谱调制,相干噪声主动抑制技术的发展趋势包括两大方向:一是高分辨( $\sim 0.1$  nm)的光谱主动补偿技术<sup>[61]</sup>;二是基于时空耦合效应进行带内滤波,主动分离相干噪声的技术<sup>[45,62-63]</sup>。

## 4 热负载受限问题

### 4.1 基本问题

强激光系统热负载受限实质是激光产生、放大、调控过程中,各类热效应对装置输出能力的限制以及对输出光束品质的影响,特别是对于固体高能激光,固态介质受热而升温,引起介质光学性质畸变、应力应变及材料损伤以至炸裂破坏,将直接影响系统安全,是系统设计与研发必须解决的核心问题<sup>[64]</sup>。

激光介质的热源可分为外源性和内源性两种类型。外源性热源涉及两个部分,一是泵浦源的无用光谱部分,从外部加热固体介质;二是泵浦源的有用光谱部分,被激活离子吸收,部分能量通过无辐射跃迁从内部加热固体介质。内源性热源是强激光自身被固体介质吸收而产生的热效应。热效应对固体激光的影响主要包括热畸变、热弥散(热晕)、热冲击和热吸收等效应。

热效应引入的温升将引起介质热膨胀和折射率变化,从而引起波前畸变,破坏光束质量。对固体介质通常可用热光系数  $W$ 、应力热光系数  $P$ 、应力双折射系数  $Q$  三个参量定量描述这一效应,热效应引入的光程变化为

$$\Delta(nl) = n\Delta l + l\Delta n = n \frac{dl}{dT}\Delta T + l \frac{dn}{dT}\Delta T + l \frac{dn}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dT}\Delta T. \quad (12)$$

热弥散(热晕)效应是强激光束放大或传输过程中,激光束自加热引起的非线性热自聚焦,同样将破坏光束质量,导致装置内部器件有光损伤。这一类效应与激光光强有关,具有非线性性质,引入的折射率变化为

$$\Delta n = \frac{dn}{dT}\Delta T = \frac{dn}{dT} \times \frac{I \cdot \Delta t \cdot \delta}{\rho C_p}, \quad (13)$$

式中: $C_p$  为比热容; $\delta$  为热沉积的吸收系数。与热效应作斗争,不但是高能激光设计与研发的核心问题,同时也是未来开发“三高激光”亟待解决的核心问题。

#### 4.2 破解热负载受限的基本思路

解决固体高能激光热负载受限是个系统性问题,需要从有效抑制系统产热与有效提升系统散热能力两个方面取得突破,为此将涉及材料、物理、技术、构型等层面的革新,基本思路如图 12 所示。同时,积极探索新的技术途径,如半导体泵浦碱金属蒸气激光器(DPALs)既继承了气体激光流动热管的优点,又具备掺镱系统量子亏损小和 LD 泵浦的特点,近期引起了相关团队的关注<sup>[20]</sup>。

要想有效抑制固体高能激光系统产热效应,首先要继续探索、开发具有优良光热特性的增益材料。良好的光热特性一般指基底材料具有高热导率、低

热光系数以及低热膨胀系数,同时也包括基底与膜系具有低的吸收率。采用低温的工作模式可提升光学元件的热导率,例如,在 100 K 时 YAG 晶体的热导率是常温下的 3 倍<sup>[65]</sup>。另外,探索新型复合功能材料,可从根本上提升元件的光热特性,例如基于化学气相沉积(CVD)法,生长高品质光学级金刚石等碳基高热导率( $\sim 2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  @ 20 °C, 低热膨胀系数  $1.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )材料<sup>[66]</sup>。对于光纤激光器,采用单晶光纤或者陶瓷光纤,光纤热导率可由  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  提升至  $10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  量级<sup>[67]</sup>。此外,控制基底和膜系的吸收率的核心是攻关膜系制备工艺,有效控制缺陷、气泡和杂质等,实现膜系吸收率小于  $1 \times 10^{-6}$  的目标。同时,继续探索无内热、低内热激光产生的新技术或新方法。如采用同带泵浦技术,泵浦与激光波长相近,降低量子亏损以控制增益介质内的产热,例如 1018 nm 泵浦的光纤激光器以及 885 nm 泵浦的块状激光器<sup>[68-69]</sup>。另一途径是利用反斯托克斯荧光效应来抵消激光器中因量子亏损而产生的热量,即泵浦光的波长应大于激光晶体的平均荧光波长,小于但十分接近激光波长,从而实现只有少量内热甚至没有内热的激光器,即热平衡激光器<sup>[70]</sup>。有效提升系统散热能力应基于新材料、新构型,不断探索发展涉及换热、储热、传热和散热四大环节的高效热管理技术。表 2 列出了现有热管理技术途径与热负载能力。

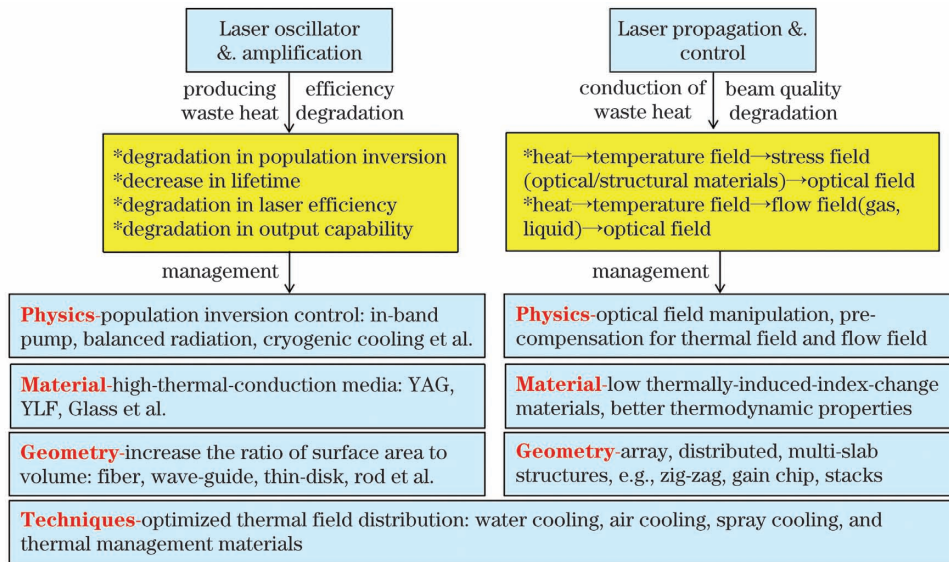


图 12 高能激光系统热管控综合分析示意图

Fig. 12 Comprehensive analysis of thermal management for high-energy laser system

表 2 高能激光现有冷却技术与对应热负载能力<sup>[71]</sup>Table 2 Cooling technique and corresponding thermal load capability of high-energy lasers<sup>[71]</sup>

Technique	Thermal load / (W · cm <sup>-2</sup> )	Temperature rise / °C	
Single-phase liquid cooling	50–100	Big	
Dual-phase liquid cooling	>100	Big	
Micro-channel liquid cooling	1000	Big	
Capillary pump loop cooling	5–10	Big	
Immersion cooling via pool boiling	20	Big	
Sub-cooled flow boiling	500	Big	
Pressure atomizer nozzle	1000	60	
Spray cooling	1300	5	
	Steam atomizer nozzle	300	Small
Jet impingement boiling	Normal surface	100–300	Small
	Micro-scale surface	500	Small
Semiconductor cooler	1		
Opto-thermionic refrigeration	100		
Heat pipe	25–100	Big	
Micro loop heat pipe	60	Big	
Heat pump		Small	

综合分析比较,为了实现短时大负荷、轻质高效热管理<sup>[72-73]</sup>的热管控目标,一方面,应重点发展微尺度两相流冷却技术,包括喷雾<sup>[74-75]</sup>、射流冲击和微通道<sup>[76]</sup>等冷却方式,通过大幅提升换热性能,实现激光负载高效热提取和温控,与此同时,降低热提取环节的规模,实现高能激光系统总体减重目标;另一方面,发展高储能密度蓄冷技术,包括相变蓄冷技术<sup>[77]</sup>、热化学储能技术<sup>[78-79]</sup>,实现系统废热的高效储存,大幅度降低热排散环节规模和平台热控资源需求;发展新型热管理功能材料/构件,包括轻质高导热/强度结构材料(如 C/C 复合材料<sup>[80-81]</sup>、金刚石基复合材料等<sup>[82]</sup>)、高汽化潜热低温相变工质、平面热管<sup>[83]</sup>、脉动热管<sup>[84]</sup>等,实现激光系统的高效热传递。

积极发展跨域融合设计技术,发展基于光-热一体化融合设计的新构型,减少传热链路和中间环节,突破传统的光/热分立式设计思路,实现结构复用和更高通量下的高效冷却<sup>[85]</sup>;发展高能激光系统与平台的一体化融合设计技术/途径,充分利用平台热控资源,实现资源的综合利用<sup>[86]</sup>。两个融合,对促进高能激光迈向战场具有积极意义。

## 5 功率负载受限问题

### 5.1 基本问题

功率负载受限本质上是强激光产生、放大、调控

过程中,各类非线性效应对系统输出能力的限制以及输出光束品质的影响。对于固体强激光系统,主要涉及与激光强度相关的折射率变化与受激非弹性散射两大类非线性效应<sup>[87]</sup>,产生机理与材料的三阶非线性极化率  $\chi^{(3)}$  直接关联。第一类非线性效应主要包括自聚焦(SF)、自相位调制(SPM)和四波混频(FWM)等效应,是非线性折射率引起的弹性过程,不存在能量交换;第二类非线性效应是受激非弹性散射引入的电磁场与极化介质之间的能量交换过程,主要包括受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)。

### 5.2 高功率激光的功率受限问题

高功率激光与超强超短激光是功率受限的“重灾区”,基本涵盖两类非线性效应的大部分种类,无论非线性效应的影响是全局性的,还是局部性的,最终效果都是灾难性的。自聚焦效应是高功率激光装置的主要受限条件,包括小尺度自聚焦、全光束自聚焦和“热像”等非线性效应,其影响是全局性的,是装置或系统研发首要解决的功率受限问题。

自聚焦效应的基本机理是高功率激光传输中,介质折射率分布受光强分布调制,导致光束波前呈现近场光强分布相关的畸变。介质折射率随光强变换的公式为



$$n(I) = n_0 + \gamma I, \quad (14)$$

式中： $\gamma$  为介质非线性折射率系数，单位为  $\text{m}^2/\text{W}$ ； $I$  为激光强度； $n_0$  为对应于激光波长的介质折射率。 $\gamma$  与非线性折射率  $n_2$  的关系为

$$n_2 = \gamma \frac{n_0 c}{40\pi}. \quad (15)$$

非线性折射率  $n_2$  导致的光束波前畸变量正比于激光光强在介质中整个传输路径的积分，最终会产生自聚焦效应，导致增益介质和光学元件的损伤。非线性传输效应可用相位的弧度值来表征，其值与光束在介质中传输距离上的强度积分成比例，通常用 B 积分(B-integral)<sup>[88]</sup> 来表示，B 积分定义为

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int \gamma I(z) dz, \quad (16)$$

式中： $z$  为激光传输距离。对于高功率激光，小尺度自聚焦(SSSF)、全光束自聚焦(WBSF)和非线性“热像”三类自聚焦效应均与光束近场分布相关特征直接关联。

SSSF 与光束近场质量的中低频强度调制度直接关联<sup>[89-90]</sup>，即光束近场分布中数毫米级调制纹波成分增长速度最高，导致光束小尺度的自聚焦，是增益介质与光学元件丝状损伤的根本原因。由于很难量化计算光束 SSSF 对光束强度和相位的影响，美国 LLNL 通过实验得到一个半经验公式来描述强激光束峰值-平均调制的关系，即

$$\varphi_{\text{peak}} = \varphi_{\text{avg}} (1.3 + 0.1e^{\Delta B}), \quad (17)$$

式中： $\Delta B$  是 B 积分引入的相位延迟量，单位为 rad。由(16)式可推出

$$B(z) = \frac{80\pi^2 n_2}{\lambda c n_0} \int_0^z I(z) dz. \quad (18)$$

高功率激光装置设计中，利用空间滤波器(SF)小孔滤除小尺度空间频率成分，控制束线中两个小孔之间的  $\Delta B$  低于 1.8 rad，确保光束近场调制度不大于 1.5 : 1，是控制装置功率负载的首选措施。

WBSF 与光束近场分布轮廓(或软化因子)及运行激光通量直接关联。在高功率激光深度饱和和放大条件下，光束中低频调制引入的非线性相移逐级积累，尽管不会损伤束线下游光学元件，但将影响高功率激光束的聚焦特性<sup>[88]</sup>。WBSF 是整个束线全程 B 积分的累积值，用  $\Sigma B$  表征，一般限定为  $\Sigma B \leq 3.5$  rad。

非线性“热像”与光束近场分布的中高频调制，即光束通量对比度  $C$  或通量分散度  $(F/F_{\text{avg}})$  直接关联<sup>[91]</sup>，形成过程如图 13 所示。强光束被光路中“缺陷”(可能是相位型噪声，也可能是振幅型噪声)衍射，衍射场光强分布携带了“缺陷”的波前信息，入射非线性介质后，介质折射率被光强分布调制，光束传输波前又被折射率调制，于是冻结于衍射场光强分布中的波前信息被共轭重现，在光路下游形成“缺陷”峰值功率数倍于运行通量的“热像”，成为高通量运行条件下，束线下游光学元件损伤的主要诱因之一。

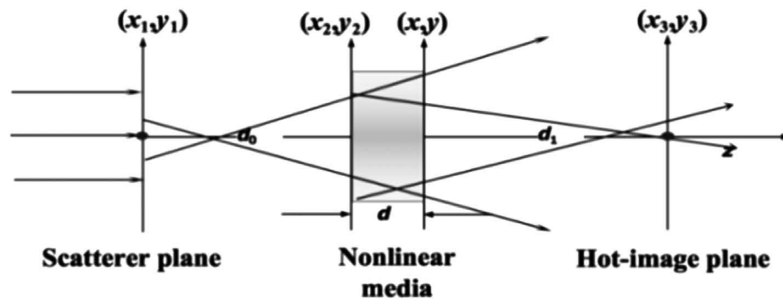


图 13 高功率激光装置中非线性“热像”物理过程示意图<sup>[91]</sup>

Fig. 13 Schematic of the formation of nonlinear hot images in high-power lasers<sup>[91]</sup>

### 5.3 高能光纤激光的功率受限问题

高能光纤激光功率受限涉及的非线性效应主要包括 SBS、SRS 和 SPM<sup>[21]</sup>。SBS 中，入射抽运光与介质热致声波和散射波之间相互作用后，以后向散射形式发生，在一定相位匹配条件下，入射激光超过 SBS 阈值，将有前向传输光转换为后向传输光，使后向散射功率急剧提升。SRS 则是入射抽运光与分子振动模式之间的特殊带宽相互作用过程，散射后

的入射光频率下移，产生频率等于分子振动频率的斯托克斯光，造成抽运光能量损耗。SBS 与 SRS 都是入射光波通过光纤介质时被分子振动调制的结果，均具有沿光纤积累的增益特性，但不同之处为，激发 SBS 是声频支声子，SRS 是光频支声子，对应的布里渊频移量较拉曼频移量要小得多。高能光纤激光的非线性效应产生的斯托克斯光会在光纤内部形成干扰噪声，导致波形畸变、能量耗散，使激光器

输出性能或光束质量严重下降。

特别是对于窄谱高能光纤激光,由于运行功率直接决定激光频谱宽度,SBS 的功率阈值已成为窄谱高能光纤激光器的首要受限条件。SBS 的功率阈值( $P_{th}^{SBS}$ )表达式为

$$P_{th}^{SBS} = \frac{21}{g_B} \times \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_s} \times \frac{A_{eff}}{L_{eff}}, \quad (19)$$

式中: $g_B$  为受激布里渊散射增益因子; $\Delta\nu_B$  为布里渊增益带宽; $\Delta\nu_s$  为有效信号光带宽; $A_{eff}$  为有效模面积; $L_{eff}$  为相互作用距离。

“窄谱高能光纤激光+甚多束光谱合成”已成为高能激光近期突破军事应用“够用”、“好用”、高门槛、极富竞争力的技术途径,但窄谱高能光纤激光器输出功率一直徘徊在 2~4 kW,持续突破窄谱高能光纤激光功率受限成为高能光纤激光研究的热点之一。文献[92]以提升 SBS 功率阈值为目标,研究讨论了有效管控 SBS 等非线性效应的若干探索方向,包括采用大模场光纤、改变光纤掺杂成分与分布、利用纳米粒子掺杂技术、基于温度场或应力场抑制技术,并分析了这些技术对提升 SBS 阈值的有效性和实际工程应用的局限性。因此,破解 SBS 以及模式不稳定性(MI)必须从材料、构型等多因素做优化设计,是一个小而全的系统工程。

## 6 通量负载受限问题

### 6.1 基本问题

强激光装置通量负载受限实质是强激光产生、放大、调控过程中,强激光束与各类“缺陷”相互作用导致的光学元器件损伤对装置输出能力的限制,定义为强激光装置常规运行中不发生光学元件损伤的激光通量  $F_L$  (单位  $J/cm^2$ )。对于相同规模、相同性能的强激光装置,通量负载能力越高,输出能力越强,装置运维的性价比与鲁棒性越高。

强激光通量负载受限往往取决于系统内部损伤阈值最低、最易损伤的元件或单元,如超强超短激光用于啁啾脉冲压缩的光栅对<sup>[93]</sup>、兆焦耳级高功率激光的紫外光学组件<sup>[94]</sup>、高能光纤激光器内部的输出界面<sup>[95]</sup>等。

所谓“缺陷”,系指激光辐照条件下,因吸收激光能量或调制激光光场(振幅或相位),诱发光学元件发生不可逆转损伤的各类“前驱体”,包括光学材料制备、元件表面或亚表面加工及光学薄膜制备过程中产生的各类“缺陷”以及强激光装置或系统运行过

程中产生的各类污染。破解通量受限的核心是实现强激光主要光学元件各类“缺陷”的有效管控。激光损伤机理与效应方面的基础研究可参考 2003 年 Wood 发表的专著<sup>[96]</sup>。

### 6.2 亚阈值运行条件下的通量受限问题

亚阈值运行模式系指装置或系统运行通量低于关键光学元件损伤阈值,是强激光系统研发的基本准则,是系统稳定、安全运行的基本保障。

考虑到光束近场质量的影响,系统运行通量  $F_L$  设计遵循以下准则:

$$F_L \leq C_s \cdot M \cdot F_{th}, \quad (20)$$

式中: $F_{th}$  为系统内部为“敏感”光学元件的损伤阈值; $M$  为光束近场分布调制度; $C_s$  为系统常规运行设置的安全系数。

亚阈值运行条件下,强激光系统要进一步提升输出能力,基本思路一是提升光束质量,特别是降低强激光近场调制度,有效抑制放大传输过程中的非线性效应;二是有效抑制元件制造过程中引入的各类“缺陷”,较大幅度地提升光学元件的损伤阈值  $F_{th}$ ,规避“短板”元件;三是提高系统运维过程中各类杂散光束和环境污染管控能力,有效降低元件污染概率。

提升光学元件损伤阈值,除了有效控制光学材料自身的“缺陷”之外,重点是提升应用极为广泛的激光薄膜的损伤特性,包括反射膜、减反射膜、偏振膜、多色膜。高损伤阈值激光薄膜的研发涉及基底表面质量(关键是亚表面缺陷的控制)、膜层设计、膜料选择、涂膜工艺与参数、预处理等全工艺流程对相关“缺陷”的有效管控<sup>[97]</sup>。其中,节瘤缺陷及其损伤特性的研究对激光薄膜损伤阈值的提升具有重要意义<sup>[98]</sup>。

“真实”节瘤缺陷的性质,如种子源尺寸、吸收性及热力特性等,都无法控制和预测,难以开展节瘤缺陷损伤特性的系统和量化研究,致使对节瘤缺陷损伤的科学认识不足,无法有效控制薄膜损伤性能<sup>[99]</sup>。同济大学王占山团队基于“人工”节瘤缺陷性质,创建了缺陷电场、吸收、热力特性等多因素解耦的薄膜损伤规律研究方法,开创了单因素研究节瘤缺陷损伤特性的新途径,获得了节瘤尺寸、种子源吸收、热力特性对节瘤缺陷损伤的定量化影响规律<sup>[100]</sup>。通过“人工”节瘤缺陷的损伤形貌和电场模拟的直接比对,验证了时域有限差分法模拟电场的正确性,明确了电场增强是诱导节瘤缺陷损伤的首要原因<sup>[101]</sup>。构建了节瘤缺陷电场增强的简化物理

模型,借助类聚焦和光穿透效应,阐明了薄膜结构影响电场增强的基本规律<sup>[102]</sup>。在节瘤缺陷损伤机制的深刻认识基础上,提出了宽角度反射新型薄膜结构以抑制电场增强,如图 14 所示,大幅提升了薄膜

损伤阈值<sup>[103]</sup>。制备成功损伤阈值高达  $60 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $@1 \mu\text{m}$  波长)的超高强度薄膜,将其成功应用于神光 III 系统装置,为后续研究更高损伤阈值激光薄膜开辟了新的方向和途径。

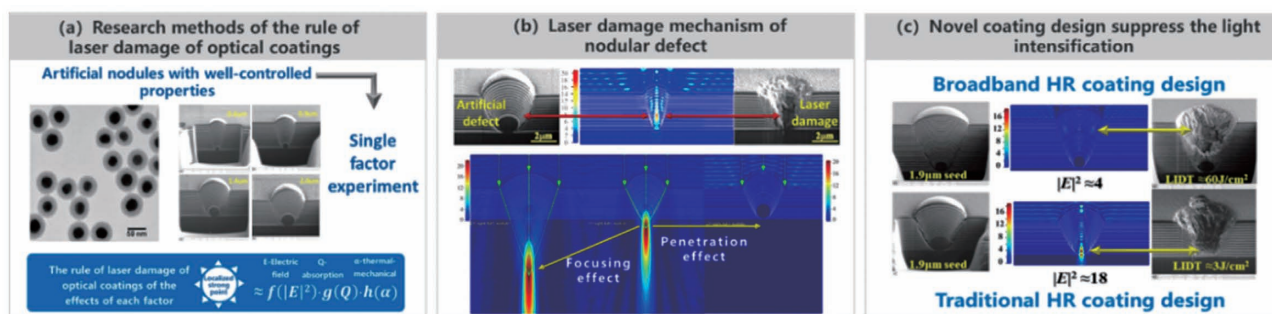


图 14 多层介质膜中的节瘤缺陷损伤<sup>[103]</sup>。(a)单因素研究节瘤缺陷损伤规律的方法;(b)节瘤缺陷电场增强的物理机制;(c)抑制电场增强的薄膜新结构

Fig. 14 Damage of nodular defects in dielectric multi-layer coatings<sup>[103]</sup>. (a) Approach to study the damage of nodular defects by single factor experiment; (b) physical mechanism of the electric field intensity enhancement in nodules; (c) new structure of thin film for suppressing electric field enhancement

### 6.3 跨阈值运行条件下的通量受限问题

跨阈值运行是兆焦耳级高功率激光装置研发与运维所遭遇的重大科学问题。运行在紫外波段的熔石英材料因自身的热力学特性,紫外损伤增长阈值仅为  $4 \sim 5 \text{ J/cm}^2$ <sup>[104]</sup>,远低于束线内部其他光学元件的损伤阈值,成为装置输出能力受限的核心“短板”。与束线内部大多数光学元件损伤阈值匹配的装置运行通量将超过熔石英紫外损伤增长阈值,故称为“跨阈值运行”。

紫外损伤增长阈值偏低属于熔石英材料的内秉特性,尚无有效技术手段提高熔石英紫外损伤增长阈值。鉴于此,美国 LLNL 在 NIF 建设中提出了熔石英元件“循环使用策略”,并带动了相关技术发展,初步解决了阻碍 NIF 输出能力达标的核心难题,实现了装置满负载限量发射运行<sup>[105]</sup>。但装置可用性、鲁棒性仍不能适应主要物理实验研究对激光能量等参数的要求,无法有效地支撑既定物理实验研究与科学目标的实现。

所谓“跨阈值运行”,本质上是元件“亚阈值运行”条件下损伤的静态管控推向“损伤”动态管控,即要求在紫外光学元件设计、制造、运行和维护全流程中对“缺陷”和“损伤”实施有效的量化管控。为积极应对这一挑战,在 NIF“循环使用策略”的基础上,提出了兆焦耳级高功率激光装置紫外元件“全程‘缺陷’量化管控、数套元件循环使用”的总体应对策略,其基本构架如图 15 所示,涉及三个关键环节。

第一环节是持续提升高品质紫外光学元件制造

流程中各类“缺陷”的量化控制能力。核心是深入研究材料制备、元件加工、表面处理、化学涂膜各个环节缺陷产生的原因和机制,建立既定制造工艺条件下高置信度的元件“缺陷”模型和特征参量,实现元件制造环节缺陷的量化管控。重点首先是优化或改进熔石英材料的制备工艺,有效抑制或降低材料内部非桥氧(NBOHC)、氧空位(ODC)等微观缺陷。其次,优化或引进新工艺,以改进熔石英元件加工工艺,有效控制元件亚表面缺陷,解决元件表面形收敛与亚表面缺陷控制的工艺一致性难题<sup>[106]</sup>。第三,发展紫外光学元件先进表面处理技术或工艺消除前级冷加工环节产生的缺陷,进一步提升元件损伤性能。美国 LLNL 将电子行业的化学抛光引入熔石英元件制造流程,开发了基于氢氟酸动态蚀刻的先进延缓工艺(AMP)对熔石英元件表面进行后处理,在前级低缺陷加工的基础上将熔石英元件损伤密度再降低了两个数量级<sup>[107]</sup>。第四,有效提升获取高品质紫外光学元件各类“缺陷”特征与分布参数的能力。重点一是采用“近场成像”测试方法,创造与高功率激光装置相同辐照模式与环境条件,规范元件损伤测试方法,建立紫外元件使用寿命模型,并获得高置信度的模型参数。在此基础上,在高功率激光装置上对模型进行校核,以实现元件损伤产生和增长的精确预测。其次,规范紫外元件的损伤特性与寿命评估测试方法和标准,建立光学元件损伤特性合格性检验的规范和标准,确保批量生产条件下元件损伤特性的一致性。



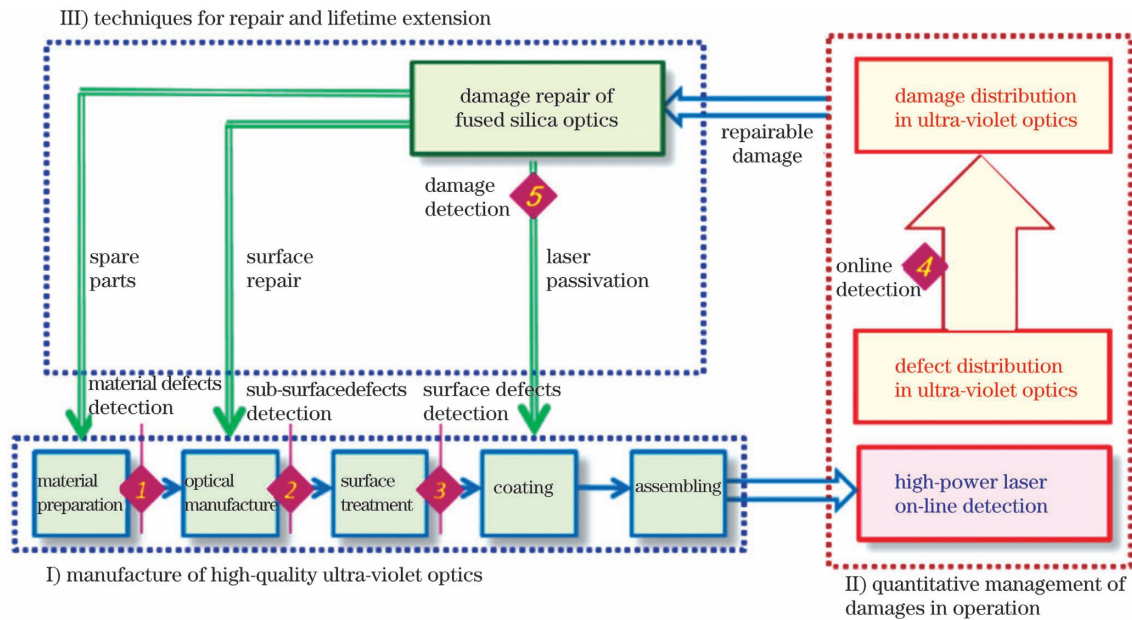


图 15 数兆焦耳级高功率激光装置紫外光学元件“跨阈值运行”总体实施策略

Fig. 15 Overall implementation strategy for the above-threshold operation of ultraviolet optical elements in high-power laser facility with several megajoules

第二环节是持续提升高品质紫外光学元件上架运行中各类损伤的量化控制能力,核心是研究建立紫外光学元件损伤产生和增长的基本规律,建立具有较高置信度的元件使用寿命模型和特征参量;高功率激光装置规定运行模式、规定运行参数和规定运行条件下,实现紫外光学元件损伤管控的可预测、可验证、可重复。重点一是装置运行时,及时检测和更换需要下架维修的光学元件,通过对装置运行发次和运行参数的优化配置,确保下架元件的频率和数量与元件循环处理产能相匹配。其次,建立甚多束高功率激光装置的运行模型,研究装置分级运行条件下所需的元件维修资源。技术途径之一是在前两个环节的基础上,建立“工艺参数—缺陷水平—损伤密度—使用寿命—元件更换数量与频率”全流程的量化分析模型,并建立全流程的“缺陷”精确检测技术与能力,获取高置信的“缺陷”数据库。技术途径之二是在装置运维阶段针对引入大数据、深度学习等新方法,建立紫外元件寿命或更换率的关联参数。如 LLNL 利用 NIF 运维从 2012 年至 2014 年的运行数据,统计发现紫外元件下架数量与累积损伤增长率之间存在线性关系,进而用累积损伤增长率这个特征参数来预测元件下架数量,并用之指导装置后续运行<sup>[105]</sup>。

第三环节是持续提升紫外光学元件高品质修复工艺和延寿能力,核心是有效改进元件修复品质和提高修复效率,构建紫外元件单点钝化、表面返修和

备品备件的三级保障体系,研究建立具有较高置信度的装置运行模型和特征参量,实现装置预期分级运行条件下的下架元件数量和频率,及所需维修资源的精确预测和动态管控。

## 7 结 论

篇幅所限,对五类受限问题的讨论并未追求系统性、完备性,仅涉及决定受限条件基本物理特性的相关要素或关键环节。增益能力受限可视为与各类“损耗”作斗争,光束品质受限在空、时、谱三域与各类“噪声”作斗争,热负载受限与各类热效应作斗争,功率负载受限与各类非线性效应作斗争,通量负载受限与各类“缺陷”作斗争。在这些“斗争”过程中,不仅将带动新材料、新方法、新技术、新工艺、新构型的创新研发,同时也将积极促进激光泵浦与放大动力学、传输动力学、损伤动力学、热控动力学等强激光相关学科的丰富与发展,为自主创新发展以“三高激光”为代表的先进强激光工程夯实必要的物理基础与量化边界条件。

## 参 考 文 献

- [1] General Equipment Department of the People's Liberation Army of China. Terminology for laser parameter of high peak-power & high energy laser: GJB8546—2015 [S]. Beijing: China Aviation Integrated Technology Research Institute, 2015.

- 中国人民解放军总装备部. 高功率、高能量激光参数术语: GJB8546—2015[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2015.
- [2] Siders C W, Haefner C. High-power lasers for science and society [R]. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2016.
- [3] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National ignition facility laser performance status[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [4] Zhang X M, Wei X F. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100003. 张小民, 魏晓峰. 中国新一代巨型高功率激光装置发展回顾[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100003.
- [5] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [6] Wei Z Y, Zhong S Y, He X K, et al. Progresses and trends in attosecond optics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501001. 魏志义, 钟诗阳, 贺新奎, 等. 阿秒光学进展及发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501001.
- [7] Dai C, Wang Y, Miao Z M, et al. Generation and application of high-order harmonics based on interaction between femtosecond laser and matter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300001. 戴晨, 汪洋, 缪志明, 等. 基于飞秒激光与物质相互作用的高次谐波产生及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300001.
- [8] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, et al. Petawatt laser pulses[J]. Optics Letters, 1999, 24(3): 160-162.
- [9] Kitagawa Y, Fujita H, Kodama R, et al. Prepulse-free petawatt laser for a fast ignitor[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(3): 281-293.
- [10] Xu G, Wang T, Li Z Y, et al. 1 kJ petawatt laser system for SG-II-U program [J]. The Review of Laser Engineering, 2008, 36: 1172-1175.
- [11] Mourou G, Tajima T. The extreme light infrastructure: optics' next horizon[J]. Optics and Photonics News, 2011, 22(7): 47-51.
- [12] Zeng X M, Zhou K N, Zuo Y L, et al. Multi-petawatt laser facility fully based on optical parametric chirped-pulse amplification [J]. Optics Letters, 2017, 42(10): 2014-2017.
- [13] Li W Q, Gan Z B, Yu L H, et al. 339 J high-energy Ti : sapphire chirped-pulse amplifier for 10 PW laser facility[J]. Optics Letters, 2018, 43(22): 5681-5684.
- [14] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, et al. High-contrast 1.16 PW Ti : sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier [J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3194-3196.
- [15] Sung J H, Lee H W, Yoo J Y, et al. 4.2 PW, 20 fs Ti : sapphire laser at 0.1 Hz [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2058-2061.
- [16] Kiriya H, Nishiuchi M, Pirozhkov A S, et al. J-KAREN-P laser facility at QST: high contrast, high intensity petawatt OPCPA/Ti : sapphire hybrid laser system[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [17] Kessel A, Leshchenko V E, Jahn O, et al. Relativistic few-cycle pulses with high contrast from picosecond-pumped OPCPA [J]. Optica, 2018, 5(4): 434-442.
- [18] Bromage J, Bahk S W, Begishev I A, et al. Technology development for ultraintense all-OPCPA systems [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(1): 31-41.
- [19] Tajima T, Mourou G. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2002, 5(3): 031301.
- [20] Liu Z J, Wang H Y, Xu X J. High energy diode pumped gas laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401001. 刘泽金, 王红岩, 许晓军. 高能半导体泵浦气体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401001.
- [21] Hecht J. Solid-state high-energy laser weapons [J]. Optics and Photonics News, 2003, 14(1): 42-47.
- [22] Du X W. Factors influencing key characteristic quantity of high energy laser system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 945-947. 杜祥琬. 影响高能激光系统核心特征量的要素 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 945-947.
- [23] Banerjee S, Mason P, Phillips J, et al. Pushing the boundaries of diode-pumped solid-state lasers for high-energy applications [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8: e20.
- [24] Fattahi H, Barros H G, Gorjan M, et al. Third-generation femtosecond technology [J]. Optica, 2014, 1(1): 45-63.
- [25] Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Terminology for high peak-power laser facility: GJB8873—2016 [S]. Beijing: China Aviation Integrated Technology Research Institute, 2016.

- 中央军委装备发展部. 高峰值功率激光装置术语: GJB8873—2016[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2016.
- [26] Injeyan H, Goodno G, Palese S. High power laser handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [27] Caird J, Agrawal V, Bayramian A, et al. Nd : glass laser design for laser ICF fission energy (LIFE) [J]. Fusion Science and Technology, 2009, 56(2): 607-617.
- [28] Siegman A E. Lasers[M]. Mill Valley: University Science Books, 1986.
- [29] 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.
- [30] Gonçálvès-Novo T, Albach D, Vincent B, et al. 14 J/2 Hz Yb<sup>3+</sup> : YAG diode pumped solid state laser chain[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 855-866.
- [31] Koechner W. Properties of solid-state laser materials [M] // Koechner W. Solid-state laser engineering. Springer series in optical sciences. New York: Springer, 2006, 1: 38-101.
- [32] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [33] Fan D Y, Yu W Y. High power multi-pass amplifier [J]. Lasers, 1980, 7(9): 1-6.  
范滇元, 余文炎. 高功率多程放大器 [J]. 激光, 1980, 7(9): 1-6.
- [34] Jing F. Studies on multi-pass amplification system [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1998.  
景峰. 多程放大系统的物理研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1998.
- [35] Wang T. Numerical simulation and optimization design of multi pass laser amplification system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999.  
王韬. 多程激光放大系统的数值模拟与优化设计 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 1999.
- [36] Siegman A E. Defining, measuring, and optimizing laser beam quality [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1868: 2-12.
- [37] Hu D X. Studies on the wave-front correction techniques for high power solid lasers [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2003.  
胡东霞. 高功率固体激光系统波前校正技术优化研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2003.
- [38] Huang W Q, Zhang Y, Liu L Q, et al. Relation between the root-mean-squared gradient of optics and the size of focal spot [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32: s114003.  
黄晚晴, 张颖, 刘兰琴, 等. 光学元件波前梯度均方根与焦斑尺寸的关系 [J]. 光学学报, 2012, 32: s114003.
- [39] Su J Q, Jing F, Liu L Q, et al. Research on PSD recovery algorithm and focusing characteristics of intense laser beam wavefront [C] // The 15th China Laser Conference, September 20-24, 2001, Wuhan, China. Beijing: Chinese Optical Society, 2001: 285-288.  
粟敬钦, 景峰, 刘兰琴, 等. 强激光束波前 PSD 恢复算法及聚焦特性的研究 [C] // 第十五届全国激光学术会议, 11月20日到24日, 2001, 武汉, 中国. 北京: 中国光学学会, 2001: 285-288.
- [40] Liu H J, Jing F, Zuo Y L, et al. Study of the dividing method of the wave-front spatial frequency of the high-power-laser beam [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(10): 1464-1467.  
刘红婕, 景峰, 左言磊, 等. 高功率激光束波前空间频率划分研究 [J]. 光子学报, 2006, 35(10): 1464-1467.
- [41] Peng Z T, Jing F, Liu L Q, et al. Power spectra density estimation of quality of the laser beam passing through an self-focusing media [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(1): 87-90.  
彭志涛, 景峰, 刘兰琴, 等. 自聚焦激光束光束质量评价的功率谱密度方法 [J]. 物理学报, 2003, 52(1): 87-90.
- [42] Aikens D M. Origin and evolution of the optics specifications for the national ignition facility [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2536: 2-12.
- [43] Spaeth M L, Manes K R, Widmayer C C, et al. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 25-42.
- [44] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, et al. FM-to-AM conversion in high-power lasers [J]. Applied Optics, 2008, 47(18): 3338-3349.
- [45] Xu D P, Zhang R, Tian X C, et al. Progress on FM-to-AM effect and its suppression in high power laser driver [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020005.  
许党朋, 张锐, 田小程, 等. 高功率激光驱动器中幅频效应及其抑制技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020005.
- [46] Wang J, Ma J G, Yuan P, et al. In-band noise filtering via spatio-spectral coupling [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(8): 1700316.
- [47] Veisz L. Contrast improvement of relativistic few-



- cycle light pulses [M] // Duarte F J. Coherence and ultrashort pulse laser emission. London: InTech, 2010, 14: 305-328.
- [48] Kalashnikov M P, Risse E, Schönnagel H, et al. Double chirped-pulse-amplification laser: a way to clean pulses temporally[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 923-925.
- [49] Jullien A, Kourtev S, Albert O, et al. Highly efficient temporal cleaner for femtosecond pulses based on cross-polarized wave generation in a dual crystal scheme[J]. *Applied Physics B*, 2006, 84(3): 409-414.
- [50] Ma J G, Wang J, Qian L J. Amplification of femtosecond lasers: from yesterday to tomorrow[J]. *Physics*, 2018, 47(12): 772-778.  
马金贵, 王静, 钱列加. 飞秒激光放大的奠基性发明及其能力边界的突破[J]. *物理*, 2018, 47(12): 772-778.
- [51] Ma J G, Yuan P, Wang J, et al. Spatiotemporal noise characterization for chirped-pulse amplification systems[J]. *Nature Communication*, 2015, 6: 6192.
- [52] Wang J, Yuan P, Ma J G, et al. Surface-reflection-initiated pulse-contrast degradation in an optical parametric chirped-pulse amplifier [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15580-15594.
- [53] Wang J, Ma J G, Yuan P, et al. Scattering-initiated parametric noise in optical parametric chirped-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3396-3399.
- [54] Forget N, Cotel A, Brambrink E, et al. Pump-noise transfer in optical parametric chirped-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2921-2923.
- [55] Wang J, Ma J G, Yuan P, et al. Nonlinear beat noise in optical parametric chirped-pulse amplification [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29769-29777.
- [56] Didenko N V, Konyashchenko A V, Lutsenko A P, et al. Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3178-3190.
- [57] Moulet A, Grabielle S, Cornaggia C, et al. Single-shot, high-dynamic-range measurement of sub-15 fs pulses by self-referenced spectral interferometry [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3856-3858.
- [58] Trebino R, DeLong K W, Fittinghoff D N, et al. Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(9): 3277-3295.
- [59] Weiner A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(5): 1929-1960.
- [60] FASTLITE[EB/OL]. [2021-03-20]. <https://fastlite.com/>.
- [61] Nakamura K, Mao H S, Gonsalves A J, et al. Diagnostics, control and performance parameters for the BELLA high repetition rate petawatt class laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(4): 1-21.
- [62] Wang J, Ma J G, Yuan P, et al. Spatio temporal coherent noise in frequency-domain optical parametric amplification [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10953-10967.
- [63] Wang J, Ma J G, Wang Y Z, et al. Noise filtering in parametric amplification by dressing the seed beam with spatial chirp [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2439-2442.
- [64] Vetrovec J. Solid-state high-energy laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4632: 104-114.
- [65] Fan T Y, Ripin D J, Aggarwal R L, et al. Cryogenic Yb<sup>3+</sup>-doped solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 448-459.
- [66] Bai Z X, Yang X Z, Chen H, et al. Research progress of high-power diamond laser technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201076.  
白振旭, 杨学宗, 陈晖, 等. 高功率金刚石激光技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201076.
- [67] Kim H, Hay R S, McDaniel S A, et al. Lasing of surface-polished polycrystalline Ho : YAG (yttrium aluminum garnet) fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6725-6731.
- [68] Gao C, Dai J Y, Li F Y, et al. Homemade 10-kW ytterbium-doped aluminophosphosilicate fiber for tandem pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0315001.  
高聪, 代江云, 李峰云, 等. 自研万瓦级同带泵浦掺镱石英玻璃光纤 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0315001.
- [69] Sheng Q. In-band pumping of Nd-based all-solid-state lasers and its application in nonlinear optical frequency conversion technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.  
盛泉. 共振泵浦在掺 Nd<sup>3+</sup> 全固态激光器及非线性光学频率变换技术中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [70] Bowman S R. Lasers without internal heat generation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(1): 115-122.
- [71] Zhou L P, Tang D W, Du X Z, et al. High power

- laser weapons and their cooling systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(8): 34-38.
- 周乐平, 唐大伟, 杜小泽, 等. 大功率激光武器及其冷却系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(8): 34-38.
- [72] Gao G B, Han L S. Study on thermal management of airborne laser weapon [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(7): 93-96.
- 高光波, 韩林森. 机载激光武器热管理系统研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(7): 93-96.
- [73] Bergles A E. Recent developments in enhanced heat transfer[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 47(8): 1001-1008.
- [74] Liang G T, Mudawar I. Review of spray cooling-part 2: high temperature boiling regimes and quenching applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 1206-1222.
- [75] Wang J X, Guo W, Xiong K, et al. Review of aerospace-oriented spray cooling technology [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2020, 116: 100635.
- [76] Wang T. Study on fundamental and crucial technology about the heat sink unit of laser thermal management system based on microgrooves phase-change cooling [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Science (Institute of Engineering Thermophysics), 2008.
- 王涛. 微槽群相变冷却激光器热管理系统取热单元相关基础及关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2008.
- [77] Nazir H, Batool M, Osorio F J B, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 491-523.
- [78] Wu J, Long X F. Research status and prospects for thermochemical energy storage[J]. *Modern Chemical Industry*, 2014, 34(9): 17-21, 23.
- 吴娟, 龙新峰. 热化学储能的研究现状与发展前景[J]. *现代化工*, 2014, 34(9): 17-21, 23.
- [79] Li W, Chen W, Wang D D. Research and development of thermochemical energy storage based on hydrated salt [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2017, 17(8): 14-21.
- 李威, 陈威, 王丹丹. 基于水合盐热化学储能的技术研究与进展[J]. *制冷与空调*, 2017, 17(8): 14-21.
- [80] Feng Y Y, Qin M M, Feng W. High thermal conductivity carbon composites[C]//the 14th National Annual Meeting of Applied Chemistry in 2015, July 21-24, 2015, Nanchang, China. Beijing: Applied Chemistry Committee of Chinese Chemical Society, 2015: 92-95.
- 冯奕钰, 秦盟盟, 封伟. 高导热碳复合材料[C]//2015 年第十四届全国应用化学年会, 7 月 21 日到 24 日, 2015, 南昌, 中国. 北京: 中国化学会应用化学学科委员会, 2015: 92-95.
- [81] Cui Y, Li M, Hu Y J. Emerging interface materials for electronics thermal management: experiments, modeling, and new opportunities [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(31): 10568-10586.
- [82] Dang C, Chou J P, Dai B, et al. Achieving large uniform tensile elasticity in microfabricated diamond [J]. *Science*, 2021, 371(6524): 76-78.
- [83] Ji X B, Xu J L, Marthial A A, et al. Investigation on heat transfer performance of flat heat pipes with ultra-light porous metal foam wicks[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2013, 33(2): 72-78, 14.
- 纪献兵, 徐进良, Marthial A A, 等. 超轻多孔泡沫金属平板热管的传热性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(2): 72-78, 14.
- [84] Saha N D, Das P K, Sharma P K. Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 74: 238-250.
- [85] van Erp R, Soleimanzadeh R, Nela L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling [J]. *Nature*, 2020, 585(7824): 211-216.
- [86] Oberly C E, Bash M, Razidlo B R, et al. Integrated power and thermal management system (IPTMS) demonstration including preliminary results of rapid dynamic loading and load shedding at high power[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2015, 8(1): 60-71.
- [87] Brown D C. High-peak-power Nd: glass laser systems[M]. Berlin: Springer, 1981.
- [88] Williams W H, Auerbach J M, Hennesian M A, et al. Modeling characterization of the national ignition facility focal spot[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3264: 93-104.
- [89] Fleck J, Morris J, Bliss E. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(5): 353-363.
- [90] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(11): 628-630.
- [91] Xie L P, Zhao J L, Jing F. Theory of nonlinear hot-image formation in high-power lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6028: 60281Z.
- [92] Liao S Y, Gong M L. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers

- and amplifiers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 27-33.
- 廖素英, 巩马理. 高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 27-33.
- [93] Poole P, Trendafilov S, Shvets G, et al. Femtosecond laser damage threshold of pulse compression gratings for petawatt scale laser systems [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26341-26351.
- [94] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [95] Robertson A. Laser damage mechanisms in fused fibre components [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5647: 557-558.
- [96] Wood R M. *Laser-induced damage of optical materials*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [97] Kozlowski M R, Chow R. Role of defects in laser damage of multilayer coatings [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2114: 640-649.
- [98] Cheng X B, Shen Z X, Jiao H F, et al. Laser damage study of nodules in electron-beam-evaporated HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high reflectors [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C357-C363.
- [99] Zhang J L, Jiao H F, Ma B, et al. Laser-induced damage of nodular defects in dielectric multilayer coatings [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(12): 121909.
- [100] Cheng X B, Ding T, He W Y, et al. Using engineered defects to study laser-induced damage in optical thin films with nanosecond pulses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8190: 819002.
- [101] Ma H, Cheng X, Zhang J, et al. Effect of boundary continuity on nanosecond laser damage of nodular defects in high-reflection coatings [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 478-481.
- [102] Cheng X B, Zhang J L, Ding T, et al. The effect of an electric field on the thermomechanical damage of nodular defects in dielectric multilayer coatings irradiated by nanosecond laser pulses [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(6): e80.
- [103] Cheng X B, Tuniyazi A, Wei Z Y, et al. Physical insight toward electric field enhancement at nodular defects in optical coatings [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8609-8619.
- [104] Negres R A, Norton M A, Cross D A, et al. Growth behavior of laser-induced damage on fused silica optics under UV, ns laser irradiation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19966-19976.
- [105] Spaeth M L, Wegner P J, Suratwala T I, et al. Optics recycle loop strategy for NIF operations above UV laser-induced damage threshold [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 265-294.
- [106] Bude J, Miller P E, Shen N, et al. Silica laser damage mechanisms, precursors, and their mitigation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9237: 92370S.
- [107] Suratwala T I, Miller P E, Bude J D, et al. HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94(2): 416-428.

## Physical Limitations of High-Power, High-Energy Lasers

Zhang Xiaomin<sup>1\*</sup>, Hu Dongxia<sup>1</sup>, Xu Dangpeng<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>2</sup>, Chen Xinbin<sup>3</sup>, Liu Jun<sup>4</sup>, Han Wei<sup>1</sup>, Li Min<sup>1</sup>, Li Mingzhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory for Laser Plasmas, Ministry of Education, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*

<sup>3</sup>*Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

<sup>4</sup>*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

### Abstract

**Significance** High-power lasers enable us to peer deeper into the outer frontiers of the physical world. Since the demonstration of the first pulsed laser in 1960, pushing the limits of accessible laser power has been one of the themes in optical engineering. In this article, we reviewed the progress in developing high-power solid-state lasers



and discussed the design issues that determine the performance of these systems.

**Progress** The more one works with a given technology, the more one becomes aware of its limitations—in the case of solid-state lasers, these are primarily the simultaneous availability of high peak and average powers, combined with excellent beam quality in space domain and pulse quality in time domain. In general, the output capability and beam quality of high-power solid-state lasers are essentially limited by five physical limitations categories—gain capability, beam transformation, thermal load, power load, and fluence load. Priority orders of these five limitations largely depend on the application scenario, operational mechanisms, and technical routes of specific laser facilities. For example, for high-power continuous lasers, the main challenge arises from the thermal load limit, while for high-power pulsed lasers, the critical challenge lies in the power load limit. Thus, detailed knowledge of the physics underlying these limitations and their interactions is crucial to the generation of high-quality, high-power lasers.

We compiled some recent experimental and theoretical works on the understanding, avoidance, and breakthrough of these physical limitations, as well as relevant enabling developments for high-power solid-state lasers, including novel materials, geometries, and techniques. This paper consists of an introduction, five body sections, and a conclusion. Each section discusses the necessary ingredients for fighting against one of the five physical limitations. These are accompanied by numerous ideas and tips on how to improve the efficiency to make maximum use of pump energy.

**Conclusions and Prospects** In conclusion, the core of breaking the gain capability limitation is fighting against the diverse “losses.” The choke point in breaking the limitation of beam and pulse quality is fighting against the diverse “noise” in all the domains of space, time, and spectrum. The key to overcome the limitation of thermal load is combating the thermal effects. Pushing the limit of power load prevents diverse nonlinear optical effects that accompany the propagation of high-power lasers. Furthermore, breaking the deadlock of the fluence load limit helps counteract the inevitable defects in optical elements. During the long struggle of physical limitations with these five categories, a series of novel laser materials, methods, optical techniques, techniques for optics processing, and geometries were correspondingly developed. In addition, theories on the dynamic properties of laser pumping and amplification, propagation, damage, and thermal control were deepened and consummated.

We are now on the threshold to reach a new realm of high-power lasers—developing triple-high lasers with high-peak-power, high-energy (i. e., high-average-power), and high-repetition simultaneously. This is a new territory for laser engineering, which requires us to balance conflicting performance parameters. For example, the simultaneous availability of high-peak, average power (high-energy), presents a contradiction because increasing the peak power typically necessitates raising the laser bandwidth, causing an increase in the quantum defect and subsequent efficiency loss. This paper intends to be the beginning of a discussion, not the final word, to pave the way for “triple-high lasers.”

**Key words** laser technique; high-power, high-energy laser; gain capability; beam quality; thermal load; power load; fluence load

**OCIS codes** 140.3580; 140.3530; 140.3280; 140.3295