

# 高能激光与应用光学的几个问题

杜祥琬

(中国工程物理研究院, 北京 100088)

**[摘要]** 高能激光的产生、传输和应用是现代激光技术和光学工程的一个重要发展方向。它不仅涉及到一系列物理问题, 还有赖于多项要求极高的工程技术问题。文章提出了8个与高能激光有关的应用光学问题, 包括高能激光器、高质量光学元器件、先进的自适应光学技术、非线性光学相共轭技术、变频技术及光束相干合成技术等。着重阐明对它们的要求和可能的发展方向。

**[关键词]** 高能激光; 远距传输; 应用光学

## 1 引言

高能激光的产生、传输和应用是现代激光技术和光学工程的重要发展方向之一。这类应用的基础是激光的优异特性——它的方向性、单色性、高亮度以及空间和时间相干性, 正是这些特性允许有效地利用激光能量进行工业加工和远距离传输。关于激光能量的远距离输送, 已进行了一系列的研究, 包括建立地球外的绿色能源、宇航器供能, 清除太空垃圾(太空激光“扫帚”)等<sup>[1-5]</sup>。清除太空垃圾简意: 大量的空间碎片已构成对人类正常空间活动的威胁, 其中, 尺度小于1 cm的数量太多, 但易于防护, 空间站本身就有能力排除其影响; 而尺度大于10 cm的大块很少, 地面系统可提前发现并发出预警, 使空间飞行器将其避开; 而尺度在1~10 cm之间的轨道碎块已积累了十几万个, 既不易防护, 又不易避开。对付的策略之一是用激光照射, 使其表面烧蚀、喷溅, 产生一个速度增量, 从而脱轨烧毁, 达到清除的目的, 见图1。

激光送能系统的有效运行, 不仅涉及到高能激光系统本身及高能激光远距离输送的一系列物理问题, 而且有赖于多项要求很高的关键技术, 如高能、高质量的激光器、激光定向器、自适应光学技

术、信标技术、强光光学元件等。

本文介绍几个与高能激光送能有关的应用光学问题: 发展短波长、高质量的高能激光器; 强光反射镜; 大口径、高质量、非球面、轻质望远镜; 先进的自适应光学; 高质量、高压差气动窗口; 适用于强激光的非线性光学相共轭技术; 激光束相干合成技术; 激光频率调节技术等。

## 2 高能激光的几个应用光学问题

### 2.1 发展短波长和高质量的高能激光器

适用于遥距送能应用的激光器的发展方向是处于近红外波段的较短波长的激光器。这是由以下三个基本因素决定的。

- 1) 衍射极限是对光束发散角的物理限制;
- 2) 激光发射口径  $d$  难以做得太大(也不宜大于数米), 这是对光束发散角的一个技术限制;
- 3) 激光需在环地球大气中传输, 波长必须处于易通过大气的“窗口”波段。

对给定的波长  $\lambda$  和发送口径  $d$ , 最小可实现的光束发散角是衍射极限角  $\theta_d \approx 1.2 \lambda/d$ , 则距离  $L$  处目标上的光斑直径为

$$D = 2\theta_d L = 2.4 \lambda L/d$$

**[收稿日期]** 2000-09-01

**[基金项目]** 国家高技术“八六三”计划资助项目(863-410-1-2)

**[作者简介]** 杜祥琬(1938-), 男, 河南开封市人, 中国工程院院士, 中国工程物理研究院研究员, 博士生导师

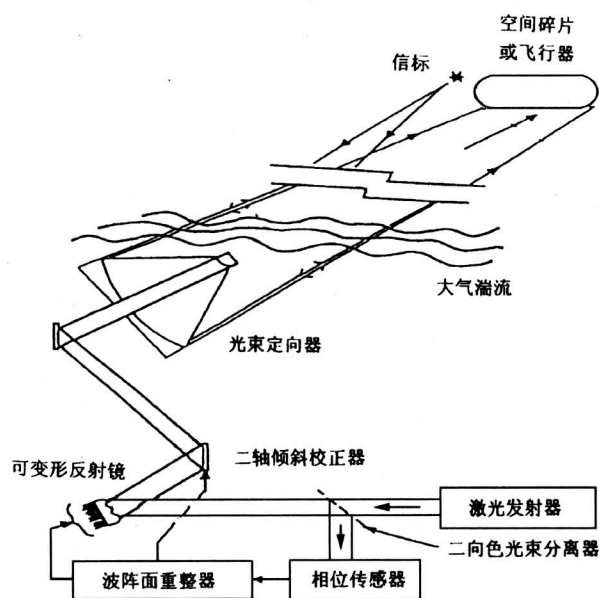


图1 激光遥距送能示意图<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Schema of laser distance propagation and application

由于  $L$  为上万公里甚至更远, 为了有效地利用激光能量,  $\theta_a$  应为微弧度甚至亚微弧度数量级, 故  $\lambda$  应短于中红外波段。

考虑到大气透过率和大气湍流扰动与波长的关系, 以及放大到高平均功率和高光束质量的可能性, 目前普遍受到重视的发展方向是近红外碘激光器, 波长  $\lambda = 1.315 \mu\text{m}$ , 国际上输出平均功率已达 200 kW 的水平, 正在向 1 MW 发展; 另一个重要的发展方向是二极管激光泵浦的固体激光器, 波长多在  $1 \mu\text{m}$  附近的近红外波段, 输出平均功率已达 10 kW 的水平, 需进一步解决成本和若干技术问题。自由电子激光技术也在发展中。氟化氙激光器 ( $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ ) 和氟化氢泛频激光器 ( $\lambda = 1.34 \mu\text{m}$ ) 也有应用的价值。

## 2.2 耐强光的高质量高反射镜

高能激光 (HEL) 不同于短脉冲高功率激光, 它一般是连续波或准连续波运行的高平均功率激光, 持续时间达数秒以上。对于数百千瓦、1 MW 的高能激光器, 腔镜及光学链中的部分反射镜需要承受数十千瓦/厘米<sup>2</sup> 的功率密度或数十至 100 kJ/cm<sup>2</sup> 的能量密度。实验表明, 这样高的能量密度不仅容易引起腔镜的热畸变, 造成光束质量显著下降, 而且会使腔镜本身致残甚至炸裂。

因此, 必须研制耐强光的反射镜, 其要求是:

1) 对强光的反射率达到  $R = 99.99\%$  以上 (国际上已有报导), 将单位面积的热沉积降至  $10 \text{ J/cm}^2$  以下, 这对基底材料及其加工、镀膜方法、工艺和检测技术都提出不同于 99.9% 时的要求;

2) 高质量的反射镜的表面像差 (rms 值) 应  $< \lambda/10$  的数量级 ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , 是常用作检验标准的氦氖激光的波长), 这对镜子的基底材料、加工误差、镀膜都提出了很高的要求;

3) 高能激光系统中, 除主激光外, 还有配套的副激光器。因此, 反射镜除应对主激光有前述极高反射率外, 对副激光也希望有较高的反射率;

4) 为缓解持续运行时镜子的热畸变效应, 采取简易的冷却措施, 又不增加系统的复杂性。

## 2.3 大口径、高质量、非球面、轻介质主镜

由于激光送能的作用距离可远至数百、上千公里, 故发射望远镜系统主镜的口径应在技术可行的前提下适当大些, 直径达 1 m 至数米, 而且应是轻质的。已有报道: 美国研制成功的  $d = 1.5 \text{ m}$ , 厚 203.2 mm (8 in), 总质量只有 150 kg (330 lb) (同口径的实心镜质量约 908 kg (2 000 lb)), 采用了 Water jet machining 技术。另一种研究方案是将一个大望远镜改为一组较小尺寸的主镜。

这样的镜子同时需满足高光学质量的要求, 它也能承受较高的激光功率密度, 并有较高的激光反射率, 它引进的低阶与高阶像差, 均需限制在发射近红外波长激光光束质量所允许的范围。

同时, 也在发展能动薄主镜技术, 这涉及到微驱动定位技术以及薄镜面的加工、检测等。

## 2.4 高质量和高压差气动窗口

这可以说是一个气动光学问题。随着激光器输出功率和能量的提高, 对输出窗口材料的要求越来越高, 一方面需探索新的固态材料, 另一方面, 气动窗口的研究与应用有了很大的发展。对高能激光器气动窗口有如下的基本要求:

1) 光学透明, 能透过高的激光功率和能量, 激光强度衰减极少。

2) 窗口的气体介质的空间均匀性好, 引进的像差  $< \lambda/10$ 。

3) 在光腔内压与外界大气压有大压差时, 能形成有效的气幕, 使外界大气不致漏入光腔, 阻止内外气体交换并保持压差。这个压差 (工作压比  $\bar{p} = p_{\text{外}}/p_{\text{内}}$ ) 可达 150。对有些激光器此值较小,

窗口的设计方案也不同。实际上，气动窗口所适应的工作压比应有一定的可调性。

4) 气动窗口所需之气体流量必须现实可接受，相应的辅助系统不致过于庞大和复杂。

已发展了多种类型的横向流动窗口、纵向流动窗口和组合气体窗口，以及对其光学质量进行诊断的技术，见图 2。成功地设计和制作窗口，可能是高能激光器有效使用的一个瓶颈技术。

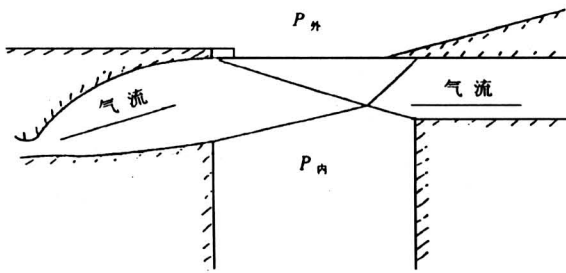


图 2 一种气动窗口的示意图

Fig.2 Schema of a kind of gas dynamic window

## 2.5 先进的自适应光学技术

提高远距离输送激光能量效率的关键是降低光束发散度。为此，除适当缩短波长  $\lambda$ ，改善激光器输出的光束质量，增大发射主镜尺寸之外，还需要采用自适应光学进行波前校正。它用来补偿光学系统内各环节的像差和湍流大气介质对激光畸变的校正。近年来，该技术在国内外都取得了进展。

自适应光学的关键之一是用于实时测量波前相位误差的波前传感器。目前，基于 Hartman-shack 波前传感器技术，需要更快速（小于毫秒）、更精确的波前探测技术，缩小造成自适应校正误差的时间延迟。一般能产生体全息图的器件（如三维光学记忆器件）均可以用作波前传感与记录器。此外，由于目标距离遥远，必须发展微光波前探测技术，研究光子计数水平的波前传感方法等。

用作相位校正器的变形镜技术也将有新的发展。可能会出现以廉价玻璃或金属为基板，用低温等离子体沉积等工艺在其上形成一薄层材料构成的波前相位校正器，这也是薄膜光学的一种应用。

微光电子、微光机械也是一个重要方向。微型机电系统 (MEMS) 正在用于制造自适应光学系统中的小型低成本变形镜，其中包括使用由静电执行薄膜组成的执行器（致动器）列阵。一个连续镜膜包含数百个执行器。在工作时，致动器按预定的量

使镜膜偏移。目标是建成小、轻、低价的以及对系统、过程和环境既能感知又能控制的新系统。

## 2.6 适用于强光的非线性光学相共轭技术<sup>[6]</sup>

传统自适应光学的一种替代技术是采用四波混频的被动校正和指向。这一概念是利用非线性光学相共轭 (NOPC) 原理，将激光放大器链路中所有可用的能量自动指向由激光器照明的目标。

近年来，NOPC 技术得到了迅速的发展和多方面的应用。SBS 相位共轭在固体激光器波前校正中得到了成功的应用，演示了近 1 kW 的平均功率，但还是基于 MOPA 结构的较短脉宽的情况。距高平均功率的高能激光送能的实际应用还有差距。

将 SBS 扩展到长脉宽时，非线性介质中的吸收会导致受激热散射 (STS) 的竞争。A. Betin 和 O. Antipov 等<sup>[5]</sup>提出了一种新的利用受激热散射的思路，设计一种基于 STS 的非线性校正方案。

通过使用将其吸收设定为入射功率的 5% ~ 10% 的介质，使得受激热散射的四波混频能在高功率振荡器谐振腔中形成一个有源全息反射镜。至于介质中的发热问题，可以通过将介质做成附在金属表面上的极薄膜层来解决，这时膜层既起散热作用，又起反射镜作用，以产生反向传输的泵浦波。

将高平均功率激光器（如固体激光器）中的受激热散射波前校正应用于激光送能系统，进行自适应瞄准和校准，有可能实现长脉冲以致连续波激光的操作，在目标上达到近衍射极限辐照。

## 2.7 激光束相干合成技术

为达到高的激光输出功率和近衍射极限的光束质量，一种可能采用的技术途径是：激光器采用多模块结构，同时对多道的输出激光束进行合成叠加。容易证明：对  $N$  束功率相同的光进行非相干叠加，则目标上的光强增加至  $N$  倍；而如果进行相干合成，则目标上光场的振幅增至  $N$  倍，光强增至  $N^2$  倍。从效益和费用考虑，非相干叠加的方案是不理想的。实现多光束相干合成的多种方案中，需要采用自适应光学技术或非线性光学的方法进行波前调制，以实现相位控制。图 3 是一种方案的示意图<sup>[4]</sup>。有人在研究利用二元光学的方法实现光束合成，但用于高能激光，也是一个难题。

## 2.8 激光频率调节技术

适用于高平均功率激光的频率调节技术是一个重要的研究方向。带宽达到波长的 10% 以上的宽带激光源有几种可能的实现途径，包括利用宽带原

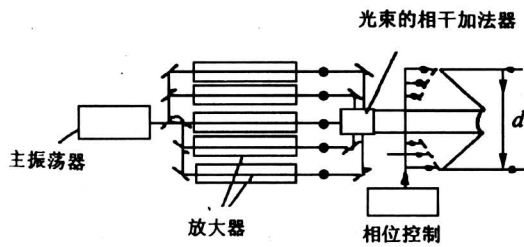


图3 一种多光束的相干叠加器示意图  
Fig.3 Schema of a coherent combinator  
of laser beams

子或离子激光系统, 或非线性光学频率转换器, 如利用冷却的非线性转换晶体有可能实现一定水平的平均功率输出, 但目前达到的水平还很有限。

另一个有希望的技术途径是自由电子激光器。其原理决定了输出激光波长  $\lambda$  满足共振关系式:

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2}(1 + \alpha_w^2)$$

其中,  $\gamma$  是以静止质量为单位的相对论电子能量,  $\lambda_w$  为摇摆器周期,  $\alpha_w$  为无量纲摇摆器磁感应场振幅。调节  $\lambda_w$ 、 $\alpha_w$  特别是  $\gamma$  等参数, 可实现不同波段的自由电子激光 (FEL) 输出。

基于超导射频加速器、储存环、静电加速器、直线加速器等电子束源的 FEL 正在进行研究, 波段从 X 射线至远红外区。FEXL (X 射线波段的 FEL) 将成为等离子体 X 射线激光的竞争者。

几台红外波段的 FEL 用户装置已达到相当好的稳定性, 有的每年可向用户提供 2 000 h 的工作时间。美国 Tomas Jefferson 实验室的高平均功率自由电子激光装置已达到输出功率 1 700 W (持续

1 s) 的水平<sup>[7]</sup>, 在数微米波段内波长可调。

### 3 结语

高能激光的远距离送能应用提出的一系列高难工程技术问题涉及到一个国家的基础科学、基础元器件、新材料、新工艺的研究水平和能力。

应用光学是基础光学和光学工程之间的重要桥梁。本文所述的八个应用光学问题是重要的, 虽然它们并未穷尽有关高能激光的工程技术问题。它们的解决, 将大大促进高能激光远距应用的发展, 并将带动强激光基础研究和基础光学水平的提高。

### 参考文献

- [1] Eguch K, et al. LEP concept for a solution to global energy crisis in 21th century [R]. WPT95 Conference, Kobe, October 1995
- [2] 美国物理学会研究组. 定向能的科学与技术 [R]. 中国工程物理研究院译. 四川绵阳, 1987
- [3] Campbell J W. The project ORION [R]. Northeast Science and Technology, NASA TM-108522, 1996
- [4] Мак А А, Шерстобитов В Е, Купренюк В И, 等. 激光能太空传输的现代光学技术 [J]. Оптический Журнал, 1998, 65 (12): 5261. 见: 强激光技术发展, 2000, 2: 1221
- [5] Panel. New world vistas, air and space power for the 21' century [R]. ADA 30959, 1996
- [6] 叶佩弦. 非线性光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [7] Neil G R, Benson S, Biallas G, et al. First operation of an FEL in same-cell energy recovery mode [R]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 445, 2000. 192~196

## High Energy Laser and The Problems of Applied Optics

Du Xiangwan

(China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

[Abstract] Making and propagation and application of high energy laser is an important direction of modern laser technology and optics engineering. It involves a series of physical problems and depends upon a lot of top-level technologies as well. The paper discusses eight topics of applied optics related with high energy laser, such as high energy laser devices, high quality optical elements, advanced adaptive optics, nonlinear optical phase conjugation, frequency tuning, coherent combination of laser beams, etc.

[Key words] high energy laser; distance propagation; applied optics