用于高精度超远程激光测距的高光束质量大能量皮秒激光器

樊仲维^{1,2,3*}, 黄玉涛^{1,2,3}, 闫晓超^{1,2}, 郭广妍^{1,2}, 白振舂^{1,2}, 何建国^{1,2,3},
赵天卓^{1,2}, 张鸿博^{1,2,3}

1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;
2. 国家半导体泵浦激光工程技术研究中心, 北京 100094;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn

A high-beam-quality, high-pulse-energy picosecond laser system for high precision ultra-remote laser ranging

Zhongwei Fan^{1,2,3*}, Yutao Huang^{1,2,3}, Xiaochao Yan^{1,2}, Guangyan Guo^{1,2}, Zhen'ao Bai^{1,2},
Jianguo He^{1,2,3}, Tianzhuo Zhao^{1,2} & Hongbo Zhang^{1,2,3}

¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

² National Engineering Research Center for DPSSL, Beijing 100094, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn

doi: 10.1360/N972019-00041

激光超远程测距是从地面台站发射窄脉宽高能量激光束对30万千米以上的探测目标(月球和探月飞行器)进行高精度测距的一种直接测距方法。激光超远程测距不仅能为各类探月飞行器进行精确定轨和变轨提供重要指导数据,还可以为天文地球动力学、地月科学、月球物理学和引力理论等研究所需的高精度月球距离提供数据基础。目前,国际上已实现厘米量级月球激光测距精度。2018年1月,中国科学院云南天文台使用大能量纳秒激光器在国内首次实现测距精度优于1 m的月球激光超远程测距。表1是国际天文台站用于月球测距所配置的大脉冲能量激光源及获得的测距精度。因此,研制大能量高光束质量皮秒激光器对全面提升我国高精度超远程激光测距技术水平具有重要的现实意义。

中国科学院光电研究院基于自行研制的15 mm大口径侧泵模块,实现了重复频率100 Hz、脉宽70 ps、单脉冲能量330 mJ、光束质量 $M^2 < 2.5$ 的皮秒激光输出。该皮秒激光采用“锁模振荡+再生放大+能量放大”的主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构,如图1(a)所示,同时实现了大能量和高光束质量的激光输出。锁模振荡器输出的重复频率80 MHz、脉冲宽度70 ps、单脉冲能量

表1 各天文台站用于激光测月系统激光光源的主要参数及测距精度

Table 1 Main parameters of laser sources and accuracy of observation at lunar laser ranging stations

测月台站	脉冲宽度(ps)	脉冲能量(mJ)	重复频率(Hz)	测距精度(cm)
McDonald	200	1500	10	~3.5
Grasse	150	200	10	<3
APOLLO	90	115	20	~0.5
Wettzell	10	130 (双脉冲)	400	~0.5
Matera	50	100	10	~2
云南天文台	10000	3000	10	<100

2 nJ的1064 nm激光经过再生放大器选单和放大后,获得重复频率100 Hz、脉冲能量2.3 mJ的激光输出,随后进入能量放大器进行放大。为了避免元器件损伤和降低非线性效应,采用逐渐扩束的方式,依次进入6.35 mm口径侧泵Nd:YAG模块和两个15 mm口径侧泵Nd:YAG模块进行双程放大。

大口径侧泵模块是大能量皮秒激光系统的关键部件,

国外厂商对于口径12 mm以上的侧泵模块对我国实行长期禁运. 中国科学院光电研究院经过攻关, 采用全国产化器件成功研发出具有完全自主知识产权的15 mm大口径侧泵Nd:YAG模块, 如图1(b)所示. 该模块采用15维环形泵浦和放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)抑制技术, 获得了高于90%均匀性的储能分布, 在100 Hz重复频率下获得储能2.5 J、小信号增益5的高能量输出, 如图1(c)所示. 模块具有很好的泵浦均匀性, 实现90%口径内PV值

小于10%的高均匀泵浦分布, 如图1(d)所示. 该大口径侧泵放大模块用于两级双通能量放大, 采用空间滤波、热致双折射补偿等技术, 提高激光光束质量, 获得了单脉冲能量大于330 mJ、脉宽70 ps、光束质量 $M^2_x < 2.5$ ($M^2_x = 2.13$ 和 $M^2_y = 2.35$)的高光束质量皮秒激光输出, 如图1(e)所示.

该大能量高光束质量皮秒激光器将用于地面观测台站与月球或探月飞行器之间(最远可达45万千米)的厘米级高精度距离探测光源.

图1 (网络版彩色)实验装置和关键器件示意图及其主要工作参数。(a) 实验装置示意图;(b) 15 mm大口径侧泵Nd:YAG模块;(c) Nd:YAG模块储能和小信号增益随泵浦能量的变化;(d) 重复频率100 Hz、泵浦能量6.7 J时, 泵浦光分布;(e) 脉冲能量330 mJ时, 激光光束质量($M^2_x=2.13$, $M^2_y=2.35$)

Figure 1 (Color online) Schematic of experimental setup and picture of key module with their main working parameters. (a) Schematic of experimental setup; (b) picture of side-pumped Nd:YAG module with rod diameter of 15 mm; (c) output energy and small-signal gain of the module with different pump energy; (d) pump distribution at 100 Hz and pump energy of 6.7 J; (e) beam quality of M^2 at output energy of 330 mJ