

星载激光测高仪固体激光器技术研究与发展

程 勇, 刘 旭, 谭朝勇, 王 赛, 韦尚方

(中国人民解放军陆军工程大学军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘 要: 空间固体激光器是星载激光测高系统的重要载荷,也是先进激光器的典型代表。星载激光测高的应用需求和星载应用环境决定了空间激光器的技术特点和规律,使得空间固体激光器成为了先进性、可靠性、成熟性和小型轻量化的技术与工艺统一。分析了星载激光测高应用的空间固体激光器高可靠激光谐振腔技术、高重频窄脉宽微脉冲多光束激光器技术、LD/光纤/固体相融合技术等方面的发展现状,介绍了单光子阵列推扫式激光雷达用空间固体激光器的技术突破,并对卫星激光测高固体激光器技术发展进行了展望。

关键词: 卫星激光测高; 空间应用激光器; 空间固体激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201046

Research and development of spaceborne solid state laser technology for laser altimeter

Cheng Yong, Liu Xu, Tan Chaoyong, Wang Sai, Wei Shangfang

(Ordnance NCO Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China)

Abstract: As a typical advanced laser, spaceborne solid state laser is one of the key components used in spaceborne laser altimetry systems. The requirement and working condition of spaceborne laser altimetry determine the technical characteristics of this kind laser source. The spaceborne solid state laser integrates the advanced, high reliable, light weight technologies and mature process, thus can meet the specific requirements of laser altimetry used in space environment condition. The development of high reliable laser resonator technology, high repetition rate narrow pulse width micro-pulse multi-beam laser technology, LD/fiber/solid-state integration technology for spaceborne laser altimetry and the current challenges were reviewed and analyzed, the significant breakthrough of multi-beam laser for spaceborne single photon scanning lidar system was proposed. At last, the development trend of spaceborne laser were summarized.

Key words: satellite laser altimetry; space application laser; spaceborne solid state laser

收稿日期:2020-08-12; 修订日期:2020-09-15

基金项目:“核高基”科技重大专项课题(2014ZX01005-101-003);国家自然科学基金(61705268);陆军工程大学基础前沿课题

作者简介:程勇(1961-),男,教授,博士,主要从事固体激光工程及光电装备保障方面的研究。Email: gdyjs@263.net

0 引言

2019年11月3日,我国自主研发的首颗1:1万比例尺立体测绘卫星“高分七号”在山西太原成功发射,该卫星搭载了我国首个自主研发的对地激光测绘载荷——“高分七号”卫星激光测高仪分系统,该卫星激光测高仪获取了地表丰富的激光回波信号,1 m 高程精度的激光落点可为立体测绘提供高质量的控制点信息,配合双线阵测绘相机载荷实现了比例尺为1:1万的高精度立体测绘,标志着我国星载激光测高能力达到新水平^[1-3]。自1971年 Apollo 登月计划以来,由美国、前苏联(俄罗斯等)、欧洲、日本、印度、中国等国家在许多卫星上搭载了激光测高(测距)仪,在激光对地观测和月球、火星等深空探测领域发挥着不可或缺的重要作用。

固体激光器是卫星激光测高系统的核心组件和关键技术。空间环境决定了空间激光器不仅要满足高效率、小型轻量化、先进性与成熟度等基础指标,而且要具有一定的可靠性与寿命以此保证有效的在轨运行。随着国际卫星激光测高应用需求的发展,空间激光器逐渐由低重频、大能量、点源探测向高重频、窄脉宽、窄线宽、多光束、多光谱、单光子阵列探测方向发展,主要经历了三个发展阶段。

1971~2003年期间为国际空间激光器“可靠性保障期”。主要由美国开展了 Clementine 探月计划^[4-5]、MOLA 火星观测者计划^[6]、SLA 对地观测实验及 NEAR 近地小行星探测等空间探测任务,主要采用具有高效、紧凑与长寿命特点的二极管泵浦全固态激光器^[7-8]。该阶段主要任务是针对卫星载荷空间环境可靠性与长寿命的特殊要求,探索激光器及其系统可靠性机理及其保障规律。

2003~2016年期间为国际空间激光器“先进技术发展阶段”。激光前沿技术的进步,极大推动了空间激光器在波段拓展可调谐及线宽、脉宽、能量、重复频率等性能指标上不断提高,使激光测高实现更高的测量精度和更多先进的功能。该阶段国际上先后发射了美国的“冰卫星”(ICESat)^[9-11]、“月球勘测轨道器”(LOLA)和“信使号”(MESSENGER)^[12],中国的“资源-3 卫星 02 星”^[13]、嫦娥一号和二号^[14],日本的“月亮女

神”(LALT)^[15],印度“月船-1”(LLRI)^[16]等卫星激光测高系统。主要目标是开发先进性与可靠性兼具的各种固体激光器以满足多种卫星激光测高应用需求。

2016至今为激光测高“新体制探索阶段”。激光测高雷达探测技术正在由单点测距与单通道扫描成像型向多通道扫描成像、面阵成像和门选通距离成像新体制激光雷达方向发展。典型代表是美国发射的 ICESat-2 上将搭载新一代“先进地形激光测高系统”(ATLAS)^[17-18]、计划发射的 LIST 和 ATLAS 等均采用多路激光并行发射和阵列接收模式,能够获取更高精度及更高分辨率的地形及植被信息,将把激光测高系统发展推向一个新的高度。

如今,空间固体激光器面临进一步提高插头效率、极端环境可靠性与寿命、轻量化与紧凑性、降低结构复杂度、不通过非线性直接输出敏感波长等技术挑战。为了应对挑战,笔者所在团队承担了该领域的专项研究,突破了满足空间激光测高需求的关键技术。因此,文中从国内外空间固体激光器的发展历程、发展现状、前沿技术的突破以及未来卫星激光测高仪固体激光器的发展动向展望等方面进行详细阐述,为相关研究与应用提供技术参考。

1 星载激光测高仪固体激光器发展现状

激光二极管泵浦的全固态激光器是空间应用固体激光器发展的首选光源,也是目前已获得空间应用的主流光源。星载激光测高的应用需求和星载应用环境决定了空间激光器的技术特点和规律,星载激光测高对空间固体激光器的特殊要求主要包括高可靠性、抗空间辐照特性、小型轻量化、高效率、长寿命、高光束质量、高峰值功率等。

星载激光测高主要应用在深空探测和对地观测两大领域。深空探测应用的空间固体激光器典型代表为月球星载激光探测(如美国 Clementine 探月激光测高仪和 LRO 月球探测卫星搭载的 LOLA 激光测高仪^[19-20]、日本 SELENE 探月卫星搭载的 LALT 激光测高仪^[21]、中国的嫦娥系列月球探测器搭载的激光高度计等^[22-25])、火星激光高度计(美国 MGS 火星全球勘测器搭载的 MOLA 激光测高仪^[26]、Phoenix 号火星探测器搭载的双波长激光测高仪、中国的“天问”火星探测器等)和水星探测激光测高仪(如美国 MESS-

ENER 水星探测器搭载的 MLA 激光测高仪^[27]。对地观测应用的空间固体激光器典型代表主要包括 ICESat 卫星搭载的第一台星载对地观测激光测高仪 GLAS^[28-31]、CALIPSO 星载激光雷达系统^[32]。这些空间固体激光器的发展经历了小能量低重频的单一振荡器体制 (LiNbO₃ 电光调 Q、KD*P 电光调 Q 或者 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q)、中等能量低重频的主振荡器加上激光放大器体制、高峰值功率高重频主振荡器加上激光放大器体制等几个重要的发展阶段。总体趋势是由低能量向高能量发展,由低重频向高重频发展,由线性探测向单光子探测发展,由单一光源向主/备份光源发展,由单一波长向 1064 nm/532 nm 双波长或 1064 nm/532 nm/355 nm 三波长发展,由单一 Nd:YAG 激光器向 Nd:YAG 固体和光纤复合激光器发展等。梳理星载激光测高空间固体激光器发展现状主要有以下几个方面。

1.1 高可靠性是星载激光测高仪固体激光器发展的重要方向

高可靠性是空间应用固体激光器的本质特征之一。空间应用激光器必须适应各种空间特殊的工作环境,需要运转在不同于实验室的应用环境中。因此,在设计上需要考虑的主要因素是空间应用激光器对冲击、振动和宽泛的温度变化保持不灵敏。在严峻的环境条件下,系统的可靠运转比最佳性能显得更为重要^[33]。

2003 年, GLAS 激光测高仪中的三台激光器都出现了发射后激光器输出能量/功率急剧下降的情况,引起了各国对空间应用激光器的高可靠性设计的高度关注^[29]。

为适应各种空间特殊的工作环境和星载平台的特殊要求,有效保证其可靠性是空间固体激光器设计的首要考虑。梳理几十年来星载激光测高仪空间固体激光器的实际使用经验和结构特点,发现空间固体激光器谐振腔的加固是保证其可靠性的重要手段。这类激光器基本形成了以棱镜腔为特定谐振腔的设计要求和结构构型,这种激光谐振腔最大的特点是具有较高的机械稳定性和热稳定性。

空间固体激光器的棱镜腔目前主要有波罗棱镜(又称为直角棱镜或者半波罗棱镜)腔、正交波罗棱镜腔和角锥棱镜折叠腔几种构型。我国“嫦娥-1”激光

高度计搭载的激光器^[25]和日本“月亮女神”SELENE 探测卫星激光高度计搭载的激光器^[21](图 1)均采用波罗棱镜腔(由于谐振腔中仅有一支波罗棱镜,也称半波罗棱镜),这种棱镜腔构型虽然仅有一个直角棱镜,能够有效保证一维方向上的稳定性,但是结构简洁可靠,在低重复频率条件下较为适用。

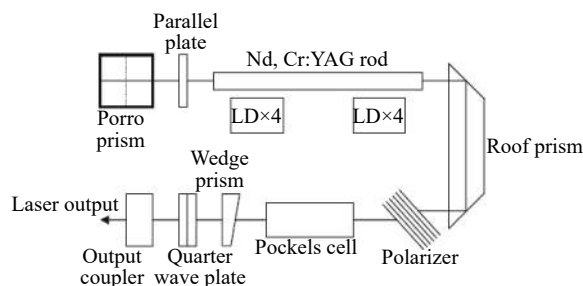


图 1 日本“月亮女神”SELENE 探测卫星激光高度计搭载的激光器谐振腔构型^[21]

Fig.1 Configuration of laser oscillator on the Japanese satellite SELENE^[21]

为有效保证二维方向上的稳定性,空间应用固体激光器多采用正交波罗棱镜腔。如美国 LRO 月球探测卫星搭载的 LOLA 激光测高仪和 MGS 火星勘测器搭载的 MOLA 激光测高仪搭载的空间固体激光器(图 2)均采用正交波罗棱镜腔,这种腔型一般利用高低方向和左右方向的波罗棱镜来代替谐振腔中的平面全反射镜,提高激光谐振腔的稳定性并通过腔内激光偏振态控制,实现激光偏振耦合输出。

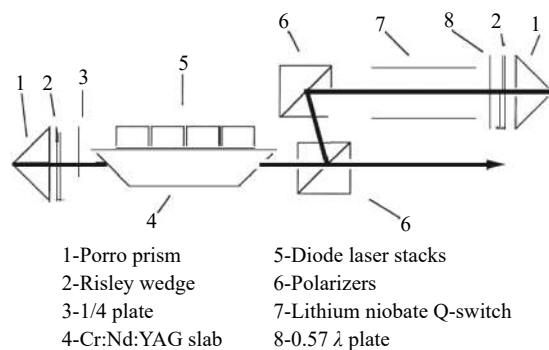


图 2 MOLA 激光测高仪的激光器腔型^[26]

Fig.2 Schematic of the MOLA laser altimeter^[26]

棱镜腔技术在有效保证激光谐振腔高可靠性的同时,也经常被用于谐振腔的折叠,从而缩短激光器的总长度,有效利用激光器结构空间,实现激光器的

小型化。例如美国 Clementine 探月激光测高仪、NEAR 近地小行星探测器搭载的 NLR 激光测距仪等空间固体激光器均采用了角锥棱镜腔和正交波罗棱镜腔相结合的组合棱镜式谐振腔构型,既保证了谐振腔高可靠性,又实现了激光器整体结构的小型化^[34](图 3)。

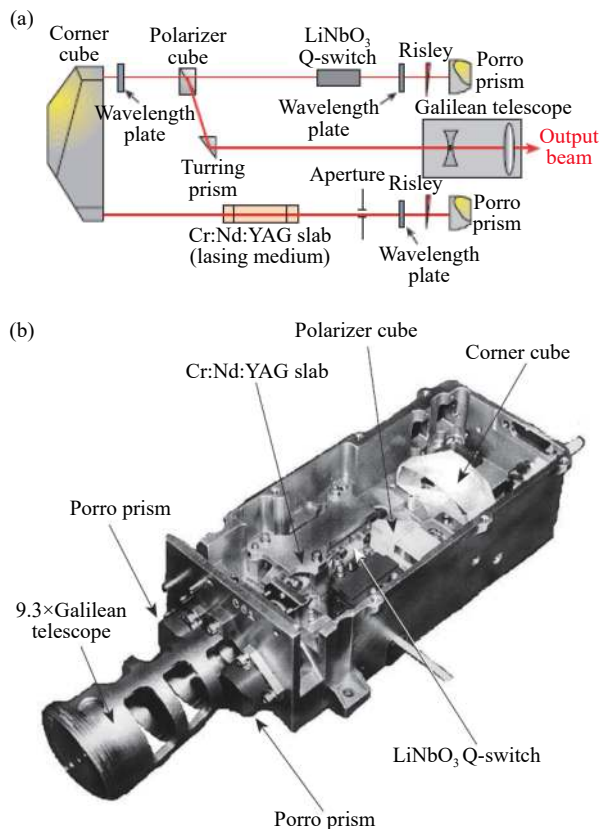


图 3 NLR 激光器腔型^[34]

Fig.3 NLR laser resonator cavity configuration^[34]

考虑发射成本和效能,星载激光测高仪对卫星有效载荷的体积质量提出了较为苛刻的要求。空间应用激光器通常采用棱镜式折叠腔和各组成部分紧凑型密接布阵方式,以及高稳定性和轻量化的光机结构设计来实现激光器的小型轻量化。例如 2004 年,美国水星激光高度计搭载的空间应用激光器,在结构空间仅为 141 mm×93 mm×30 mm 的尺寸内,实现了所有功能组件的密接布阵设计,充分利用了每一寸结构空间,成为小型轻量化设计的典型代表^[27](图 4)。

2006 年,美国 NASA 和法国太空署 CNES 联合建造的 CALIPSO 对地观测系统(图 5)采用了双波长偏振敏感激光雷达,用于获得全球气溶胶和云高

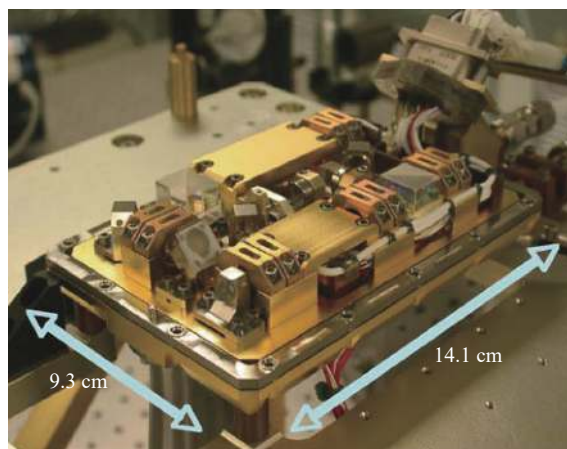


图 4 水星激光高度计的激光器结构^[27]

Fig.4 MLA laser optical bench assembly^[27]

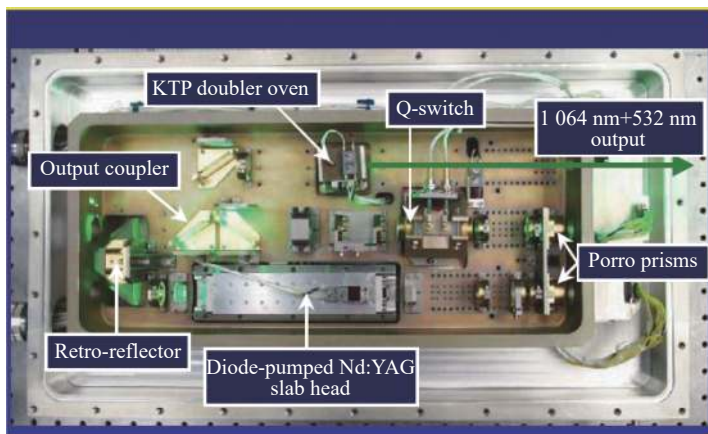


图 5 CALIPSO 激光器及其光学结构^[35]

Fig.5 CALIPSO laser and its optical bench structure^[35]

分辨率的垂直剖面。CALIPSO 采用了 1064 nm 和 532 nm 双波长的 Nd:YAG 全固态激光器, 该台激光器被称之为“低风险激光器”Risk Reduction Laser (RRL), 这台激光器 1064 nm 能量 110 mJ, 532 nm 激光能量 100~125 mJ, 重复频率 20 Hz, 其激光谐振腔同样采用了角锥棱镜腔和波罗棱镜腔相结合的组合棱镜式谐振腔构型, 保证了谐振腔高可靠性, 实现了“低风险”^[35]。

1.2 基于单光子探测体制的高重频窄脉宽微脉冲多光束激光器是空间固体激光器的一个发展方向

随着单光子探测技术和线阵探测技术的发展, 能够有效增加测绘幅宽, 提高测绘效率的多光束星载激光测高系统已经成为星载激光雷达的又一重要发展方向。多光束线阵“推扫式”激光探测和测绘技术避免了传统光机扫描式测量方案, 可以探测更宽的幅宽, 缩短测绘时间, 有效提高测绘效率, 并且提升星载测绘的数据率和分辨率。这种基于单光子探测体制的星载测高系统通常需要 kHz 以上的高重复频率、50 pm 以下的激光光谱宽度, 同时为了能够适应星载有效载荷的应用, 激光器的平均功率通常不是很大, 因此在高重频条件下激光的单脉冲能量通常在几十 μJ 到几 mJ, 为了提升脉冲峰值功率, 激光脉冲宽度通常在百 ps 到几 ns 量级, 这种高重频窄脉宽窄线宽微脉冲多光束的新型固体激光器将成为未来星载单光子体制测高应用主流技术和激光器。NASA 目前正在研制、预计于 2025 年发射的高精度地貌观测激光雷达 (LIST 计划), 将同时搭载多台激光器, 并且每台激光器输出光束被平均分成多光束 (目前已通过衍射光学元件分成 16 路光束), 其单路激光束脉冲能量 50 μJ , 脉冲宽度 1 ns, 重复频率 10 kHz。LIST 计划正在研制的一个激光器方案为 1330 nm 主振荡加上功率放大器的方案 (Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA), 利用 Yb:YAG 微片激光器作为种子源, Cr^{4+} :YAG 作为被动调 Q 器件, LD 泵浦波长为 940 nm, 放大级结构采用平面波导型 Yb:YAG 增益介质, 16 束的多光束激光分束采用衍射光学元件分束技术^[36-37], 如图 6 所示。

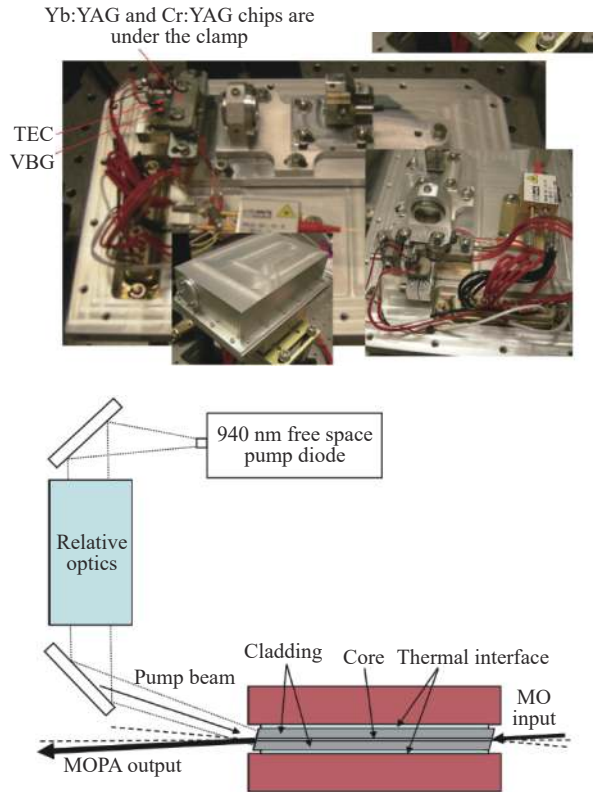


图 6 LIST 项目激光器采用的主振荡功率放大器结构^[37]

Fig.6 Schematic layout of the MOPA in the LIST mission^[37]

1.3 LD/光纤/固体相融合的技术体制是空间固体激光器的一个发展方向

为有效发挥 LD、光纤和 Nd:YAG 固体激光器等单位技术各自的优势性能, 弥补单一固体激光器泵浦和散热结构、吸收和增益性能的限制和不足, 基于光纤耦合端面泵浦的 LD/光纤/固体相融合的新型空间激光器也逐步成为研究方向之一。这种融合的激光器方案通常采用尾纤耦合输出的 LDA 作为泵浦源, 结合端面泵浦结构, 以实现对称泵浦方式和较长泵浦聚焦深长度, 并且使泵浦光在激光晶体中的光斑大小和激光器在该处的基模大小接近, 实现较好的模式匹配, 从而达到较高的光束质量和泵浦及增益效率。

欧洲航天局开展的水星激光测高仪 (BELA) 计划采用了光纤耦合 LD 端面泵浦的主振荡器加上双程功率放大器的技术方案, 激光晶体采用 Nd:YAG 圆棒, Cr^{4+} :YAG 被动调 Q, 主振荡器获得了 2.4 mJ, 2.8 ns 和近衍射极限 ($M^2=1.2$) 输出, 一级放大输出 25 mJ, 二级放大输出 55 mJ, 放大器转换效率达到 25%^[38], 如图 7 所示。

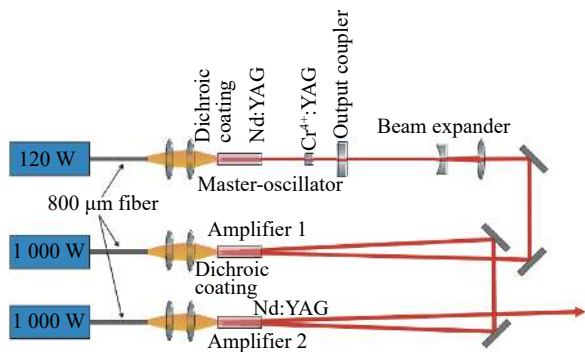


图 7 BELA 的主振荡器双程功率放大器结构^[38]

Fig.7 BELA laser design of master oscillator power amplifier^[38]

ICESat-2 卫星搭载的激光测高仪也采用了高重复频率光子计数的测距方式。ICESat-2 激光器同样采用了 LD 光纤耦合端面泵浦的固体激光器技术方案,增益介质采用 Nd:YVO₄ 晶体,振荡级采用 RTP 主动调 Q 方式实现 10 kHz 高重复频率运转,光纤耦合的 880 nm LD 作为泵浦源,以同带泵浦方式避免了非辐射跃迁,降低了量子亏损,提高了激光器的效率。两级放大后,1064 nm 基频光达到了 1.8 mJ, 然后进行 LBO 晶体倍频,获得了 1.2 mJ 的 532 nm 激光输出,倍频效率达到了 67%,激光器脉冲宽度小于 1.3 ns,整机插头效率达到了 5%,是一台性能优异的新型空间固体激光器^[39],如图 8 所示。

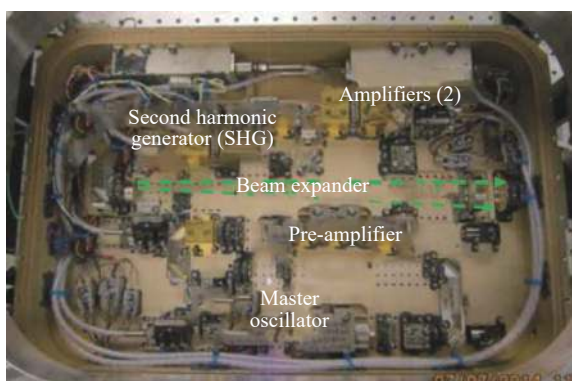


图 8 ICESat-2 搭载的 ATLAS 激光器结构^[39]

Fig.8 Overview design of ATLAS laser on the ICESat-2^[39]

除了上述发展现状之外,星载激光测高应用需求的空间固体激光器还有高光束质量、高峰值功率、窄脉宽等输出性能要求,以满足星载远距离测距应用需求。另外,单光子探测体制的星载激光测高系统还对空间固体激光器有着高重复、窄线宽的特殊要求,这些性能要求决定着空间固体激光器的研究方案、技术

途径和发展现状。

2 星载激光测高仪固体激光器关键技术突破

随着线阵、面阵等多路阵列信号探测处理技术的发展成熟,单光子阵列推扫式探测体制的激光雷达技术成为近年来国内外研究的热点。该体制激光雷达可以获得大视场、高速率、高精度和高分辨率的目标信息,相对传统激光雷达具有很大的优势和潜能,但也对激光源提出了新的技术要求,包括具备高重复频率、高峰值功率、窄脉宽和多波束阵列输出等典型特征。

为满足该类型激光雷达的光源需求,笔者所在团队在专项课题资助下,使用全国产元器件,采用种子注入掠入射放大结构的 MOPA 激光器和大口径高分束阶二维衍射分束器(DOE),将近衍射极限的单光束分束成 50×2 交错排列的多光束阵列输出。图 9 为多光束激光器实物,右侧为传导冷却的 MOPA 激光头,左侧为一体装配的 50 倍光学发射天线及多光束分束器。



图 9 高重复窄脉冲多光束输出激光器实物

Fig.9 Prototype of high repetition narrow pulse multi-beam output laser

MOPA 激光器振荡级采用脉冲泵浦的 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器,突破了高重复脉冲泵浦微晶片激光器技术获得线宽 0.02 nm (中心波长为 1064.28 nm)、脉冲宽度 0.8 ns、重复频率 7 kHz、近衍射极限光束质量的种子光,然后采用高增益高效率掠入射激光放大技术,通过将种子光进行光束整形和增益区域匹配,两次掠入射注入 Nd:YVO₄ 薄板条晶体放大,实现了单脉冲能量>1 mJ (平均功率为 7.3 W) 的

近衍射极限光束质量的放大级激光输出。最后对输出激光进行光束整形和 50 倍光束扩束, 采用基于衍射光学技术的大口径 DOE 分束器件对激光进行多光束阵列分束输出。该样机在 25 °C 连续工作 1 h, 测得中心波长稳定在 1064.28 nm、谱线宽度 0.02 nm 且无明显 ASE 效应, 输出能量 (功率) 稳定性达到 98.4%, 重复频率稳定在 7 kHz, 重频抖动小于 10 Hz, 脉冲宽度稳定在 0.8 ns。图 10~图 13 为激光器指标测试数据。

激光器以 7 W 平均功率输出时, 输出光经 DOE 器件分束获得了 50×2 交错排列的远场光斑, 如图 13 所示。分束后的子光束的能量不均匀性 <11%、子光束发散角约为 40 μrad、子光束之间夹角不均匀性小于 2%, 衍射分束输出效率达 85%。

该激光器在光谱稳定性、重复频率和脉冲稳定性、子光束能量均匀性、子光束夹角均匀性等方面均

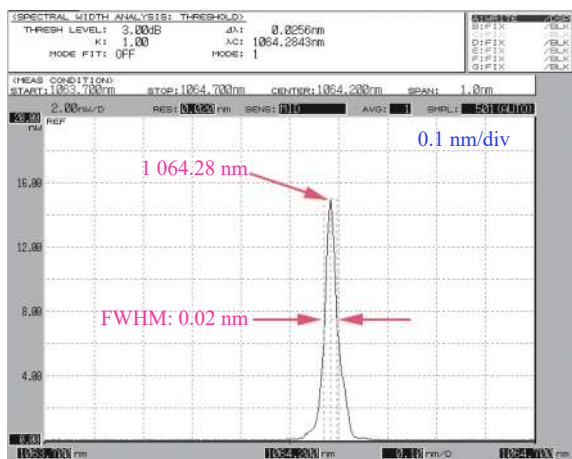


图 10 7 kHz 重频连续工作输出光谱

Fig.10 Output spectrum while working at 7 kHz repetition frequency

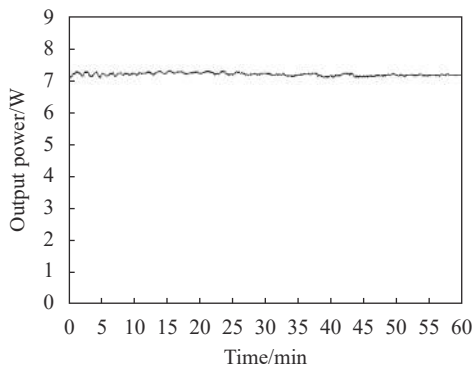
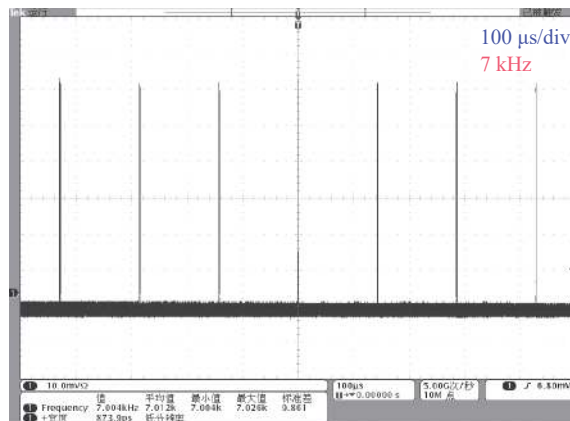


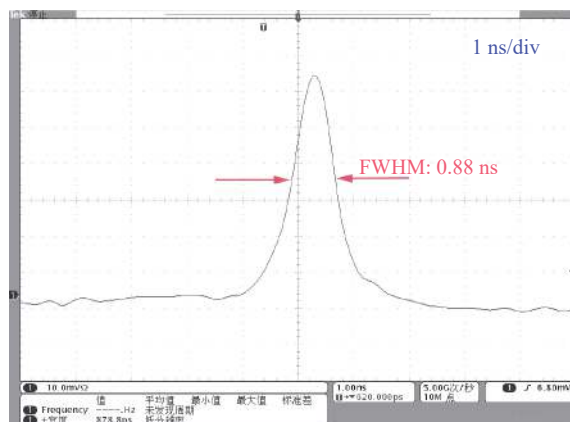
图 11 7 kHz 重频连续工作 1 h 输出平均功率

Fig.11 Output average power while working at 7 kHz repetition frequency



(a) 重复频率

(a) Repetition frequency



(b) 脉冲宽度

(b) Pulse duration

图 12 连续工作重复频率和脉冲宽度

Fig.12 Repetition frequency and pulse duration

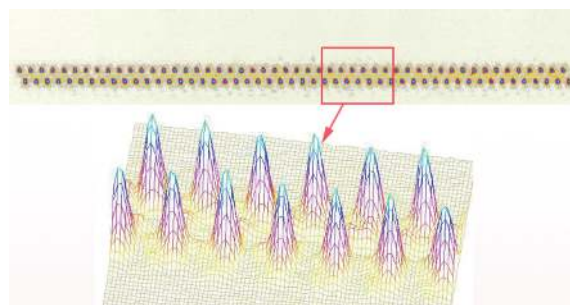


图 13 分束输出光斑远场排列

Fig.13 Far field profile of multi beam array output

达到了较高水准, 可满足单光子推帚式探测体制的激光雷达对光源的技术要求。

3 星载激光测高仪固体激光器技术展望

固体激光器是支撑卫星激光测高系统实现多功

能与高性能在轨运行的核心组件和关键技术。现有机制的激光器,几乎穷尽了各种激光器技术路线与方案,但迄今尚未根本解决激光器的效率低、功能单一应用受限、远距离亮度不够和可靠性差寿命短等问题,还需要进一步突破超高亮度、超短脉冲和光谱可控等固体激光器前沿关键技术。未来可通过“基于 AI 人工智能多参数调控、多技术融合、多光束束束和多激光器阵列结构”等设计思想有望解决上述难题与挑战,这也是未来空间固体激光器发展的基本思路与方向。随着未来卫星激光测高应用需求的不断拓展与激光器技术的不断进步,空间固体激光器将呈现如下的发展态势。

(1) 突破新型空间激光器机理与技术。重点发明低量子亏损、高激光增益、不通过非线性直接产生敏感光子波长、光光转换效率大于 70%(电光转换效率大于 10%) 的新型固体激光器,不断提升激光器的插头效率与光谱兼容性,适应空间环境固体激光器具有高效率、多波长、高平均功率与高峰值功率输出的能力;获取更高的频域特性(超短波、超长波、可调谐、单频、宽光谱等)、时域特性(超快、超强峰值等)和能量域特性(高亮度、高功率与高能量等)。

(2) 突破空间固体激光器多功能一体化设计技术。由于激光测高对不同目标测距、定位、测绘等功能需要有不同的性能指标的独立激光器,未来卫星激光测高系统发展方向需要兼具激光雷达、激光通讯、激光对抗及其武器等多功能,因此对空间激光器指标多样性与可控性提出来了特殊的要求。随着半导体技术、非线性材料、晶体波导激光器、量子级联激光器和光纤激光技术进步极大推动了空间激光器在波段拓展可调谐及线宽、脉宽、能量、重复频率等技术指标上不断提高性能,满足激光测高雷达武器综合系统具备“侦察-通讯-打击”一体化的功能。

(3) 突破空间固体激光器轮时值守长寿命技术。随着卫星在轨运行寿命的延长、激光测高系统三维影像测绘的日益精细化以及空间固体激光器结构复杂度的增加,空间固体激光器的可靠性与寿命问题面临新的挑战。由于空间激光器具有不可修复性与工作不间断性特点,因此在激光器结构设计中,必须考虑采用并行备份或轮时值守等设计思路,相对延长空间固体激光器的寿命。

(4) 突破空间固体激光器互注入自组织自锁相技术。激光相干合成技术及其应用始终是激光技术应用领域永恒的追求,被动互注入锁相具有结构简单、合束效率高和易于定标放大,且具有自组织、自约束、稳定性好等诸多优点^[40-42]。多光束激光在多通道相同或不同增益介质中相互注入振荡强迫形成共振器,尤其是在光纤激光器、固体激光器与晶体波导激光器融合方案中,可获得自组织自锁相高能相干光输出或多波长混叠高能非相干光输出,极具空间前沿应用的潜力与趋势。

4 结 论

星载激光测高可实时生成高精度复杂地形与地貌的三维数字影像地图,正在为人类探测地球、探索与利用太空资源发挥着愈来愈重要的作用。固体激光器作为卫星激光测高的重要载荷与核心组件,既要兼顾技术的成熟性与先进性,又要突出适应空间环境高可靠性、长寿命免维护以及小型轻量化等特殊要求,其经历了由低重频、大能量、点源探测向高重频、窄脉宽、窄线宽、多光束、多光谱、单光子阵列探测的发展历程,其相关技术的发展动向与展望对于推动卫星型号及后续应用具有重要的基础性作用。

参 考 文 献:

- [1] Huang Genghua, Ding Yuxing, Wu Jincai, et al. Design and implementation of key technology of GF-7 Satellite laser altimeter subsystem [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(3): 68-73. (in Chinese)
黄庚华, 丁宇星, 吴金才, 等. 高分七号卫星激光测高仪分系统关键技术设计与实现[J]. *航天器工程*, 2020, 29(3): 68-73.
- [2] Cao Haiyi, Zhang Xinwei, Zhao Chenguang, et al. System design and key technologies of the GF-7 satellite [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(5): 1-9. (in Chinese)
曹海翊, 张新伟, 赵晨光, 等. 高分七号卫星总体设计与技术创新[J]. *中国空间科学技术*, 2020, 40(5): 1-9.
- [3] Meng Junqian, Zhang Xin, Jiang Jing, et al. Design of laser transmitter for GF-7 satellite laser altimeter [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(3): 96-102. (in Chinese)
孟俊清, 张鑫, 蒋静, 等. 高分七号卫星激光测高仪激光器设计[J]. *航天器工程*, 2020, 29(3): 96-102.
- [4] Yu A W, Li S X, Shaw G B, et al. Overview of space qualified solid state lasers development at NASA Goddard Space Flight

- Center[C]//Proc of SPIE, 2009, 7193: 719305.
- [5] Patricia D. Lidar in space: From Apollo to the 21st century [J]. *Optics & Photonics News*, 2009, 20(6): 30-35.
- [6] Si Xuewu. Mars observer detector [J]. *Aerospace China*, 1994(5): 17-19. (in Chinese)
司学武. 火星观察者探测器[J]. 中国航天, 1994(5): 17-19.
- [7] Qiu C B, Sun Y K, Wang Y M, et al. Development of near earth asteroid mining and planetary defense [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(1): 63-72.
- [8] Perna D, Barucci M A, Fulchignoni M, et al. A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening [J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 157: 82-95.
- [9] Xie Dongping, Li Guoyuan, Zhao Yanming, et al. U.S. GEDI space-based laser altimetry system and its application [J]. *Space International*, 2018, 12: 40-44. (in Chinese)
谢栋平, 李国元, 赵严铭, 等. 美国GEDI天基激光测高系统及其应用[J]. 国际太空, 2018, 12: 40-44.
- [10] Afzal R S. Performance of the GLAS laser transmitter[C]// Proc of SPIE, 2006, 6100: 20.
- [11] Jester P L. The ICESat/GLAS instrument operations report, NASA/TM-2012-208641/Vol.4[R]. Maryland: Goddatd Space Flight Center, 2012.
- [12] Tang Xinmin, Li Guoyuan. Development and prospect of laser altimetry satellite [J]. *Space International*, 2017, 11: 13-18. (in Chinese)
唐新明, 李国元. 激光测高卫星的发展与展望[J]. 国际太空, 2017, 11: 13-18.
- [13] Li Guoyuan, Tang Xinmin. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(7): 1939-1949. (in Chinese)
李国元, 唐新明. 资源三号02星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(7): 1939-1949.
- [14] Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Super-resolution reconstruction of Chang 'e-1 satellite CCD stereo camera images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 404-408. (in Chinese)
张磊, 杨建峰, 薛彬, 等. 嫦娥一号卫星CCD立体相机影像超分辨率重建算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 404-408.
- [15] Deng Yongchun. SELENE detector opens a new chapter in Japan's lunar exploration [J]. *Space International*, 2007, 11: 14-16. (in Chinese)
郑永春. “月女神”探测器揭开日本月球探测的新篇章[J]. 国际太空, 2007, 11: 14-16.
- [16] Sridharan R, Das T P, Ahmed S M, et al. Spatial heterogeneity in the radiogenic activity of the lunar interior: Inferences from CHACE and LLRI on Chandrayaan-1 [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 168-178.
- [17] Lori A M, Kelly M B. Performance analysis of airborne photon counting lidar data in preparation for the ICESat-2 mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(5): 2911-2918.
- [18] Markus T. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept and implementation [J]. *Remote Sens Environ*, 2017, 190: 260-273.
- [19] Li Song. Recent progress of spaceborne laser altimeter system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(6): 4-6. (in Chinese)
李松. 星载激光测高仪发展现状综述[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(6): 4-6.
- [20] Yu A W, Krainaka M A, Harding D J, et al. Spaceborne laser instruments for high-resolution mapping[C]//Proc of SPIE, 2012, 7578: 757802.
- [21] By T K, Kikuo ABE, Tomomi H, et al. LALT: Laser Altimeter for Luna Exploring Satellite SELENE [J]. *NEC Res & Develop*, 2003, 2(44): 175-180.
- [22] Ping Jinsong, Huang Qian, Yan Jianguo, et al. The lunar topographic model CLTM-s01 from the Chang'E-1 laser altimeter [J]. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2008(11): 1601-1612. (in Chinese)
平劲松, 黄倩, 鄢建国, 等. 基于嫦娥一号卫星激光测高观测的月球地形模型CLTM—s01[J]. 中国科学G辑: 物理学力学天文学, 2008(11): 1601-1612.
- [23] Li Li, Zhao Xingcheng. Discovery of "Moonback"-approaching Chang 'e-4 CMOS camera in live broadcast [J]. *Aerospace China*, 2019(1): 15-16. (in Chinese)
李莉, 赵兴成. 直播“月背”探索发现——走近“嫦娥”四号 CMOS相机[J]. 中国航天, 2019(1): 15-16.
- [24] Wang Jia, Wu Weiren, Li Jian, et al. Vision based Chang 'e-4 landing point localization [J]. *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 41-53. (in Chinese)
王稼, 吴伟仁, 李剑, 等. 基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位[J]. 载人航天, 2020, 50: 41-53.
- [25] Shi Xiangchun, Chen Weibiao, Hou Xia. Application of all solid state laser in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 127-131. (in Chinese)
施翔春, 陈卫标, 侯霞. 全固态激光技术在航天领域的应用[J]. 红外激光工程, 2005, 34(2): 127-131.
- [26] Afzal R S. Mars observer laser altimeter: laser transmitter [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(15): 3184-3188.

- [27] Cavanaugh J F. The mercury laser altimeter instrument for the MESSENGER mission [J]. *Space Science Reviews*, 2007, 131: 451-479.
- [28] Yu A W, Stephen M A, Li M A, et al. Space laser transmitter development for ICESat-2 Mission[C]//Conference on Solid State Lasers XIX: Technology and devices, SPIE, 2010, 7578: 757809.
- [29] Abshire J B, Ketchum E A, Afzal R S, et al. The geoscience laser altimeter system (GLAS) for the ICESat mission[C]//Lasers and Electro-Optics, 2000: 602-603.
- [30] Yao Jiaqi, Gao Xiaoming, Li Guoyuan, et al. Cloud optical depth inversion of echo energy data based on ICESat/GLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S117009. (in Chinese)
么嘉祺, 高小明, 李国元, 等. ICESat/GLAS回波能量数据的云光学厚度反演[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S1): S117009.
- [31] Stysley P R, Coyle D B, Kay R B, et al. Lifetest of the high output maximum efficiency resonator (HOMER) Laser for the SAFFIRE Instrument on NASA's DESDynl Project[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (Cleo), 2011: JWA47.
- [32] Li Ran, Wang Wei, Su Guozhong, et al. Development and applications of spaceborne LiDAR [J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25: 58-63. (in Chinese)
李然, 王威, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. *科技导报*, 2007, 25: 58-63.
- [33] Koechner W. Solid-State Laser Engineering[M]. New York: Springer, 2006.
- [34] Timothy D C. NEAR laser rangefinder: a tool for the mapping and topologic study of asteroid 433 Eros [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1998, 19(2): 142-157.
- [35] Hovis F E. Qualification of the laser transmitter for the CALIPSO aerosol lidar mission[C]//Proc of SPIE, 2006, 6100: 61001X-1.
- [36] Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 1-16.
- [37] Anthony W Y, Alexander B, Michael A, et al. Highly efficient Yb:YAG master oscillator Power Amplifier [J]. *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices Technical Digest*, 2012, 9: 1.
- [38] Neumann J, Hahn S, Hub R, et al. Compact, highly efficient, passively Q-Switched Nd: YAG MOPA for Spaceborne Bepi Colombo Laser-Altitude [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, 2006: CWF1.
- [39] Hagopian J, Bolcar M, Chambers J, et al. Advanced topographic laser altimeter system (ATLAS) receiver telescope assembly (RTA) and transmitter alignment and test [C]//Proc SPIE, 2016, 9972: 997207.
- [40] Cheng Y, Liu X, Wang Q, et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid-state lasers based on corner cube [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5150-5152.
- [41] Cheng Y, Liu X, Liu Y, et al. Coherent characteristics of solid-state lasers with corner cubes [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(15): 3267-3272.
- [42] Soulard R, Quinn M N, Tajima T, et al. ICAN: A novel laser architecture for space debris removal [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 192-200.