

全固态激光技术在航天领域的应用

施翔春, 陈卫标, 侯霞

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:回顾了空间固体激光应用系统的发展,以激光雷达和激光测高仪为主,介绍了国外几种典型应用系统的性能、指标及其全固态激光发射器的关键技术。最后介绍了我国探月工程中激光测高仪的研制情况。

关键词: 固体激光; 激光雷达; 激光测高仪; 空间激光

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0127-05

Application of all solid state laser in space

SHI Xiang-chun, CHEN Wei-biao, HOU Xia

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The development of solid state laser application in space is reviewed. The performance and specifications of several lidar and laser altimeter are introduced. The laser transmitters of these system are described. And then, the designing and building progress of the laser altimeter in Chang'er I Project is presented.

Key words: Solid state laser; Lidar; Laser altimeter; Laser in space

0 引言

自从激光问世以来,已经逐渐成为空间技术领域用于解决各种工程及科学问题的重要工具,20世纪90年代以前,大部分激光应用系统都是地基装置,最早的天基激光装置可以追溯到 Apollo 登月工程,在1971~1972年间发射的 Apollo15、16和17号飞船上,均搭载了闪光灯泵浦的红宝石激光高度计。然而,闪光灯泵浦器件的寿命和效率问题极大地限制了它在空间环境中的应用,据报道,Apollo上的激光高度计寿命仅为 10^4 个脉冲。

高功率、高亮度、高效率激光二极管的出现,使固

体激光技术取得了重大突破,采用激光二极管作为泵浦源的全固态激光器件,具有结构紧凑、质量轻、寿命长、效率高等特点,非常适合空间环境的应用。由此,引发了天基及星载激光装置的广泛应用。下面简要介绍美国的几项以固体激光器为基础的太空激光应用项目。

1 太空激光雷达技术实验

1994年10月,全球第一套地球轨道激光雷达系统随“发现”号航天飞机升空,该计划被命名为“LITE”(Lidar In-Space Technology Experiment),整个系统的结构如图1所示^[1]。发射光源为10 Hz重复频率的Nd:

YAG 激光器,经二倍频和三倍频后,得到波长 1064、532 及 355 nm 的激光。背向散射光由 1 m 口径的 Cassegrain 望远镜收集,三个波长经一系列分束镜分离,分别成像到不同的探测器上。整个装置重 1814 kg,功耗 3 kW。表 1 为 LITE 系统的主要参数^[2]。

表 1 LITE 系统参数

Tab.1 System parameter of LITE

Parameters	Value		
Laser transmitter module			
Output wavelength/nm	1064	532	355
Output energy/mJ	486	460	196
Beam divergence/mrad	0.9	0.6	0.6
Beam quality(XDL)	5.0	4.5	5.5
PRF(all wavelengths)	10 pulses/s		
Pulse width/ns	27	27	31
Telescope			
Primary mirror/m	φ0.946		
Secondary mirror/m	φ0.057		
Focal length/m	4.83		
Focal ratio	f/5.1		
Obscuration ratio	0.11		
Aft optics/nm			
	1064	532	355
Nighttime/daytime measurements:			
Optical throughput/%	58/29	49/20	49/6
Color filter BW/nm	675/1	265/0.3	60/1
Interference filter transmission/%	50	40	12
Detector quantum efficiency/%	33	14	21
Field of view(all wavelengths)	Selectable:1.7 mrad, 3.4 mrad, 5.6 mrad,and blocked		

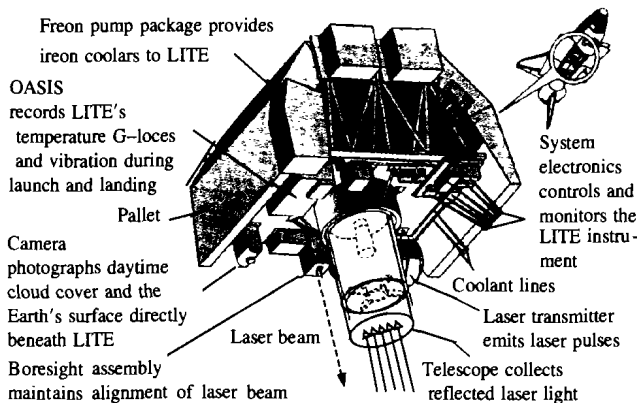


图 1 LITE 系统装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of LITE system set

激光发射单元(LTM)包括两台独立的激光器,两台激光器互为备份,以保证一台激光器失效时整个系统仍能正常工作,但由于功耗的原因,两台激光器不能同时工作。激光器采用的是闪光灯泵浦的调 Q、Nd:YAG 激光器,激光器为振荡-放大结构,由振荡器和两级放大器组成,采用 CD*A 和 KD*P 晶体实现二倍频和三倍频。激光器设计的核心在于适应太空环境的挑战,所有的光学元件、电子器件、机械结构以及热控系统均放置在同一个密封的容器中,以减小各个部件之间的温度差;所有的光学元件包括激光棒、闪光灯、Pockels 盒、谐波产生晶体等都以一种坚固、可调整并可以锁定的结构安装在一个内部蜂窝状的铝制光具座上。失重环境下,弹簧结构是必须尽量避免的。另外,系统设计时,对于失重条件可能对光路准直、冷却液的流动、热对流等等产生的影响都加以考虑。

整个任务历时 10 天,共进行了 43 h 的单个测量和 53 h 的 100 点平均测量。测量对象涉及云层、风暴、对流层及平流层悬浮颗粒、燃烧产生的烟尘、由风暴带到对流层下部的沙漠尘埃以及各种地表特征。尽管 LITE 只是一套实验系统,但其获得的成果和经验为未来长期天基激光雷达系统开创了广阔的前景。

2 火星观测者计划

1992 年 9 月 25 日发射的“火星观测者”(Mars Observer)号飞船上搭载了有史以来的第一套天基激光二极管泵浦的固体激光系统——“火星观测激光高度计”(Mars Observer Laser Altimeter, MOLA), MOLA 的激光器由 McDonnell-Douglas Electronics Systems Company 设计制造,采用 LD 泵浦的 Cr:Nd:YAG 板条,电光调 Q,正交 Porro 棱镜谐振腔。激光器结构如图 2 所示^[3]。

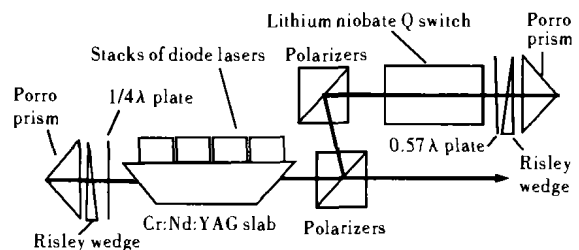


图 2 MOLA 激光器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of MOLA laser

正交 Porro 谐振腔尽管腔内损耗比较大,但其失调灵敏度非常低,对于避免飞船发射时振动带来的影响很有益处。1%掺杂的 Nd:YAG 晶体中掺杂了 0.05%的 Cr,目的是提高晶体的抗辐射性能。晶体横截面尺寸 3.4 mm × 3.4 mm,长边 5.7 cm,短边 4.6 cm,布儒斯特角切割,振荡光在晶体板条中反射 9 次。泵浦源为 4 个 11 条的激光二极管阵列,重复频率 10 Hz,泵浦脉冲宽度 150 μs,室温下泵浦峰值功率 1760 W。

十分遗憾的是“火星观测者”号飞船在预计进入环绕火星轨道前 3 天与地面失去了联系,飞船上载荷

的工作情况也未得到检验。

1996 年 11 月 7 日,“火星全球监测”(Mars Global Surveyor, MGS)飞船升空,再次开始火星探测之旅,并于 1997 年 9 月 11 日到达火星。这次,飞船上同样搭载了激光高度计,仍称为 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter)。表 2 是整个系统的性能指标。

这次任务激光高度计工作情况很好,设计的测量高度是 400 km,实际上在 785 km 的高度仍能够正常工作。

表 2 火星轨道激光高度计性能指标

Tab.2 Performance index of laser altimeter in Mars orbit

Parameter	Value
Physical Characteristics	
Volume/m ³	0.15
Mass /kg	26.18
Power(total) /W	28.74
Heater Power /W	10.00
Laser transmitter	
Laser type(Nd:YAG*)	Q-switched,diode-pumped
Wavelength/μm	1.064
Laser energy/mJ pulse ⁻¹	40~30
Laser power consumption/W	13.7
Pulse width (FWHM**) /ns	~8.5
Pulse repetition rate/s ⁻¹	10
Beam cross-section/mm ²	25×25
Beam divergence/mrad	0.25
Altimeter receiver	
Telescope type	Cassegrain
Telescope diameter/m	0.5
Focal length/m	0.74
Detector type(Si APD)	Silicon avalanche photodiode
Sensitivity/nW	1
Optical filter (bandpass) /nm	2.2
Field of view/mrad	~0.85
Receiver electronics	
Time resolution/ns	10
Range resolution/m	1.5

3 地理科学激光测高系统

地理科学激光测高系统 (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)是第一台用于连续全球观测的激光测距系统,于 2003 年 1 月 12 日随 ICESat (Ice Cloud and Elevation Satellite) 卫星升空,其主要目的是测量两极冰盖形貌、云层及大气特性以及对短期精确天气预报至关重要的云层高度和厚度的测量。

GLAS 的激光器是在 MOLA 的基础上发展起来的,但在性能指标上已全面超过 MOLA。表 3 是 GLA 激光器的性能指标^[4,5]。

表 3 GLAS 激光器的性能指标

Tab.3 Performance index of GLAS laser

Property	Specification	Vacuum
Reference temperature/°C	-	29.7
Pulse energy	110 mJ	111
@1064 nm	75 mJ	77
@532 nm	35 mJ	34
Wavelength(vacuum)	λ ₁ =1064.5 nm±100 pm	1064.5
	λ ₂ =532.2 nm±50 pm	532.25
λ ₂ linewidth(FWHM)	≤15pm shot-to-shot	0.81
Center wavelength jitter	pm(1σ)	0.1
Pulsewidth@1064 nm	<6 nm	6.3
Divergence@1064 nm	110(+23,-10) μrad	113
Far field circularity	>0.67	0.63
Pointing jitter	±11 μrad(1σ)	±4, max=20
Prime power @30 V	<115 W	113
Mass	15.1 kg	15.2
Volume/cm ³	54 × 15 × 25	54 × 15 × 25

激光器采用 MOPA 结构,主振荡器由两个 100 W 的准连续激光二极管泵浦,被动调 Q,产生 40 Hz、2 mJ、宽度 5 ns 的近衍射极限 ($M^2 < 1.1$) 的光脉冲,经 2 倍望远镜扩束,注入由 8100 W 激光二极管泵浦预放级,双程放大后得到的 15 mJ, $M^2 \approx 1.4$ 的光脉冲,再经过 2 倍扩束,进入 44100 W 泵浦的功放级,双程放大后达到 110 mJ, $M^2 \approx 1.8$ 。最后输出的光束由 LBO 晶体倍频,设计倍频效率 30%。

GLAS 采用 1064 和 532 nm 双波长激光器,可以获得更多的信息,不仅能测量冰层形态,还可以测量云层高度和垂直结构、大气尘埃、地表起伏、反射率、植被高度、雪层及海冰的表面特性。

4 低成本自主攻击系统

许多科技进步的最新成果会首先应用于军事领域,全固态激光技术也不例外。激光制导武器在最近几次局部战争中扮演了重要的角色。然而目前的激光制导武器大多数属于半主动式,即激光发射和接收装置是分离的,当激光制导武器攻击目标时,需要外部的激光指示器照射目标,位于弹体上的接收系统接收目标的反射光,实现导引。全固态激光技术的出现,使一定功率的激光器的体积可以做到足够小,完全可能装到弹体上,从而使全主动式激光制导武器成为可能。

最具代表性的例子就是美国空军于 1998 年开始研制的低成本自主攻击系统 (Low Cost Autonomous Attack System, LOCAAS)。与其说 LOCAAS 是一种导弹,不如说是一架无人驾驶的飞机。它可以在 180 km 以外发射,以 370 km/s 的速度飞行,在高度 230 m 左右,对 50 km² 范围内的目标实施攻击。LOCAAS 在飞行的初段和中段,采用 GPS/INS 制导,进入目标上空区域后,激光成像雷达系统启动,扫描下方地面,获得三维成像信息,其分辨率可以达到 15 cm (距离 1 km),弹上的处理器不断将激光雷达获得的信息与储存在程序中的文件相对比,一旦发现相匹配的目标,将对目标发起攻击。GPS/INS 与激光主动制导的结合,不仅使得 LOCAAS 真正实现“发射后不用管”(半主动激光制导必须保持激光指示器始终照射目标,直

到导弹击中目标),而且还具有高度的智能化,它能够从空中大范围地监视目标群,识别、选择最具威胁的目标予以攻击,高分辨率的激光雷达系统可以在武器飞向目标时,不断调整攻击的部位和角度,命中最要害的部位。LOCAAS 的激光雷达系统的具体结构参数目前还不清楚,但可以肯定它采用的是激光二极管泵浦的固体激光发射器。

5 “嫦娥工程”月球轨道激光高度计

国内固体激光技术在航天领域也得到了广泛的应用,如卫星激光测距机等,然而到目前为止,还仅限于地面装置,我国还没有一套完整的激光应用系统进入太空。目前正在研制中的“嫦娥 1 号”的有效载荷之一——月球轨道激光高度计很有可能成为我国第一套进入太空的固体激光应用系统。

月球轨道激光高度计与二维 CCD 相机配合,绘制月球表面的三维立体地形图,是“嫦娥工程”一期的四大科学目标之一。中国科学院上海技术物理所负责整个系统的总体研制,上海光学精密机械研究所承担其中激光发射器的研究。

根据高度计整体指标的要求,激光器性能指标设计如下:

工作波长 1.06 μm ; 波长稳定度 ± 3 nm; 单脉冲能量 150 mJ; 脉冲宽度 5~7 ns; 脉冲重复频率 1 Hz; 激光发散角 < 1.5 mrad; 波束指向稳定度 $\leq \pm 0.5'$ 。

针对上述指标,参考国外星载激光器的技术路线,综合考虑国内研制水平、加工工艺等,选择的方案为:电光调 Q、激光二极管泵浦的 Nd:YAG,直角棱镜和平面输出镜的谐振腔形式和直线结构。

采用激光二极管泵浦、电光调 Q 的固体 Nd:YAG 激光器,是一项比较成熟的技术,已被国内外广泛采用,利用 Porro 棱镜改善激光器的失调灵敏度也是军用激光器中经常采用的技术。整个激光器分成头部和电子学两大部件。激光头部安装谐振腔光学、扩束镜、电光调 Q 线路、激光能量检测电路;电子学部件安装激光控制线路,电源和储能模块。激光器的组成如图 3 所示。激光器的具体结构如图 3 所示。

2003 年 10 月,我们完成了高度计激光发射器模

样的研制工作,结果如表 4 所示。

对于模样样机,分别进行了辐照、热真空、热循环试验以及力学环境试验。通过模样的研制,暴露出了一些问题,如激光探头结构的局部变形,输出稳定性受温度影响较大,激光输出发散角偏大,调 Q 用电子元器件不能满足航天要求等。

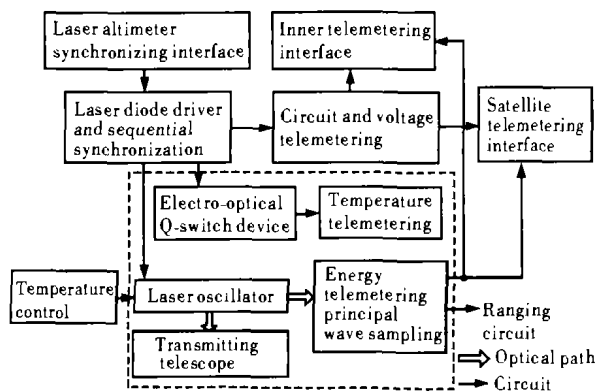


图 3 激光器的整体组成框图

Fig.3 Block diagram of laser

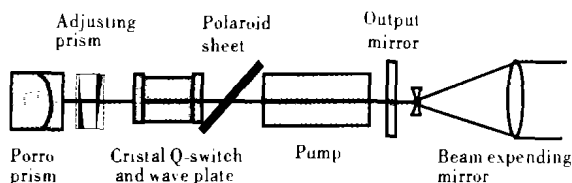


图 4 激光器头部的光学安排

Fig.4 Optical arrangement of laser head

表 4 高度计激光发射器模样参数

Tab.4 Several parameters of almiter laser transmitter sample

	Item	Parameter
Basic technical parameter	Pulse energy	Average value 162 mJ
	Energy stability	0.4%
	Pulse width	5.3 ns
	Divergence angle	x direction : 3.4 mrad y direction : 3.6 mrad
Basic physical parameter	Weight	Laser probe: 3.3 kg, Circuitry box: 2 kg
	Size	Laser probe: 270 mm×170 mm×70 mm

6 结束语

针对上述问题,在初样设计时,均考虑了相应的改进措施。目前初样的研制工作正在进行,下面是取得的一些初步成果:

脉冲能量 182 mJ; 能量稳定性±2%; 脉冲宽度 6.0±0.9 ns; 发散角 X 方向 0.973 mrad, Y 方向 1.268 mrad; 电光效率 11%。

目前,国内全固态激光技术发展得很快,在工业、国防、娱乐、科研等领域得到了越来越广泛的应用。但从工程化的角度来看,国内在工艺、可靠性等方面与国际先进水平还存在较大的差距,例如,作为全固态激光器核心部件的高功率激光二极管,在芯片筛选、封装工艺、散热结构等方面,还不能完全满足航天应用的苛刻要求,因此,在开展基础性、创新性研究的同时,在工程化方面开展重点攻关,对于推动全固态激光技术在航天领域的应用是十分必要的。

参考文献:

- [1] McCormick M P, Hostetler C A. LITE-The first spaceborne lidar [A]. Proceedings of the 2nd Topical Symposium on Combined Optical-Microwave Earth and Atmosphere Sensing[C]. 1995, 163. 3-6.
- [2] Couch R H, Rowland C W, Ellis K S. Lidar In-Space Technology Experiment(LITE): NASA's first in-space lidar system for atmospheric research[J]. Optical Engineering, 1991, 30: 88.
- [3] Afzal R S. Mars Observer Laser Altimeter: laser transmitter[J]. Applied Optics, 1994, 33: 3184.
- [4] Afzal R S, Dallas J L, Yu A W, et al. The Geoscience Laser Altimeter System Laser Transmitter[A]. CLEO[C]. 2000, 50.
- [5] Afzal R S, Dalla J L, Lukemire A, et al. Space Qualification of the Geoscience Laser Altimeter System Laser Transmitter[A]. CL EO [C]. 2002, 427.