



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

空间应用激光器

陈卫标 侯霞 编著

Laser in Space Application



国防工业出版社

National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

空间应用激光器

陈卫标 侯 霞 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

空间应用激光器具有独特的运行环境,需要采用特殊的设计方法、研制方法,属国际研究热点,其研究在我国尚处于起步阶段。本书综述了空间应用激光器国内外的发展现状,已经发射的空间应用激光器设计技巧、运行结果;阐述了空间应用激光器所应用的基础材料的特性,特别是在空间环境下的特性;介绍了普遍应用的空间激光测距仪所涉及的空间应用激光器的设计、研制;描述了对地观测所采用的空间应用激光器,包括其对波长、频率等的特殊要求;介绍了空间激光通信、空间姿态测量以及空间科学等应用领域所需的特殊种类的空间应用激光器,包括其设计和研制结果;阐述了空间应用激光器的设计要点和注意事项,并特别研究了空间应用激光器的可靠性设计。

本书可供从事空间激光科学技术研究和拟利用空间应用激光器开展空间应用研究的科技工作者阅读,也可作为相关专业的大学生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空间应用激光器/陈卫标,侯霞编著. —北京:国防工业出版社,2016. 11

(现代激光技术及应用)

ISBN 978 - 7 - 118 - 11174 - 3

I. ①空… II. ①陈… ②侯… III. ①激光器—研究
IV. ①TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 298993 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 字数 260 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划并组织编写了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会。为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会。这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分人是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家。编辑委员会成员以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整,组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为“十二五”国家重点出

版规划项目和国家出版基金项目。丛书本身具有鲜明特色：①丛书在内容上分三个部分，激光器、激光传输与控制、激光技术的应用，整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用；②丛书的写法注重了系统性，为方便读者阅读，采用了理论—技术—应用的编写体系；③丛书的成书基础好，是相关专家研究成果的总结和提炼，包括国家的各类基金项目，如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等，书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项；④丛书作者均来自国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校，包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等，这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目，取得了丰硕的成果，有的成果创造了多项国际纪录，有的属国际首创，发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文，代表了国内激光技术研究的最高水平，特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年，积累了丰富的研究经验，丛书中不仅有科研成果的凝练升华，还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述，相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献，同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助！

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严，编写及组织工作难度大，作为丛书的学术委员会主任，很高兴看到丛书的出版，欣然写下这段文字，是为序，亦为总的前言。

金国藩 周知瑞

2015年3月

国际航天技术和激光技术的蓬勃发展,极大地促进了空间平台利用激光技术开展空间科学技术和应用系统的研究。与此同时,深空探测、对地观测等领域的发展,迫切需要发展诸如空间激光通信、激光雷达、激光照明、激光测距等应用系统,空间科学技术也需要发展空间激光干涉仪、激光重力测量、激光冷却原子等前沿科学技术。长期以来,影响各类空间激光应用系统的一个关键因素就是空间应用激光器需要长寿命和高可靠性。如何能在空间环境下实现空间应用激光器的长寿命、高可靠连续运行,一直是航天界高度关注的科学技术问题。

本书整理了国内外空间应用激光器及其应用系统的发展历史和现状,重点介绍了空间激光遥感对地观测和深空探测领域的激光雷达技术与系统。比较全面地梳理了空间应用激光器涉及的激光介质、非线性晶体、光电器件和激光二极管等核心材料和器件在空间环境中的特性,特别是辐照特性和真空环境下的性能。详细回顾了应用最为广泛的空间激光测距系统及相应的各类空间应用激光器构型、特点和技术指标,并收集了相关空间应用激光器在轨运行情况。阐述了具有重要应用潜力的对地观测空间激光雷达应用所需的空间应用激光器指标要求,介绍了国内外正在研究的空间激光雷达应用的空间单频高能激光器方案。书中同时还整理了空间激光通信和空间科学研究所涉及的相关空间应用激光器技术路线及指标。本书最后对空间激光器可靠性进行讨论,重点分析影响空间应用激光器可靠性的污染问题及其防护措施。

本书从空间激光应用系统出发,总结了空间应用激光器的种类、体制及设计要点,不仅收集了国际上在空间应用激光器方面的研究成果,而且总结了作者所在实验室近几年开展的各种空间应用激光器的研究工作。希望本书给从事空间激光科学技术研究和拟利用空间应用激光器开展空间应用研究的科技工作者提供一些参考。

本书的编写得到了同事和学生的大力帮助和支持,其中孟俊清、马秀华、朱韧、周翠芸、李世光、陈迪俊等整理了相关实验数据,在此表示诚挚的感谢。

作者

2016年8月6日

第1章 概述

1.1	引言	001
1.2	空间应用激光器的典型类型	002
1.2.1	空间应用激光器的工作波长	002
1.2.2	空间全固态激光器的主要工作体制	004
1.3	空间应用激光器的发展历史	007
1.3.1	已经发射的空间应用激光器	007
1.3.2	深空探测的空间应用激光器	010
1.3.3	对地观测空间应用激光器	014
1.3.4	其他空间应用激光器	018
1.4	空间应用激光器的特殊性	021
1.4.1	应用环境的特殊性	021
1.4.2	应用需求的特殊性	022
	参考文献	023

第2章 空间激光材料和光电器件

2.1	引言	025
2.2	激光增益介质	025
2.2.1	激光晶体	025
2.2.2	掺杂增益光纤	032
2.3	非线性晶体	041
2.4	激光二极管的空间环境特性	048
2.4.1	激光二极管空间应用的基本特征	048
2.4.2	真空环境下的工作特性	049
2.4.3	空间辐照特性	054
2.5	光学材料和光电子器件	058
	参考文献	060

第3章 空间激光测距仪的全固态激光器

3.1	空间激光测距仪对激光器的要求	063
3.2	调Q全固态激光器设计	066
3.2.1	主动调Q全固态激光器计算模型	066
3.2.2	被动调Q激光器计算模型	067
3.3	谐振腔的设计	071
3.3.1	谐振腔构型和设计	071
3.3.2	几种空间激光测距系统的激光谐振腔设计	073
3.4	泵浦方式	079
3.4.1	棒状晶体的端面泵浦	079
3.4.2	棒状晶体的侧面泵浦	082
3.4.3	侧面泵浦板条结构	083
3.4.4	端面泵浦板条结构	086
3.4.5	案例分析	089
3.5	激光测距用光纤放大器	093
3.5.1	光纤激光器的技术优势	093
3.5.2	测距用光纤激光器	093
	参考文献	100

第4章 空间激光雷达用全固态激光器

4.1	大气探测空间激光雷达概述	103
4.1.1	大气风场测量多普勒激光雷达	103
4.1.2	后向散射激光雷达	104
4.1.3	差分吸收激光雷达	106
4.2	高能单频 $1\mu\text{m}$ 全固态激光器	107
4.2.1	高能单频 $1\mu\text{m}$ 全固态激光器的基本构型	107
4.2.2	高能单频 $1\mu\text{m}$ 振荡器	110
4.2.3	单频高能放大器	121
4.3	$2\mu\text{m}$ 单频高能全固态激光器	129
4.4	$1.5\mu\text{m}$ 单频脉冲全固态激光器	140
4.5	其他波段单频脉冲全固态激光器	150
4.6	单频激光器稳频技术	153

4.6.1 激光雷达对激光源的频率稳定需求	153
4.6.2 激光频率稳定技术	155
参考文献	162

第5章 其他空间应用激光器

5.1 空间激光通信用激光器件	165
5.1.1 空间激光通信发展现状	165
5.1.2 空间激光通信的激光器	169
5.2 空间科学用激光器	178
参考文献	182

第6章 空间应用激光器的可靠性设计

6.1 空间应用激光器的设计要点	185
6.2 影响空间应用激光器的可靠性因子	187
6.2.1 可靠性影响因子	187
6.2.2 激光器的自聚焦效应	188
6.2.3 元器件和原材料的控制	189
6.2.4 污染控制	190
6.2.5 寿命评估	198
6.3 高可靠空间应用激光器的光机热设计	203
6.3.1 激光器的结构设计	203
6.3.2 空间应用激光器的热设计	206
6.4 空间应用激光器的质量保证和测试规范	208
6.4.1 测试流程和内容	208
6.4.2 测试过程的参数检测	210
参考文献	211

1.1 引言

人类进军太空始于20世纪50年代,当1960年发明激光器后,人们就设想将激光技术应用到太空探索中。真空是无激光衰减的介质,在真空环境下可以极大地发挥激光的优势,充分利用其单色、高方向性和相干性的特点,可以实现全球覆盖的激光测量、通信、照明、目标指示,甚至可以利用高能激光实现远程打击等。正是由于在太空具有巨大的应用潜力,激光应用成为各国高度关注的航天技术。

虽然人类一度想研制太空激光武器,即从太空摧毁地球表面或近地表面的进攻武器,但真正实现这样的武器系统,其技术难度是极高的,且这样的武器系统也是受到国际条约所限制的,因此用于攻击和对抗的空间高能激光器不在本书考虑的范畴内。其实空间应用激光器主要应用是在非军事领域,包括地球科学、空间科学、空间技术等领域,图1-1简要罗列了主要的应用方向。

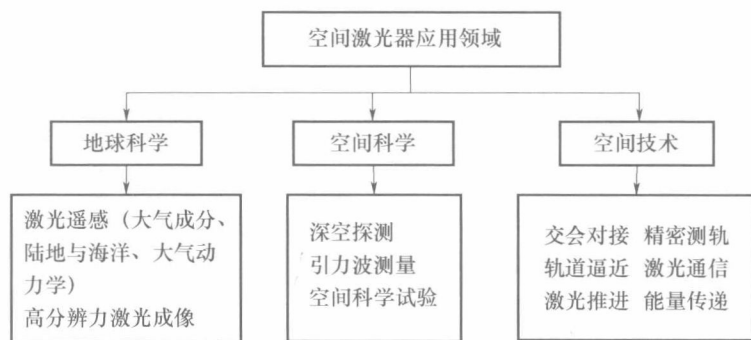


图1-1 空间应用激光器的主要应用方向

在地球科学应用方面,主要利用空间激光遥感手段获取高垂直分辨力、高精度的地球大气、陆地和海洋的各类要素。D. M. Tratt 分析了地球观测激光遥感所迫切需要观测的参数^[1],包括大气成分、大气动力学、陆地与海洋参数,特别

是目前地球科学迫切需要测量的参数,如云和气溶胶、边界层风场、臭氧、二氧化碳、生物总量、水汽、表面成图和海洋波高等。例如,普遍认为大气气溶胶、云、风的不确定是全球天气预测的最主要障碍,是天气数值预报、传输研究、动力气象研究必不可少的参数,因此利用激光遥感技术手段来获取全球垂直分布成为遥感领域的研究热点。利用空间激光雷达进行测量,不仅可以获取全球的垂直分布,而且激光光束窄,可以有效分离云的干扰,这是其他传感器所不能比拟的。按照激光与物质的不同作用机理,激光遥感技术主要有反射机制的激光高度计、后向散射激光雷达、差分吸收激光雷达、多普勒激光雷达以及拉曼、荧光激光雷达等遥感技术体制。不同体制的激光雷达对空间应用激光器提出了不同的需求。

随着对深空和天体物理研究的不断深入,人类把目光投向外层空间。利用激光探测手段进行的深空探测和科学研究,主要应用在行星表面和大气的特征测量,如月球、火星和水星探测以及近地小行星探测^[2]。测量的参数主要有行星表面三维形貌、表面反照率、火星大气成分及循环情况、行星矿物分布。另外,在月球或火星表面行走探测中,空间飞行器安全着陆、返回是实现有效探测的必要保障,而激光雷达在航天器测量控制、安全软着陆等方面将发挥重要作用。

在空间技术方面,主要利用激光的高精度测距、测速、测角和主动照明的能力,实现空间飞行器间的精密测距、编队飞行、轨道逼近、交会对接等航天工程任务,以及航天器的自主导航和避障等功能,同时也包括利用激光推进技术实现在太空进行飞行器发射,利用激光能量传输功能实现空间太阳能的传递。当然,更包括利用激光通信手段实现空间飞行器之间和空间飞行器与地面之间的信息传输、组网,实现全球信息互联。

空间应用激光器的应用还只是刚刚开始,在诸多领域具有重要的应用潜力和发展空间。在诸多空间科学研究中,包括引力波探测、量子信息、空间冷原子钟、空间光钟、基本物理量验证等,均需要利用激光精密距离测量、高频率稳定的激光或者高精度的时间频率测量。

1.2 空间应用激光器的典型类型

1.2.1 空间应用激光器的工作波长

虽然激光可工作在电磁频谱的红外线、可见光和紫外线区域,但受到空间特殊环境和技术成熟度的限制,目前仍然只有少数种类的激光器应用到太空中。美国提出星球大战概念后,于1991年研制出 $2.7\mu\text{m}$ 的HF Alpha化学激光器,输出功率达到兆瓦,并能在模拟太空的低气压环境下运转工作,但庞大的化学激

光器要搬到太空是一大挑战。因此,空间应用的激光器不能只强调性能指标,更要考虑在空间应用的可行性。到目前为止,大部分非武器类应用系统,主要采用固体激光器、光纤激光器和半导体激光器等类型的空间应用激光器,这类激光器均为电能驱动的激光器,这使得激光器可以利用太阳能帆板提供的电力资源。

激光输出波长的选择虽然要依据应用任务的需求,但同时更要考虑激光器的技术成熟度、电光转换效率等技术和可靠性边界条件。对于大气粒子、原子和分子以及对于地球自然表面等目标的遥感探测,激光波长的选取由各自不同波段的辐射特征所决定。对大部分对地观测的激光应用系统来说,需要选择大气透过率高的波段。然而,对大气成分探测的差分吸收激光雷达来说,激光发射波长还要与被测分子的吸收谱线严格匹配对准。由于受到高成熟度的激光器种类的限制,目前为止,空间激光应用系统可供使用的激光器波长和性能是非常有限的。

图1-2系统梳理了地球科学观测空间激光应用系统中,可能采用的激光波长、激光器基本性能要求以及相应的激光器类型。

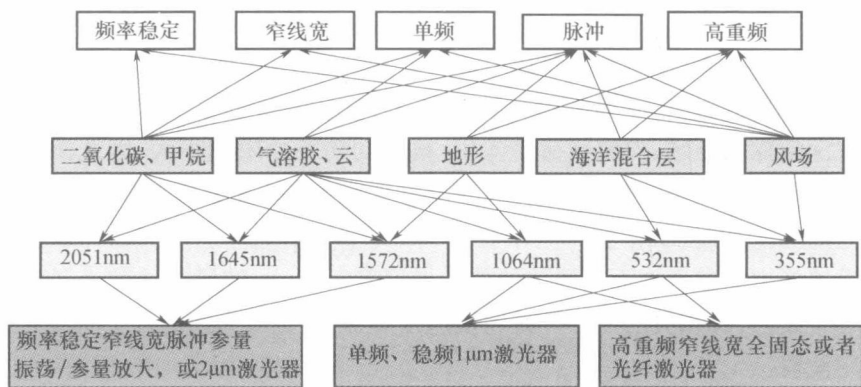


图1-2 地球科学观测空间激光应用系统中可采用的激光波长和激光器

(1) 9~10μm波段处于大气窗口,其对应的CO₂激光器曾经作为空间应用激光器的重要候选,如美国国家航空航天局(NASA)早期的LAWS计划和欧洲的多普勒测风激光雷达,但由于星载CO₂激光器的体积、重量太大以及寿命短等技术限制,同时随着全固态激光器技术不断成熟,CO₂激光器几乎不再列入空间应用激光器的候选行列。

(2) 2μm固体激光器处于大气窗口,对相干激光雷达来说,由于2μm波段比1μm波段的相干损失小,可以利用激光二极管泵浦实现高效率和小型化,是大气风场探测相干激光雷达的优选光源之一,因此成为美国、日本和欧洲航天局研发的一个重点。NASA对此进行了长期投入,并研制出大功率星载激光器样

机。另外,CO₂在2μm波段具有良好的吸收特征,因此也是CO₂探测差分吸收激光雷达的候选光源之一。

(3) 1.5μm波段属于人眼安全波段,探测器的量子效率也比1μm高得多,在CO₂探测差分吸收激光雷达、测风相干激光雷达中具有重要应用潜力。但目前还没有得到空间的充分应用和验证,主要原因在于激光器的成熟度不够,电光转换效率还比较低。但是,随着掺铒光纤激光器、光学参量振荡器(OPO)非线性技术的逐步成熟,1.5μm波段激光器将在地球科学领域发挥重要作用。1.5μm掺铒光纤放大器将成为空间激光通信的首选。

(4) 1μm波段的激光器主要是采用Nd:YAG、Nd:YVO₄、Yb:YAG等增益介质的全固态激光器,及其二倍频、三倍频输出。相对来说,基于Nd:YAG等成熟激光晶体及高功率808nm半导体激光器技术,1μm波段的全固态激光器的技术成熟度较高,成为目前空间应用激光器的技术主流,也是已经发射空间激光应用系统的主要光源。

总体来说,对地观测激光雷达应用的激光器是以1μm的全固态激光器及其谐频为主。随着大气中臭氧、水汽、甲烷、二氧化碳等气体探测,以及大气压力、温度探测等需求的不断扩大,0.3μm、0.94μm、1.65μm、1.57μm、2μm以及0.76μm等特殊波段的空全固态激光器得到快速发展。

在深空探测领域,探测载荷受体积、重量和功耗的限制很大,因此激光探测载荷必须选择微小型的激光器件,从而主要采用半导体激光器、光纤激光器和微小型全固态激光器,工作波段集中在0.8μm、1μm、1.5μm。空间激光通信系统的波段选择主要参考地面光通信的技术成熟度;1.5μm波段在地面光通信方面已经非常成熟,其相关的元器件得到快速发展,因此也成为国内外空间激光通信的通用波段。

对空间科学应用来说,激光波段根据空间科学应用背景有较大差距,而且大都为比较特殊波段的激光器。例如,空间冷原子物理研究,需要选择与所选原子完全匹配的激光波长,原子干涉仪也与原子能级密切相关。而固体激光器则受到激光晶体的限制,只能输出特定波长,特殊波段需要通过各类非线性技术来获得,或者采用可调谐的半导体激光器及其放大器。相对来说,空间科学所用激光器属于特殊的、需专门攻关的小品种专用器件。

1.2.2 空间全固态激光器的主要工作体制

目前,在各类空间激光应用系统中,除了工作波长不同,激光器的输出能量、重复频率、线宽的要求也是不一样的。另外,不同应用目标、不同飞行器平台对激光器的技术参数要求也有很大差异。表1-1列举了几种典型的空应用激光器技术参数要求。

表 1-1 典型的空应用激光器技术参数要求

分类	应用		参数需求
激光高度计、激光三维成像	地球高程		波长: $1\mu\text{m}$, 脉冲能量: 大于 150mJ , 重复频率: $1\sim 40\text{Hz}$
	行星探测		波长: $1\mu\text{m}$, 脉冲能量: 大于 50mJ , 重复频率: $1\sim 20\text{Hz}$
	陆地三维成像		波长: $1\mu\text{m}$, 脉冲能量: 大于 $100\mu\text{J}$, 重复频率: $5\sim 10\text{kHz}$, 波束: 1000
激光雷达	风场探测 多普勒激光雷达	直接探测	波长: $0.35\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 脉冲能量: 大于 150mJ , 重复频率: 大于 100Hz
		相干探测	波长: $2.05\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 脉冲能量: 大于 1J , 重复频率: 大于 50Hz
	后向散射激光雷达(云、气溶胶)		波长: $0.35\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, 窄线宽, 脉冲能量: 大于 100mJ , 重复频率: $20\sim 50\text{Hz}$
	差分吸收激光雷达	CO_2	波长: $1.57\mu\text{m}$ 或者 $2.05\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 频率稳定性: 小于 0.3MHz , 脉冲能量: 大于 50mJ , 重复频率: 大于 50Hz
		CH_4	波长: $1.65\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 频率稳定性: 小于 0.9MHz , 脉冲能量: 大于 20mJ , 重复频率: 大于 50Hz
		H_2O	波长: $0.94\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 频率稳定性: 小于 0.3MHz , 脉冲能量: 大于 50mJ , 重复频率: 大于 50Hz
		O_2	波长: $0.76\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 脉冲能量: 大于 50mJ , 重复频率: 大于 50Hz
光通信	星间通信		波长: $1.06\mu\text{m}$, $1.55\mu\text{m}$, 单频、窄线宽, 功率: $2\sim 10\text{W}$
光学测控	安全着陆		波长: $1.06\mu\text{m}$, 或 $1.55\mu\text{m}$, 脉冲能量: 大于 $50\mu\text{J}$, 重复频率: 数十千赫
	编队飞行/交会对接		波长: $1\mu\text{m}$, 脉冲能量: 大于 $100\mu\text{J}$, 重复频率: 数十千赫
非激光载荷用激光器	空间冷原子物理		波长: $0.780\mu\text{m}$, $0.852\mu\text{m}$, $0.767\mu\text{m}$, 单频、窄线宽(兆赫), 频率稳定性: 长期稳定
	引力波探测		波长: $1\mu\text{m}$, 单频、超窄线宽(亚赫), 频率稳定性: 长期稳定
	光谱干涉仪计		波长: $0.9\sim 1.5\mu\text{m}$, 单频、超窄线宽, 频率稳定性: 优于 1×10^{-9}

从表 1-1 中可以看出,在对地观测领域,大气、海洋、陆地等不同测量要素,对激光器的输出功率、重复频率,以及激光器的线宽、频率稳定度等要求有很大差别。结合目前和短期内可以突破的空间应用激光器技术,可以将激光器简要分为以下几种类型和规格。

1. $1\mu\text{m}$ 激光器,平均功率 1~10W,单脉冲能量 0.1~50mJ

$1\mu\text{m}$ 激光器,平均功率 1~10W,单脉冲能量 0.1~50mJ,其特点是低脉冲能量,中到高不等的脉冲重复频率。主要应用于需要大量脉冲叠加或者对单脉冲高密度测量的场合。从实现技术来看,这样的激光器是用连续的或者准连续的激光二极管阵列泵浦固体块状激光晶体实现的,如 Nd:YAG、Nd:YVO₄、Nd:YLF、Nd:YAP 等晶体或者掺杂光纤。单脉冲能量低的激光器在空间环境下的长寿命方面是有优势的,在激光雷达设计时,如果能够用高重复频率、低脉冲能量激光器通过脉冲叠加来替代低重复频率、高脉冲能量激光器,则优选前者,目前越来越多的空间应用激光器采用高重复频率、低脉冲能量的体制。

2. $1\mu\text{m}$ 激光器,平均功率 100W,重复频率小于 100Hz

$1\mu\text{m}$ 激光器,平均功率 100W,重复频率小于 100Hz,其特点是高脉冲能量,低重复频率。有时需要激光器输出单频,还需要激光器输出窄线宽,因此对激光频率稳定性要求高。这种激光器主要应用在大气环境激光雷达中,且仅需要少量脉冲叠加的场合。为提升非线性转换效率,还需要激光器输出高的光束质量(光束质量因子 $M^2 < 1.5$),光谱纯度要大于 99.9%。这类激光器都是重复频率的激光二极管阵列泵浦固体激光器,在基波基础上,利用非线性晶体转换实现其他波长输出。由于对大气环境要素探测的迫切需求,这类高能量激光器是目前星载大气探测激光雷达系统的主要光源。

3. $1.5\mu\text{m}$ 光纤激光器,平均功率 1~100W

$1.5\mu\text{m}$ 光纤激光器主要应用在空间激光通信和对地观测方面,一般采用铈共掺的光纤激光放大器或者掺铈晶体获得。对于相干激光探测,激光器需要单频窄线宽,且需要稳定在某一气体吸收线上,以确保频率的长期稳定性。一般选用频率可调、稳定的高功率连续及高脉冲重复频率光纤振荡器和放大器。在对低对流层区域 CO₂ 激光雷达测量来说,也是一个比较理想的激光源。这类激光器也可应用于高分辨力地形和植被结构探测的激光雷达中。虽然这类激光器具有非常好的发展前景,但缺乏空间应用经验和工程积累,另外激光器的光光转换效率也没有掺铈光纤激光器的高。

4. $2\mu\text{m}$ 脉冲激光器,平均功率 20W,单脉冲能量 1J

平均功率 20W,单脉冲能量 1J, $2\mu\text{m}$ 脉冲激光器最初的研发目标主要是针对星载相干多普勒风场测量激光雷达应用,当然也可应用于对流层 CO₂ 剖面测量的差分吸收激光雷达中。这类激光器是采用波长为 792nm 的长寿命激光二