



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

# 太阳光泵浦激光器

赵长明 编著

Solar Pumped Lasers



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/

# 太阳光泵浦激光器

赵长明 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

作为国内外第一本专门介绍太阳光泵浦固体激光器发展状况及相关研究工作的著作,本书在综述太阳光泵浦固体激光器研究历史的基础上:首先介绍了空间和地面上太阳光的特性、太阳光跟踪系统的研究、适用于太阳光泵浦固体激光器的太阳光汇聚光学系统;其次介绍了太阳光泵浦固体激光器的若干理论问题,其中包括太阳光泵浦固体激光器的能量转换模型、太阳光泵浦固体激光器的速率方程理论和激光工作物质与太阳光谱的光谱匹配;再次介绍了太阳光泵浦固体激光器材料方面的研究工作和典型的太阳光泵浦固体激光器系统;最后介绍了太阳光泵浦固体激光器的应用前景,主要是对太阳光泵浦固体激光器未来发展和应用的展望。

本书可供激光和电子技术方向的本科生、研究生以及工程技术人员学习与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

太阳光泵浦激光器/赵长明编著. —北京:国防工业出版社,2016.11

(现代激光技术及应用)

ISBN 978-7-118-10589-6

I. ①太… II. ①赵… III. ①日光—光泵浦—激光器  
IV. ①TN245

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第299492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 13 $\frac{1}{2}$  字数 275 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大进展,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 周灿瑞

2015年3月

太阳光泵浦激光器是指直接以太阳光作为泵浦源的激光器,它具有能量转换环节少、可靠性高、使用寿命长和能量转换效率较高的鲜明特点,在只有太阳光作为唯一能源形式存在的太空中可能发挥独特的作用。在诸如激光途径空间太阳能电站、激光空间无线能量传输、激光清除空间碎片、激光推进、空间激光通信、空间激光雷达等涉及激光的多种空间应用方面具有潜在的应用前景。在地面上,太阳光泵浦激光器在新型能源开发(基于镁的能量循环)、环境保护(高熔点有害废弃物的光化学分解)等方面得到应用。

太阳光泵浦激光器与太阳能泵浦激光器不同。太阳能泵浦激光器存在两种可能的工作方式:一是直接利用太阳光作为激光泵浦源,二是首先通过太阳能电池板将太阳光转化成电能,然后再以电能激励激光器,其后过程与一般激光器无异。本书只就太阳光直接泵浦激光器展开论述。

太阳光泵浦激光器是一个既老又新的话题。激光发明之后不久,1965年 Young 报道了第一台太阳光泵浦固体激光器。其后以色列 Weizmann 科学研究所、美国芝加哥大学、美国 NASA 及其所属研究机构、日本东北大学、日本东京理工大学、葡萄牙里斯本新大学等研究机构在太阳光泵浦固体激光器方面开展了一系列研究工作。美国 NASA 曾就空间应用的激光器展开对比分析,其中太阳光泵浦激光器是一个可能的选择,并就太阳光泵浦的碘化合物激光器进行了一系列理论和实验研究。总的来说,相比于其他形式泵浦源的激光器,太阳光泵浦激光器是一种独特、新颖的“小众”激光器,开展研究的机构较少。进入 21 世纪以来,太阳光泵浦固体激光器的研究进入了一个新的发展阶段。以接收太阳光的单位面积上可以获得的激光输出功率作为衡量太阳光泵浦固体激光器能量转换效率的指标,20 世纪 90 年代 Weizmann 科学研究所采用 Nd:YAG 晶体最高达到  $6.7\text{W}/\text{m}^2$  的指标,2009 年东京理工大学采用 Cr,Nd:YAG 激光陶瓷达到

20W/m<sup>2</sup> 的指标,里斯本新大学采用 Nd:YAG 晶体达到 19.5W/m<sup>2</sup> 的指标。2012 年,东京理工大学的最新报道更是达到了 30W/m<sup>2</sup> 的最新指标。新阶段的主要标志是:接收太阳光单位面积上获得的激光输出功率大幅提高;普遍使用廉价、大面积的菲涅尔透镜作为太阳光汇聚光学元件;激光工作物质从 Nd:YAG 激光晶体发展到 Cr,Nd:YAG 激光陶瓷。

作者领导的项目组是国内首先开展太阳光泵浦固体激光器研究的单位,2005 年开始从事太阳光泵浦固体激光器的研究,2007 年获得国家自然科学基金小额资助,2008 年年底采用 Nd:YAG 晶体获得激光输出,2010 年获得国家自然科学基金面上项目的支持,经过项目组持续不断的理论研究和实验改进,2012 年 7 月份获得了 18W 的激光输出。2014 年再次获得国家自然科学基金面上项目资助,进一步采用分腔水冷结构锥形聚光腔和螺纹棒,获得了 33W 的激光输出,折算到每平方米太阳光面积上,收集效率达到 32.1W/m<sup>2</sup>,超过了东京理工大学 2012 年报道的指标,成为迄今为止获得的最高指标。

值得高兴的是,由于本项目组在太阳光泵浦固体激光器方面的研究工作基础,“十二五”期间我们参加了“空间太阳能电站”的民用航天预先研究项目和 863 计划“分布式可重构卫星技术”项目,这两个项目为太阳光泵浦固体激光器找到了可能的应用途径,更坚定了我们从事这一方向研究的信心。2011 年年底接到周寿桓院士的通知,进行“现代激光技术及应用”丛书中《太阳光泵浦激光器》分册的写作。本书内容是我们项目组全体成员多年在该方向上研究工作的汇集,集中了全体成员的辛勤劳动和汗水。特别是已经毕业的何建伟博士、张立伟硕士、罗萍萍硕士、崔浩硕士、刘诚硕士、王华昕硕士以及在学的徐鹏博士生、关哲博士生、王云石博士生和张逸辰硕士生为本书的内容做出了重要贡献。

太阳光泵浦固体激光器的核心问题是如何高效率地将宽光谱、非相干的太阳光转换成窄光谱、高度相干的激光。太阳光的特性是研究太阳光泵浦激光器首先需要研究的问题,所以在第 1 章介绍太阳光泵浦固体激光器研究历史的基础上,第 2 章介绍了空间和地面上太阳光的特性。第 3 章介绍了太阳光泵浦固体激光器的太阳光汇聚光学系统。第 4 章介绍了太阳光泵浦固体激光器的若干理论问题,其中包括太阳光泵浦固体激光器的能量转换模型、太阳光泵浦固体激



光器的速率方程理论和激光工作物质与太阳光谱的光谱匹配。第5章介绍了我们在太阳光泵浦固体激光器材料方面的研究工作。第6章介绍了典型的太阳光泵浦固体激光器系统。第7章介绍了太阳光泵浦固体激光器的应用前景,主要是对太阳光泵浦固体激光器未来发展和应用的展望。其中,第1章、第6章、第7章由赵长明执笔,第2章、第4章由张海洋执笔,第3章、第5章由杨苏辉执笔,赵长明负责全书的统稿。

希望本书能够在太阳光泵浦固体激光器方面起到抛砖引玉的作用,能够给激光界同行了解太阳光泵浦固体激光器提供方便,并为激光和光电子技术方向的本科生、研究生丰富激光方面的知识、扩展视野发挥作用。特别希望潜在的应用单位通过本书获得太阳光泵浦固体激光器方面的信息,作为进一步思考和研究其可能应用的基础。

衷心感谢国家自然科学基金委员会信息学部对该方向研究的持续支持,感谢周寿桓院士及“现代激光技术及应用”丛书编委会的关心和支持,感谢所有对本书出版做出贡献的同行和朋友们。

作者  
2016.8

## 第 1 章 太阳光泵浦激光器的发展历程

1.1 概述 .....	001
1.2 太阳光直接泵浦激光器的简要发展历史 .....	003
1.3 太阳光泵浦气体激光器 .....	004
1.4 太阳光泵浦固体激光器 .....	005
1.4.1 成像光学汇聚系统 .....	006
1.4.2 非成像光学汇聚系统 .....	007
1.4.3 阵列式混合汇聚系统 .....	017
1.4.4 太阳能黑体泵浦模型 .....	018
1.5 太阳光直接泵浦光纤激光器 .....	019
参考文献 .....	021

## 第 2 章 空间与地面的太阳辐射

2.1 空间太阳辐射 .....	023
2.1.1 太阳辐射的光谱分布 .....	023
2.1.2 大气层外的太阳光谱 .....	024
2.2 地面太阳辐射计算 .....	025
2.2.1 球面天文学基本概念 .....	025
2.2.2 太阳辐射计算参数 .....	027
2.2.3 太阳辐射量计算 .....	029
2.2.4 北京地区太阳辐射量分布 .....	031
2.3 地面太阳光谱测量 .....	033
2.3.1 地面太阳光谱测量方法 .....	033
2.3.2 北京地区太阳光谱测量与分析 .....	035
2.4 太阳光跟踪系统 .....	038
2.4.1 跟踪控制方式选择 .....	038

2.4.2	系统工作原理	040
2.4.3	系统设计方案	042
2.4.4	系统参数与测试	043
参考文献		047

### 第3章 太阳光直接泵浦激光器理论模型

3.1	激光振荡的基本理论	049
3.1.1	激光器振荡的阈值条件	051
3.1.2	阈值泵浦速率	053
3.1.3	谐振腔输出功率	054
3.2	太阳光泵浦激光器的运行模型	055
3.2.1	太阳光泵浦激光器能量传输机制	055
3.2.2	激光输出	058
3.3	太阳光泵浦激光器的热效应模型	060
3.3.1	工作物质产生热的原因	060
3.3.2	太阳光泵浦激光器的热透镜效应分析	061
3.3.3	热管理技术	076
3.3.4	含热透镜的谐振腔设计	079
参考文献		081

### 第4章 太阳光汇聚系统设计

4.1	菲涅尔透镜设计	084
4.1.1	菲涅尔透镜设计原理	085
4.1.2	点汇聚型聚光透镜模型	087
4.1.3	太阳光泵浦激光器的菲涅尔透镜设计分析	088
4.1.4	菲涅尔透镜材料与工艺介绍	092
4.2	第二级汇聚系统的设计	093
4.2.1	第二级汇聚元件的选择	093
4.2.2	锥形聚光腔的设计	096
参考文献		108

### 第5章 太阳光泵浦固体激光器工作物质

5.1	固体基质材料	109
-----	--------	-----

5.2	固体激光工作物质中的激活离子 .....	110
5.3	太阳光泵浦固体基质材料 .....	111
5.4	常用固体激光工作物质分析 .....	111
5.4.1	太阳光谱的数学建模 .....	111
5.4.2	工作物质吸收谱与太阳光谱的匹配 .....	113
5.4.3	工作物质阈值泵浦功率密度 .....	115
5.4.4	激光工作物质的热特性 .....	117
5.5	提高能量转换效率对激光材料的研究 .....	117
	参考文献 .....	120

## 第6章 典型的太阳光泵浦固体激光器系统

---

6.1	成像型太阳光泵浦固体激光器系统 .....	123
6.2	非成像型太阳光泵浦固体激光器系统 .....	127
6.3	光波导型太阳光泵浦固体激光器系统 .....	136
6.4	太阳光泵浦光纤激光器系统 .....	138
	参考文献 .....	142

## 第7章 太阳光泵浦固体激光器的应用前景

---

7.1	太阳光泵浦激光器在空间太阳能电站中的应用 .....	144
7.1.1	空间太阳能电站概念 .....	144
7.1.2	激光途径的空间太阳能电站 .....	152
7.2	空间激光无线能量传输与分布式可重构卫星 .....	155
7.2.1	空间激光无线传能 .....	155
7.2.2	分布式可重构卫星系统 .....	164
7.2.3	空间激光推进与变轨 .....	164
7.2.4	激光清除空间碎片 .....	168
7.3	基于镁的能量循环系统 .....	178
7.3.1	碳的循环与环境污染 .....	178
7.3.2	镁的能量循环 .....	179
7.3.3	太阳光泵浦固体激光器在镁能量循环中的作用 .....	184
7.4	激光制氢 .....	186
	参考文献 .....	190

# 第1章

## 太阳光泵浦激光器的发展历程

### 1.1 概述

1960年,美国休斯公司的梅曼博士发明了世界上第一台激光器——红宝石激光器<sup>[1]</sup>,开启了人类制造和使用激光这种高单色性、高方向性和高亮度相干光源的历史。激光的高单色性使其可以应用于相干探测、干涉测量、激光雷达等信息应用,激光的高方向性使其可以应用于远程测距、星间激光通信等远距离应用,而激光的高亮度使其可以应用于激光武器、工业加工、医疗手术等。激光的出现至今已有50多年的历史,曾被列为20世纪十项最伟大的发明之一,已经广泛应用于科学研究、工业加工制造、医疗与诊断、消费电子类产品及国防等各个领域。

激光器种类繁多,按照《激光术语国家标准》的规定,根据激光工作物质的种类可以分为固体激光器、气体激光器、液体激光器、半导体激光器、化学激光器、自由电子激光器与光纤激光器7类,其中以晶体、玻璃、透明陶瓷为基质的固体激光器以其输出功率高、体积小、结构比较坚固紧凑、使用方便等特点成为应用最广泛的激光器种类之一。

固体激光器均采用光泵浦方式获得能量输入,激光诞生之初曾尝试过多种光源用于固体激光器的泵浦,经过数十年的探索和实践,目前主要使用的泵浦光源包括闪光灯、弧光灯和半导体激光器。闪光灯、弧光灯作为固体激光器的泵浦源使用了约40年,自从20世纪90年代开始,以半导体激光器作为泵浦源的固体激光器(Diode Pumped Solid State Lasers, DPSSL,亦称为全固态激光器)逐渐取代了闪光灯与弧光灯泵浦的固体激光器,半导体激光器成为固体激光器的主要泵浦方式。相比于闪光灯与弧光灯,以半导体激光器作为固体激光器的泵浦源,具有电光转换效率高、光束质量易于控制、输出稳定性高和体积小等特点,而且随着半导体激光器价格的不断降低,全固态激光器与灯泵固体激光器的价格差

距逐渐缩小。从 20 世纪末期开始,随着新型光纤结构——双包层光纤的出现,半导体激光器泵浦的光纤激光器成为固体激光领域的研究热点。经过十几年的发展,半导体激光器泵浦的光纤激光器已经在连续输出和高重频、低能量输出能力方面达到甚至超过了以往固体激光器的输出能力,成为新一代固体激光器的典型代表。

太阳光是地球上最主要的能量来源。太阳光不仅为地球上的生物(包括人类)带来了光明和温暖,而且目前人类使用的最主要的化石能源——石油、天然气与煤炭,追根溯源,也是由远古时代的太阳光能量转化而来的。随着地球上人口数量的增长、生活水平的提高,伴随着能源消耗的迅速增长,传统化石能源储量日趋减少。此外,传统化石能源的消耗过程是基于碳循环的能源消耗过程,其间伴随着大量的二氧化碳排放到大气中,造成了日益严重的气候变化和环境污染。寻找开发替代传统化石能源的可再生能源是目前各国政府和科技界面临的一个重大研究课题,各国政府对可再生能源的开发与利用投入了越来越多的人力和物力。太阳能的开发和利用是其中最为重要的一项研究内容。

由于太阳光是地球上最主要的能量来源,也是人们最熟悉的光源,在激光诞生之后不久就有人想到了利用太阳光作为固体激光器的泵浦源。从 1963 年美国普林斯顿 RCA 实验室的 Z. J. Kiss 等人使用太阳光直接泵浦放置在 27K 液氦中的  $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$  观察到激光输出后<sup>[2]</sup>,人们对于太阳光泵浦激光器的研究就从未停止。经过 50 多年的发展,太阳光直接泵浦的激光器研究有了很大的进展。激光输出功率从最初的连续输出 1W<sup>[3]</sup> 提高到 500W<sup>[4]</sup>;衡量太阳光泵浦激光器输出效率的一个常用指标是收集效率(collection efficiency),即地面上每平方米太阳辐射面积上能够获得的激光输出功率,收集效率从小于  $1\text{W}/\text{m}^2$  提高到  $30\text{W}/\text{m}^2$ <sup>[5]</sup>。所研究的激光器从最初的固体和气体激光器到光纤激光器;所采用的工作物质从最早的  $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$ 、红宝石、Nd:YAG 到 Cr:Nd:YAG、Cr:Nd:GS-GG 等双掺物质;基质材料也从最早的晶体发展到陶瓷、光纤等;汇聚系统从单一的成像光学器件发展到成像与非成像器件相结合:这些发展使得太阳光泵浦固体激光器的输出获得了提高,阈值泵浦功率也相应下降,具备了实际应用、特别是空间应用的能力。

太阳光泵浦激光器的发展既从来没有成为激光领域的研究热点和主流,也从来没有完全停止,而是随着需求的不断出现和相关技术的不断进步,呈现出时起时伏的发展态势。太阳光泵浦固体激光器的发展历史,生动地显示出需求牵引、技术推动的发展规律。

太阳光泵浦激光器与其他泵浦方式的激光器类似,可以划分为泵浦源、谐振腔与激光工作物质三个基本组成部分。太阳光泵浦固体激光器的独特之处即在

于它的泵浦源。太阳光是一种广域、低功率密度的光源,用于泵浦激光工作物质,首先需要采用大口径光学系统对太阳光进行汇聚。大口径望远镜是人们首先想到的太阳光汇聚系统,因此最早的太阳光泵浦激光器均采用卡塞格林望远镜系统汇聚太阳光。由于大口径光学系统制造困难、成本高昂,且汇聚太阳光并不需要成像光学系统中物空间与像空间的点点位置对应关系,因此发展了非成像光学理论,基于其研制出二维和三维复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Concentrator, CPC),实验系统中采用了三维 CPC 与二维 CPC 组合聚光系统。但是,伴随着聚光系统越来越复杂,聚光效率呈现出饱和甚至下降趋势。进入 20 世纪 90 年代以来,在空间太阳能电站(Space Solar Power Station, SSPS)需求牵引下,以日本研究人员为代表,开始采用菲涅尔透镜作为太阳光汇聚系统。菲涅尔透镜是一种易于实现大口径、轻便、廉价的光学元件,一般采用有机玻璃类材料或硅胶类材料为基底,通过在其上刻画或复制大量尖楔状同心环条纹制成。目前国内外几个研究组均采用菲涅尔透镜作为第一级太阳光汇聚元件。进一步提高菲涅尔透镜的聚光效率是未来提高太阳光泵浦固体激光器效率的重要研究方向之一。

太阳光泵浦固体激光器的实质是把宽光谱、低功率密度的太阳光转化成为窄光谱、高功率密度的激光。

## 1.2 太阳光直接泵浦激光器的简要发展历史

太阳光直接泵浦激光器的研究从 20 世纪 60 年代开始,主要经历了三个发展阶段:第一阶段是 20 世纪 60 年代至 70 年代中期,这是太阳光泵浦激光器研究的起步阶段,人们探索用太阳光直接泵浦各类激光介质以实现激光输出。研究人员对固体、气体、液体等各种工作物质进行了大量的理论研究和实验验证,最终在固体激光器上获得了激光输出。这一阶段的太阳光汇聚系统主要由成像光学系统构成。第二阶段是 20 世纪 80 年代到 90 年代初期,这是太阳光直接泵浦激光器发展的重要时期,研究重点是提高激光输出功率、改善光束质量以及应用各种激光技术。这一阶段将非成像光学器件应用于汇聚系统中,大大提高了太阳光的功率密度,使太阳光泵浦的固体激光器的输出达到 500W。复合抛物面聚光器(compound parabolic concentrator)成为该阶段研究的热点。第三阶段是 20 世纪 90 年代中期到目前,研究的重点是提高太阳光到激光的转换效率,力求在较小的太阳光收集面积上获得较高功率的激光输出。从 20 世纪 90 年代中期开始,人们发现,虽然太阳光泵浦固体激光器获得了大功率输出,但整个系统的体积和面积都非常庞大,在以太空为背景的应用场合中,如此庞大的激光器系统将带来很大的困难。提高系统的太阳光到激光的能量转换效率成为人们关注

的焦点。用单位太阳辐射面积获得的激光输出功率表示太阳泵浦激光器的能量转换能力,在大功率输出的太阳泵浦固体激光器系统中,每平方米太阳辐射面积获得的激光输出从 20 世纪 80 ~ 90 年代的小于 1W 发展到现在的 30W。在汇聚系统方面,出现了采用光纤束制成的抛物面型或光锥型第二级聚光器,目的是为了获得更高的太阳汇聚功率密度。近几年研究人员又将大型菲涅尔透镜作为初级汇聚透镜,大大减小了整个激光器的重量和成本,为太阳泵浦激光器的实际应用提供了方便。

### 1.3 太阳泵浦气体激光器

太阳泵浦气体激光器的研究始于 20 世纪 70 年代末。1979 年美国国家航空航天局刘易斯研究中心提出了一份报告<sup>[6]</sup>,详细论述了以太阳光为能源的激光器发展状况,在激光输出 1MW 的相同条件下,比较了不同类型激光器的优劣。报告以 10 年左右的时间研制出大功率激光器样机为目标,在该中心原有的气体激光器研究基础上,给出了不同工作物质的气体激光器的详细设计方案。20 世纪 80 年代中期起,美国国家航空航天局兰利研究中心(NASA Langley Research Center)也开始对太阳泵浦气体激光器进行研究,其中以碘分子和烷基碘化物的气体激光器为主。

1986 年 De Young 报道了以氙弧光灯太阳模拟器泵浦的准太阳泵浦烷基碘化物( $C_2F_5I$ )气体激光器的研究结果<sup>[7]</sup>。当气压为 9Torr(1Torr = 133.322Pa)时,获得 45mJ 的激光输出能量;气压为 14Torr 时,获得 350mW 的平均功率输出。通过理论计算,作者认为该激光器的太阳阈值泵浦功率是 100 个太阳常数,这是当时太阳泵浦气体激光器阈值功率的最低水平。该激光器的结构如图 1-1 所示。

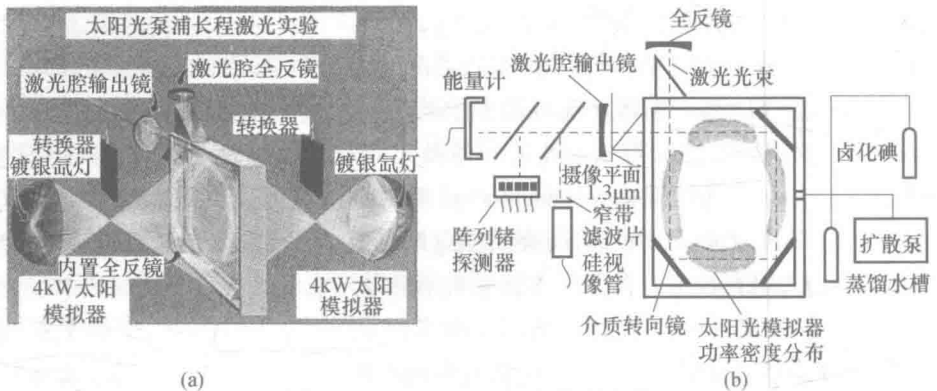


图 1-1 准太阳泵浦气体激光器

(a) 实验结构图; (b) 激光器侧面示意图。



图中,两个氙弧光灯太阳模拟器从  $C_2F_5I$  蒸气盒两侧照射工作物质,图 1-1 (b) 中阴影部分为泵浦光强分布。盒内 3 个反射镜与盒外的反射镜构成环形谐振腔,泵浦光与谐振腔光轴垂直。通过改变盒内工作物质的气压,对激光输出进行调节。

同一年 De Young 还报道了采用上述相同结构的  $i-C_3F_7I$  和  $n-C_4F_9I$  气体激光器<sup>[8]</sup>,在 7.3kW 输入光功率时获得脉冲能量 73mJ,平均输出功率 525mW,斜率效率 0.074%,最大理论效率 0.2%。

1991 年该机构的 H. J. Lee 报道了太阳光泵浦气体激光器的最新结果,采用氙弧灯太阳模拟器泵浦碘分子激光器获得 24W 的激光输出<sup>[9]</sup>,文章预测高能量太阳光泵浦激光器可能的应用领域包括处理有毒垃圾、光分解水生产氢气、空气/水污染控制等。

此外,以色列的 Weizmann 科学研究所研究了太阳光泵浦可调谐气体激光器,对比研究了 VIA 族  $S^{2-}$ 、 $Se^{2-}$ 、 $Bi^{2-}$ 、 $Te^{2-}$  元素的金属硫化物,结果表明,含  $Te^{2-}$  元素的金属硫化物是最适合的太阳光泵浦可调谐气体激光器工作物质<sup>[10]</sup>。

迄今为止,对太阳光泵浦气体激光器的研究还停留在理论和实验室模拟阶段,还未见在实际太阳光泵浦下获得激光输出的报道。其中原因在于,真实太阳光功率密度低,要达到太阳模拟器所提供的泵浦功率,需要非常大面积的汇聚系统,并能将汇聚的太阳光有效耦合到工作物质中。另外,真实的太阳光线具有很小的发散角,与模拟器发出的光线光路有一定的差别,模拟条件下的汇聚系统在户外真实太阳光泵浦条件下不能完全适用。这些差别大大提高了系统设计和制备的成本与难度。此外,在空间应用中,激光器的体积重量是必须考虑的因素,在这方面气体激光器并不占优势。

## 1.4 太阳光泵浦固体激光器

太阳光直接泵浦激光器中,成功获得激光输出报道最多的是固体激光器。根据分类方法的不同,对其可以分成以下几种:

- (1) 按泵浦方式,有端面泵浦和侧面泵浦;
- (2) 按汇聚太阳光功率方式,有反射式汇聚与透射式汇聚;
- (3) 按汇聚方案,有成像式汇聚、非成像式汇聚和阵列式混合汇聚。

其中,太阳光汇聚系统是太阳光直接泵浦激光器的关键环节,聚光效果决定激光器能否出光。从汇聚方案的角度对各种太阳光直接泵浦的激光器系统进行归类并分述如下。