



华夏英才基金学术文库

多丽萍 金玉奇 杨柏龄 编著

气流化学激光测试诊断技术

(第二版)



科学出版社

www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

气流化学激光测试诊断技术

(第二版)

多丽萍 金玉奇 杨柏龄 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面系统地论述了气流化学激光器性能参数的测试诊断技术及相关基础理论。对超音速混合流场、超音速流的气流速度、高速流动的介质温度、激光输出功率/能量、小信号增益系数、光束质量、镜面曲率、微弱吸收、高反射率以及激光器输出频谱特性的测试诊断技术均有比较详细的阐述；同时介绍了氧碘化学激光器单重态氧绝对浓度、氯气利用率、碘解离率及水汽含量的测试方法。

本书可供激光领域特别是气体激光、气动激光及化学激光等相关领域的科研技术人员参考,也可作相关专业研究生的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

气流化学激光测试诊断技术/多丽萍,金玉奇,杨柏龄编著. —2版. —北京:科学出版社,2008

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-020028-0

I. 气… II. ①多…②金…③杨… III. 气体流动-化学激光器-诊断
IV. TN248.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 007356 号

责任编辑:朱 丽/责任校对:张 琪

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年2月第 二 版 印张:16

2008年2月第二次印刷 字数:301 000

印数:1—2 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

第一版序

气流化学激光器是一类重要的激光器，其历史与固体激光器几乎一样长。大多数气流激光器是电激励的，这对于实现规模放大可能是一个制约，因此输出功率在几万瓦以上的电激励气流激光器是很少见的。而基于化学能的化学激光器则没有这个限制。它们使用本身携带的化学能源，对各种化学激光器来说，每千摩尔的反应物均可产生几十兆焦的激光能，从而实现了激光器的轻便性和可移动性，这是化学激光器的一大优点。

继 20 世纪 70 年代初期兴起的氟化氢/氟化氙化学激光器之后，波长更短、反应条件更温和、激射工质寿命更长的氧碘化学激光器作为一颗新星在八九十年代冉冉升起。化学激光器的研制是一项极为细致的过程，它要求诸多方面的测试诊断工作。《气流化学激光测试诊断技术》一书以氧碘化学激光器为蓝本，详尽讨论了研制的各个主要方面所需要的诊断测试，完全适应了这一领域技术的发展趋势。

当前氟化氢/氟化氙和氧碘化学激光器都使用超音速混合喷管阵列，因而有效地加速了反应物的混合，并减少了携能工质的猝灭或弛豫。超音速喷射过程还显著地降低了激射工质的温度，从而使增益系数大幅度提高。这些都使超音速混合喷管阵列技术成为研制高能气流化学激光器的一项核心技术，也是该书重视超音速喷射过程诊断的原因。

该书还详细地讨论了电子激发态的分子氧-单重态氧的浓度测量和激射工质碘的有关测量，这关系到化学能源中可用能的制备，它直接影响化学激光器的效率。

该书用较大的篇幅论述了与其他类型激光器大致相同的，光学谐振腔及其相关部件参数的测量。这样，由于研究工作的实际需要而把化学、气动力学、光学三大学科的许多重要测试技术放到一起来讨论，并着重其相互交叉，是该书的一大特色，它涉及面的广泛是过去同类书籍所没有做到的。

该书所讨论的众多测试方法绝大多数是作者亲身实践过的，并在某些点上有所创新，比如第 3、7、8 章的内容，特别是 3.1.4 小节和 7.2 节的内容更是首创。因此，该书可以说是作者近七八年来科学实践的总结。可以看出，作者在科

研上的冲刺力和创新意识都很强。预祝作者在今后的科研历程中取得更好的成绩。

综上所述，该书的新颖性、前沿性达到了国际水平，是从事氧碘化学激光器及相应科研领域的重要和必备的参考资料，具有较高的出版价值。

张存浩

2004年5月

第二版前言

本书是在 2005 年 1 月出版的《气流化学激光测试诊断技术》的基础上修订完成的。

正如本书初版时我在前言中写到的那样：气流化学激光器是一门多学科多领域的交叉科学技术，涉及到化学、化工、物理、气动、光电子、机械、计算机等科学和技术。一直以来，我都在想，如果能将气流化学激光器相关的基础理论编著成一本书，对于从事气流化学激光的研究人员无疑是非常方便的。但是限于我们的学识水平和时间因素，一直未能如愿。因此在《气流化学激光测试诊断技术》再版之时，除了对原书的一些错误和易混淆的单位、提法上做些更正和明确以外，还增加了有关气流化学激光器基础理论方面的初步内容，比如化学反应基础、气动理论、增益发生原理及工作特性和光学谐振腔理论。

希望《气流化学激光测试诊断技术》（第二版）的出版，能对气流化学激光器的部分共性的基础理论做一个初步的整理和归纳，以满足不同专业背景的且从事气流化学激光器研究的人士对气流化学激光理论知识方面的需求；另外也为满足更多的读者对《气流化学激光测试诊断技术》的需求。特此再版。

最后，

感谢华夏英才基金对本书出版的资助！

感谢科学出版社对本书出版的大力支持！

感谢朱丽编辑对本书第一版和第二版的出版所作的大量工作！

由于编者的水平有限，本书难免存在一些缺点和不足之处，请读者批评指正。

多丽萍

2007 年 6 月

第一版前言

气流化学激光器在激光器家族中占有重要的位置,无论是工业应用还是国家防御应用方面,都显示出巨大的优势,有着不可替代的作用。由于它们都具有自携带能和气体流动的特点,都具有超音速气动组件以及光学谐振腔等组件,因此它们在测试诊断技术方面,存在着许多通用的技术,比如:激光的光学参数测试技术以及气流的气体动力学参数的诊断技术等。本书将以气流化学激光为蓝本,讨论激光器的共性参数测试技术,同时还讨论氧碘化学激光特有的测试诊断技术。

氧碘化学激光器是目前化学激光器家族中波长最短的激光器,也是目前唯一工作在电子态之间跃迁的化学激光。因具有高能(出光介质含有 91.4kJ/mol 的能量)、高效(最高化学效率已达 41%)、光纤传输性能好(光纤损耗 $3\sim 5\text{dB/km}$)、大气传输窗口等特点,它在军事、工业、医疗等领域有很好的发展和应用前景。尤其是美国机载激光武器计划的实施,其核心部件就是兆瓦级的氧碘化学激光器。因此氧碘化学激光器的发展受到许多国家的关注。

气流化学激光器自身的主要性能参数,如输出功率和化学效率、光束质量、小信号增益、流场特性及腔镜性能等共性参数,以及以氧碘化学激光器为蓝本的特有的性能参数的测试技术,在本书中都有较详细的阐述。

随着氧碘化学激光器的深入发展,提高氧碘化学激光器的化学效率和发展其关键技术成为专家们最关心的焦点之一,因此为提高化学效率和突破关键技术,氧碘化学激光器的参数测试和诊断技术研究具有重要的现实意义。结合大连化学物理研究所多年的实践和积累,以及同行科学家在氧碘化学激光测试诊断技术所做的工作,本书对氧碘化学激光器测试诊断技术进行了编写和整理。从专业学科的角度来分,可以分为三部分:第一部分是氧碘化学激光器相关反应动力学参数的测试诊断,包括单重态氧绝对浓度、氯气利用率、小信号增益及其分布、增益线形、碘解离率及水汽含量等诊断技术。第二部分是气流化学激光器相关光学参数的测试诊断,包括光束质量测试技术,镜面粗糙度、面形吸收和高反射率等参数的测试技术,同时也包括氧碘化学激光输出频谱特性及其偏振特性的测试技术。第三部分是气流化学激光器气体动力学参数的测量技术,包括超音速混合流场、超音速流的气流速度及高速流动的气体介质温度等测量技术。从氧碘化学激

光器的各组成器件来分,可以分为9章:第1章为绪论,第2章为氧碘化学激光器,第3章为单重态氧发生器主要性能参数及其测量,第4章为碘蒸气发生器的相关测量技术,第5章为超音速混合喷管的气动参数测量,第6章为光学谐振腔结构及腔镜有关性能的测量,第7章为激光输出功率和小信号增益的测量,第8章为激光输出光束质量的测量,第9章为激光输出频谱特性的测量技术。为了使读者能更清晰、更容易地了解本书,采用了从激光器器件角度划分章节。希望能够通过本书的出版,使读者了解和掌握有关气流化学激光,特别是氧碘化学激光性能参数的意义及测试手段和方法。

由于时间和作者学识水平所限,错误不当之处难免,恳请读者批评指正。

作者在写作过程中,得到了中国科学院大连化学物理研究所张存浩院士、庄琦研究员和崔铁基研究员的热情鼓励及有益的指导,在此表示衷心感谢!

感谢中国科学院科学出版基金和大连市学术专著出版基金的资助。

作 者

2004年3月

目 录

第一版序

第二版前言

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 激光的发明与分类	1
1.1.2 气流化学激光器	2
1.1.3 第一代气流化学激光器——HF/DF 化学激光器	3
1.1.4 第二代气流化学激光器——氧碘化学激光器	8
1.1.5 超音速连续波氧碘化学激光器的基本结构	12
1.2 气流化学激光器相关的理论基础	22
1.3 气流化学激光器的主要性能参数	22
1.3.1 输出功率和化学效率	22
1.3.2 光束质量	23
1.3.3 小信号增益系数	23
1.3.4 流场特性	25
1.3.5 腔镜的性能参数	25
1.3.6 氧碘化学激光器的主要性能参数	26
参考文献	27
第 2 章 化学反应基础	28
2.1 化学反应速率与化学平衡	28
2.1.1 化学反应速率	28
2.1.2 化学平衡	30
2.1.3 吉布斯自由能和自发过程	31
2.2 化学反应动力学基础	33
2.2.1 什么是化学反应动力学	33
2.2.2 化学反应的动力学规律	34
2.2.3 分子间传能与弛豫理论	39
2.3 HF/DF 化学激光器化学反应基本原理	44
2.3.1 HF/DF 化学激光器的氟原子源	44

2.3.2 HF/DF 化学激光器的基本原理	46
2.4 氧碘化学激光器的基本原理	48
2.4.1 氧碘化学激光器的化学能源	48
2.4.2 氧碘化学激光器的基本原理	48
参考文献	51
第3章 气动理论	52
3.1 气动技术在高功率激光中的发展及其意义	52
3.2 气体动力学基本知识	53
3.2.1 滞止状态	54
3.2.2 完全气体的绝热流	55
3.2.3 完全气体的等熵流	56
3.3 激光器喷管的特点	58
3.4 激光器喷管的线型	59
3.5 激光器喷管参数的选取对激光器性能的影响	60
参考文献	62
第4章 连续波氧碘化学激光器增益与工作特性	63
4.1 COIL 的增益与功率提取	63
4.1.1 光腔流动工作介质密度恒定条件下的增益与功率提取	63
4.1.2 光腔流动工作介质密度变化条件下的增益与功率提取	66
4.2 输出光强与腔内往返振荡光强的关系	71
参考文献	72
第5章 光学谐振腔理论	74
5.1 光学谐振腔的模式	74
5.1.1 驻波条件	74
5.1.2 纵模	75
5.1.3 横模	76
5.2 光学谐振腔的损耗、 Q 值及线宽	76
5.2.1 光腔的损耗	76
5.2.2 光子的寿命	77
5.2.3 无源腔的 Q 值	78
5.2.4 无源腔的线宽	79
5.3 光学谐振腔的几何光学分析	79
5.3.1 光线传输矩阵	79
5.3.2 共轴球面腔的稳定条件	80
5.4 一般稳定球面腔的模式特征	83

5.4.1 ABCD矩阵方法求解一般稳定腔的模参数	84
5.4.2 等价共焦腔求解一般稳定腔的模参数	85
5.4.3 传播圆作图方法求解一般稳定腔的模参数	86
5.5 光学谐振腔的衍射理论分析	89
5.5.1 菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程	89
5.5.2 复杂光学系统的衍射积分——Collins 公式	91
5.5.3 Fox-Li 数值迭代法	92
5.5.4 快速傅里叶变化法	93
5.5.5 非稳腔的模参数和共轭像点	93
5.5.6 非稳腔的光束近场和远场强度分布	95
5.5.7 束转动 90 度环形非稳腔(UR90)	96
参考文献	102
第 6 章 重要物种浓度的测量	104
6.1 单态氧绝对浓度(或单重态氧产率)的测量技术	104
6.1.1 量热法	104
6.1.2 吸收光谱法	105
6.1.3 拉曼光谱法	108
6.1.4 模拟体光源标定法	114
6.2 氯气利用率的测量技术	122
6.3 单重态氧气流中水汽含量测量	123
6.3.1 吸收光谱法	123
6.3.2 发射光谱法	124
6.4 碘蒸气发生器的相关测量技术	125
6.4.1 概述	125
6.4.2 碘流量测量	125
6.4.3 碘分子的解离机理	127
6.4.4 碘分子的解离率	134
参考文献	135
第 7 章 超音速混合喷管的气动参数测量	137
7.1 概述	137
7.2 气流激光混合流场测量技术	142
7.2.1 激光诱导荧光测量流场技术	142
7.2.2 化学发光法诊断流场	142
7.3 气流化学激光器介质的测温技术	144
7.3.1 激光诱导荧光光谱测温技术	144

7.3.2 自发拉曼散射光谱测温技术	145
7.3.3 激光多普勒线型测温技术	149
7.4 高速流动气体测速技术	150
7.4.1 毕托管技术	150
7.4.2 激光多普勒测速技术	151
7.4.3 激光双焦点测速技术	156
参考文献	158
第8章 光学谐振腔结构及腔镜有关性能的测量	159
8.1 稳定腔与非稳腔	159
8.1.1 稳定腔	159
8.1.2 非稳腔	160
8.2 腔镜的长曲率半径测量	161
8.2.1 直接测量法	161
8.2.2 像散法测量镜子曲率半径	162
8.2.3 牛顿环方法	162
8.2.4 Murty 干涉仪法	163
8.2.5 激光 Fizeau 干涉仪法	165
8.3 腔镜高反射率的测量	167
8.4 腔镜热变形的测量	169
8.4.1 单块平板型横向剪切干涉仪	169
8.4.2 双平板剪切激光干涉仪	170
8.4.3 二维剪切干涉法	171
8.5 腔镜对强激光微吸收的测量	172
参考文献	174
第9章 激光输出功率和小信号增益的测量	176
9.1 激光输出功率和能量的测量	176
9.1.1 转针采样高能激光监测系统	176
9.1.2 积分球技术	177
9.1.3 能量吸收器技术	179
9.2 小信号增益系数的测量技术	180
9.2.1 极大损耗法和 P-T(变耦合率)法	181
9.2.2 直接测量法	183
9.2.3 小信号增益分布的测量	186
9.2.4 增益谱线及增益线宽的测量	190
9.3 氧碘化学激光的饱和光强	198

参考文献	198
第 10 章 激光输出光束质量的测量	200
10.1 激光光束的性能参数及其定义	200
10.2 非稳腔激光光束质量	204
10.3 转筒或旋转测量技术	206
10.4 哈特曼测量近场强度和相位技术	208
10.5 CCD 或热释电阵列成像测量技术	209
参考文献	211
第 11 章 激光输出频谱特性的测量技术	212
11.1 激光输出的模式和线宽极限	212
11.2 氧碘化学激光器输出频谱特性	216
11.3 激光输出频谱测试技术	218
11.3.1 F-P 干涉法	219
11.3.2 FFT 频谱分析法	228
11.3.3 波长测定和波长计	231
参考文献	238

第1章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 激光的发明与分类

激光是20世纪60年代出现的重大科学技术成就之一。1916~1917年爱因斯坦(A. Einstein)在光量子论的基础上,发展了自发辐射和受激辐射的理论,预言了存在着原子产生受激辐射放大的可能性,为研究微波激射器和激光器提供了理论依据。受激辐射理论并没有立即导致激光的发明,直到50年代,人们才知道可以通过粒子数布居反转状态的原子、分子系统产生受激辐射。1951年,汤斯(C. H. Towns)、巴索夫(N. G. Basov)和普洛霍洛夫(A. M. Prokhorov)首先创造性地提出了“微波受激辐射放大”的概念。汤斯等人于1954年成功地研制了微波量子放大器(microwave amplification by stimulated emission of radiation, Maser),首次在氨分子束上实现了粒子数反转,获得了波长为1.25cm的微波受激放大。1958年,汤斯和肖洛(A. L. Schawlow)以及普洛霍洛夫分别提出了将Maser的原理推广到光波波段的建议,从理论上指出了在光学谐振腔内通过受激辐射产生相干光的可能性。1960年,梅曼(T. H. Maiman)按照他们的建议,研制成世界上第一台激光器(light amplification by stimulated emission of radiation, Laser)——红宝石激光器,它标志着激光技术的诞生^[1]。

第一台激光器问世以后,人们很快认识到激光将会成为人类科学研究和技术进步的重要工具,许多科学工作者都致力于激光基础研究,使激光技术得到了迅速发展。1961年,研制成第一台氦氖混合气体连续波激光器,波长为1150nm。同年,研制成钕玻璃激光器。1962年,研制成可见波段的氦氖激光器,波长为632.8nm。同年,砷化镓半导体激光器问世,波长为840nm。1964年,研制成氩离子激光器、二氧化碳激光器、化学激光器及掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器。1966年,固体锁模激光器研制成功,获得超短脉冲激光。同年,染料激光器问世。1970年首次研制成功准分子激光器,1977年研制成中红外波段的自由电子激光器。激光技术的飞速发展,促进了科学技术的进步。新学科“量子电子学”的形成和发展便是一例。

激光器的分类方法很多,按工作物质的形态不同,可将激光器分为:气体激光器(如氦氖激光器、二氧化碳激光器、准分子激光器等),固体激光器(如红宝石激光器、钕玻璃激光器、掺钕钇铝石榴石激光器等),半导体激光器(如砷化镓激光器、镓

化铷激光器、硫化锌激光器等),染料激光器[如罗丹明 6G(Rhodamine 6G)染料激光器等],自由电子激光器等。按不同的激励方式也可将激光器分为光激励激光器、放电激励激光器、化学激光器、核泵浦激光器等。按运转方式又可将激光器分为连续运转激光器和脉冲运转激光器。因此,往往同一个激光器可以有不同的称呼,如电子束引发脉冲 HF/DF 化学激光器,连续波 DF/HF 化学激光器等。

激光问世到现在已经 40 多年了,现在的激光功率、能量、光束质量等性能和 20 世纪 60 年代初期相比都有很大的提高,尤其是 70 年代中期以后,激光技术飞速发展,出现了许多新型的激光器,如准分子激光器、自由电子激光器和 X 光激光器等。归纳起来,有两个显著的特点:第一,把不同领域的技术应用于激光技术之中。例如,在自由电子激光中运用强流电子直线加速器技术;在化学激光器中运用气体动力学技术;在准分子激光器中运用强流相对论电子加速器技术;在半导体激光器中运用半导体技术。第二,由于激光功率密度的提高,导致了非线性光学现象的出现,并在激光技术中得到了广泛的应用。

1.1.2 气流化学激光器

在气体激光器中存在着诸多的种类,依据国际光学工程学会举办的两年一次的“Gas Flow and Chemical Laser”国际专题会议,其中的气流化学激光器是气体激光器中的一个重要分支。那么什么是气流激光器呢?气流激光器即气体流动的激光器,也就是说,出光的气体介质是流动的而非静态的。比如气动 CO_2 激光器、HF/DF 化学激光器、氧碘化学激光器均为气流激光器。

那么,什么是化学激光器呢?化学激光器是指其激活介质的粒子数反转是由放能化学反应所驱动,并实现激射的激光系统。也就是说,在放能的化学反应过程中,直接或间接地形成粒子数反转而运转的激光器,都可称作化学激光器。产生化学激光的必要条件^[2]是:第一,存在放能的化学反应,这是化学激光器的能源。第二,化学反应所释放的能量必须转化为某种粒子的热力学能,使其达到某个激发态,称为泵浦过程。第三,化学泵浦速率必须大于各种因素对激发态粒子的弛豫过程的速率,形成激发态粒子数反转。化学激光器涉及的放能的化学反应类型,化学反应所释放的能量在产物粒子中的分配方式以及激发态粒子的弛豫过程,都在非平衡反应的化学动力学中得到充分的论述。

因此燃烧驱动连续波 HF/DF 化学激光器和氧碘化学激光器是气流化学激光器的典型代表,当然也包括燃烧驱动的气动 CO_2 激光器。

气流化学激光器也有其诞生和发展的历史。

1965 年,卡斯珀(J. Kasper)和皮门特(G. Pimentel)研制成第一台氯化氢(HCl)化学激光器。其激活介质的粒子数反转是在放热化学反应过程中实现的,即将化学反应释放能量的一部分有选择地激发反应产物(原子或分子)形成粒子数

反转。有些化学反应的产物也具有一些亚稳态能级,而且,其中有的被化学反应能激发的粒子数比它的低能级粒子数还高,因而形成了粒子数反转。化学激光器都是利用放热化学反应。化学激光器的引发方式可以是光引发、放电引发,也可以是纯化学引发。1967年,卡姆帕(Kampa)和皮门特利用 UF_6 和 H_2 的混合物,受到闪光光解时产生脉冲 HF 化学激光器,其波长为 $2.7\mu\text{m}$ 。不久,多伊奇(Deutsch)用放电激励氢和各种氟利昂(氟化烃)的混合物得到振动激发态的 HF 分子,并观察到 HF 化学激光器。1969年,连续波燃烧驱动 HF/DF 化学激光器研制成功。氧化剂和燃料各自喷射入光学谐振腔中,并以超音速混合。由于出光效率与混合速率的关系很大,因此,一般使用大量的微型喷嘴,以达到均匀快速混合的目的。到20世纪80年代,连续波 HF/DF 激光器功率已达到兆瓦量级^[2]。

1978年,美国空军武器实验室首次研制成功氧碘化学激光器,它是目前波长最短的高能化学激光器。氧碘化学激光器是由电子跃迁而不是转动或振动跃迁运转的化学激光器,它是通过原子碘 $\text{I}(^2\text{P}_{1/2}) \rightarrow \text{I}(^2\text{P}_{3/2})$ 的磁偶极跃迁产生受激辐射,获得波长为 $1.315\mu\text{m}$ 的激光输出。原子碘的粒子数反转,是依靠亚稳态粒子 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 与电子基态的碘原子发生共振碰撞,实现能量转移来维持的。亚稳态氧 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 的寿命是45min,它本身不能产生激光。 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 分子是通过 KOH 、 H_2O_2 和 Cl_2 之间的化学反应产生的。

1984年,我国科学工作者采用光引发机制和放电引发机制,研制成脉冲氧碘化学激光器。采用 $\text{O}_2(^1\Delta)$ - CH_3I -Ar 体系,光敏性碘化物 CH_3I 在闪光灯发出的紫外光的引发下,产生碘原子,与预混合的 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 进行氧碘共振传能,形成激发态碘原子 $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ 的粒子数反转,产生脉冲激光输出。放电引发机制是利用低能电子与碘化物发生非弹性碰撞,产生碘原子,而原子碘与亚稳态氧分子 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 发生共振传能和激射的链过程,产生脉冲激光输出。

化学激光器的频谱很宽,可从紫外到红外,乃至微米波段;能把化学能直接变成激光;在某些化学反应中可获得很大的能量,得到高功率激光输出。HF/DF 化学激光器技术比较成熟,目前激光输出功率已达 2.2MW 。氧碘化学激光器是第二代化学激光器,它可以以脉冲方式或连续方式运转,目前连续波氧碘化学激光器作为美国机载激光(ABL)武器计划的核心部件,输出功率达到兆瓦级水平,光束质量也达到近衍射极限的水平。

1.1.3 第一代气流化学激光器——HF/DF 化学激光器

1969年 Spencer 等人将气动技术引入到化学激光器中,解决了反应物的快速混合问题,研制成功了第一台连续波 HF 化学激光器。这类连续波 HF 化学激光器,产生粒子数反转的方法是将分别注入的氧化剂和燃料经过超音速混合喷管进入光腔,反应物混合在一起就产生一个快速强放能的泵浦反应,使反应产物 HF 分

子处于振动激发态 $\text{HF}(v)$, 当粒子数形成部分反转就可实现受激发射, 发出 $2.7 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 激光。

连续波 HF 化学激光器自从采用燃烧驱动技术和超音速混合技术后, 激光功率获得飞速发展。所谓燃烧驱动就是将含 F 的氧化剂和燃料 D_2 气混合燃烧, 燃烧所致的高温使过量的含 F 氧化剂分解出 F 原子, F 原子经超音速喷管快速“冻结”下来, 与喷管出口面处注入的燃料 H_2 反应产生振动激发态 $\text{HF}(v)$, 称 HF 化学激光器。如果在燃烧室注入的燃料改用 H_2 , 而喷管尾部注入的燃料改用 D_2 , 称为 DF 化学激光器。由于二者有许多共同点, 简称 HF/DF 化学激光器。

20 世纪 70 年代研究了各种 F 原子引发技术, 如光引发、热引发、放电引发和电子束引发。在放电引发方案中又派生出紫外预电离, X 光预电离等多种电离技术, HF/DF 化学激光器得到飞速发展, 脉冲的 HF/DF 化学激光器由于实现了链反应, 得到特别重视, 同时, 连续波 HF/DF 化学激光器也得到了极大的发展, 1983 年美国建成了一台输出功率达 2.2 MW 的 DF 化学激光器(中红外先进化学激光器, MIRACL), 光束质量达到 2 倍衍射极限。近年来美国正在建造代号为 ALPHA 的 5 MW HF 化学激光器作为太空激光武器之用^[2]。

HF/DF 化学激光器的研究在化学激光器研究领域和发展史中具有相当重要的地位, 通过它研究了化学激光器振-转跃迁的基本原理, 通过它研制了化学激光器普遍使用的关键技术, 如脉冲化学激光器中, F 原子、I 原子的各种引发技术, 连续波化学激光器中燃烧室, 超音速喷管, 压力恢复系统, 各种光腔等。因此 HF/DF 化学激光器是化学激光器的重要代表, 是化学激光器发展史中一个里程碑, 化学激光器界称它为第一代化学激光器。

燃烧驱动连续波 HF/DF 化学激光器主要由燃烧室、喷管组件、光学谐振腔和扩压系统四大部分组成, 如图 1-1 所示^[3]。下面将依次介绍各部分的具体结构和主要作用。

燃烧室是一个高温高压反应器, 为泵浦反应提供所需的 F 原子, 其设计 requirements 是充分混合和热损失最小。对于 HF 化学激光器来说, 燃烧室中不能用 H_2 或含氢的化合物, 其原因是燃烧后混合气体中大量的基态 HF 分子进入光腔流场后, 基态 $\text{HF}(0)$ 是 HF 激光器 $v=1 \rightarrow v=0$ 激射带的强吸收背景, 足以使振动态 $v=1$ 和 $v=0$ 之间粒子数不能反转, 同时 $\text{HF}(0)$ 和 $\text{HF}(v)$ 的快速能量转移反应也可能使高振动态的激射效率很低或根本不能反转。对于 DF 化学激光器, 燃烧室燃料的选择有相同的准则, 一般常用 H_2 和各种相对分子质量较低的碳氢化合物如 C_2H_2 或 C_2H_4 等作燃料。DF/HF 化学激光器燃烧室中常用的氧化剂有 F_2 、 NF_3 和 SF_6 , 常用的稀释剂有 He 和 N_2 。表 1-1 给出了几种常用燃料、氧化剂和稀释剂的一些属性。