



中科院长春光机所
CIOMP

高功率CO₂激光器 及其应用技术

郭 劲 李殿军 王挺峰 等 编著



科学出版社

高功率 CO₂ 激光器及其应用技术

郭 劲 李殿军 王挺峰 等 编著

科 学 出 版 社

北 京



内 容 简 介

本书介绍了 CO₂ 激光的基本原理及其实际应用情况和发展趋势,反映了 21 世纪以来取得的最新科技成果。本书的内容以描述放电泵浦 CO₂ 激光器及其相关技术为主,并以高功率 CO₂ 激光作为重点描述对象,对其基本原理、相关技术做了系统阐述。同时对经常出现的某些易引起混淆、误解与误用的概念、术语和技术问题等做出了澄清性的解释和说明。本书着重于 CO₂ 激光的实际研制和应用过程,较少着墨于理论论述。

本书适合从事 CO₂ 激光研制和应用的科技人员和工程技术人员阅读使用,也可作为相关专业在校师生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高功率 CO₂ 激光器及其应用技术/郭劲等编著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-034794-7

I. ①高… II. ①郭… III. ①大功率激光器-二氧化碳激光器
IV. ①TN248.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 124923 号

责任编辑:刘宝莉 谷 宾 / 责任校对:林青梅
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:26

字数:508 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

科技类图书通常都有本身特定的描述方式和侧重的内容,以满足相应读者的需求,这也是同类书籍存在不同版本的重要原因之一。本书也是如此,取材的内容大多来源于目前在研的科技项目,作者都是常年工作在科研一线的工程技术人员,由此确定了本书的基本性质和特点,即以介绍 CO_2 激光器的实际研制、性能测试和工程应用为宗旨,没有过多的理论描述。书中列举的计算、图表、公式以及实际发生的事例等,很多经过工程实践证明或者试验验证,虽然其中有些结论还与现存理论存在相互冲突的地方,但本着实践是检验真理唯一标准的原则,这些一致与不一致的内容本书一概予以采纳,并对出现矛盾的地方进行了具体的分析和解释。可以说,本书所展现的内容集中地代表和反映了近年来 CO_2 激光器在应用领域中取得的最新的科技成果。

本书内容主要由两部分组成。第一部分(第一章~第七章)主要对 CO_2 激光器及其相关技术做了介绍,并以高功率脉冲 CO_2 激光器作为重点阐述对象;同时对经常出现的某些易引起混淆、误解与误用的概念、术语和技术问题等做了澄清性的解释和说明。除了激光加工之外,高功率 CO_2 激光应用的显著特点都涉及大气传输问题,本书第二部分(第八章~第十一章)对高功率 CO_2 激光相关的实际应用作了分门别类的介绍。

本书撰写分工如下:第一章郭劲研究员,第二章张来明博士,第三章孟范江高级工程师,第四章邵春雷研究员,第五章陈飞博士,第六章李殿军研究员,第七章杨贵龙高级工程师,第八章王挺峰副研究员、郭汝海博士、赵帅博士、邵俊峰博士,第九章王锐博士、张合勇博士,第十章张来明博士、郭汝海博士,第十一章甘新基副教授。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 激光术语与基本概念问题	1
1.1.2 激光常用计量单位、符号	3
1.2 CO ₂ 激光简介	5
1.2.1 CO ₂ 激光器及其分类	5
1.2.2 封离式 CO ₂ 激光器	5
1.2.3 快轴流 CO ₂ 激光器	7
1.2.4 横流 CO ₂ 激光器	11
1.2.5 CO ₂ 激光器技术特点	14
1.3 CO ₂ 激光发展简史	15
1.4 实际应用中常见问题解释	17
参考文献	24
第二章 高功率脉冲 CO ₂ 激光器的基本原理	27
2.1 CO ₂ 激光器的工作原理	27
2.1.1 CO ₂ 分子振转能级结构	27
2.1.2 CO ₂ 激光器的能级寿命和弛豫过程	29
2.1.3 CO ₂ 激光器的激发过程	30
2.1.4 辅助气体	31
2.2 TEA CO ₂ 激光器	33
2.2.1 概述	33
2.2.2 TEA CO ₂ 激光器的典型技术	37
2.3 小结	39
参考文献	39
第三章 气体放电激励技术	42
3.1 气体放电的基本特性	42
3.1.1 气体放电中的粒子	42
3.1.2 粒子间的相互作用	43
3.2 气体放电激发	47

3.2.1	电子碰撞激发	47
3.2.2	共振激发能量转移	49
3.2.3	电荷转移激发	50
3.2.4	彭宁电离	51
3.3	横向激励大气压 (TEA) CO ₂ 激光器的激励技术	51
3.3.1	高功率 TEA CO ₂ 激光器对激励电源的要求	51
3.3.2	高功率 TEA CO ₂ 激光器激励电源组成和工作原理	52
3.3.3	工频 LC 谐振充电电源技术	53
3.3.4	高频开关充电电源技术	54
3.3.5	激励电路	54
3.4	TEA CO ₂ 激光器中的电磁兼容技术	59
	参考文献	61
第四章	高功率 CO₂ 激光器谐振腔技术	63
4.1	光学谐振腔的基本知识	63
4.1.1	光学谐振腔的构成与分类	63
4.1.2	光学谐振腔的作用	64
4.1.3	光学谐振腔的损耗	64
4.1.4	光学谐振腔的稳定性条件	68
4.2	稳定腔	73
4.2.1	一般稳定球面腔的等价共焦腔	73
4.2.2	一般稳定球面腔的模式特征	74
4.3	非稳腔	76
4.3.1	稳定腔的缺点	77
4.3.2	非稳腔的优点	78
4.3.3	高功率 TEA CO ₂ 激光器非稳腔的设计与实验	78
4.4	谐振腔镀膜选支技术	82
4.4.1	镀膜选支技术原理	83
4.4.2	稳定腔 9.3 μ m 选支输出实验	83
4.4.3	非稳腔 9.3 μ m 选支输出实验	86
4.4.4	稳定腔 10.6 μ m/9.3 μ m 两波长切换输出	89
	参考文献	91
第五章	CO₂ 激光调制与短脉冲输出技术	93
5.1	激光调制	93
5.1.1	激光调制的基本概念	93
5.1.2	电光调制	94

5.1.3 声光调制	102
5.1.4 其他调制方法简介	108
5.2 调 Q CO ₂ 激光器	110
5.2.1 调 Q 原理	110
5.2.2 电光调 Q CO ₂ 激光器	111
5.2.3 声光调 Q CO ₂ 激光器	121
5.3 超短脉冲 CO ₂ 激光器	129
5.3.1 超短脉冲 CO ₂ 激光器研究进展	129
5.3.2 高功率 CO ₂ 超短脉冲的获得	130
参考文献	138
第六章 CO₂ 激光器波长调谐与变频技术	140
6.1 CO ₂ 激光波长调谐技术	140
6.1.1 CO ₂ 激光器输出谱线	140
6.1.2 封离式 CO ₂ 激光器波长调谐技术	143
6.1.3 高功率 CO ₂ 激光器波长调谐技术	148
6.1.4 高功率 CO ₂ 激光器特定波长输出相关技术	149
6.2 CO ₂ 激光变频技术	150
6.2.1 高功率 CO ₂ 激光倍频技术	151
6.2.2 高功率 CO ₂ 激光差频技术	160
6.3 CO ₂ 激光波长变换技术	161
6.3.1 高功率 CO ₂ 激光产生极紫外波段辐射	162
6.3.2 脉冲 CO ₂ 激光受激拉曼散射	163
6.3.3 相对论电子束与脉冲 CO ₂ 激光作用产生可见光波长	174
参考文献	177
第七章 激光参数测试技术	179
7.1 激光波长	179
7.1.1 CO ₂ 激光谱线分析法检测波长	179
7.1.2 光栅分光法检测波长	180
7.2 激光功率	181
7.2.1 平均功率检测	182
7.2.2 脉冲功率检测	183
7.2.3 功率不稳定性	184
7.3 激光能量	184
7.3.1 单脉冲能量	184
7.3.2 重频放电能量	185

7.3.3 能量密度	185
7.3.4 能量不稳定性	186
7.4 激光束发散角	186
7.4.1 光斑尺寸	187
7.4.2 近场发散角	187
7.4.3 远场发散角	188
7.4.4 激光束指向稳定性	190
7.5 激光脉冲宽度	191
7.5.1 激光重复频率	191
7.5.2 激光脉冲宽度	192
7.6 激光器效率	192
7.6.1 电光转换效率	192
7.6.2 插头效率	193
参考文献	193
第八章 应用基础	195
8.1 激光定向发射技术	195
8.1.1 高斯光束整形——衍射理论和设计	195
8.1.2 激光束的监视对准技术	211
8.1.3 激光束的指向稳定技术	215
8.1.4 激光束的聚焦发射技术	218
8.1.5 高功率激光元件	225
8.2 激光大气传输	228
8.2.1 地球大气	228
8.2.2 大气湍流效应	236
8.2.3 大气湍流的激光传输效应	240
8.2.4 大气热晕效应	241
8.2.5 受激拉曼散射	245
8.2.6 大气击穿	246
8.3 CO_2 激光辐照效应	247
8.3.1 激光辐照效应基础理论	247
8.3.2 脉冲 CO_2 激光与物质的相互作用	263
参考文献	271
第九章 激光探测技术	275
9.1 CO_2 激光探测概述	275
9.1.1 CO_2 激光雷达发展历程	275

9.1.2 CO ₂ 激光雷达的分类	275
9.2 CO ₂ 激光测距技术	279
9.2.1 CO ₂ 激光测距概述	279
9.2.2 脉冲激光测距原理	279
9.2.3 激光测距方程及系统噪声分析	280
9.2.4 脉冲测距系统	284
9.2.5 国外典型 CO ₂ 脉冲激光测距系统	289
9.3 CO ₂ 激光差分吸收探测技术	292
9.3.1 CO ₂ 激光差分吸收探测概述	292
9.3.2 CO ₂ 激光差分吸收探测原理	293
9.3.3 气体浓度反演算法	294
9.3.4 吸收气体种类辨别	296
9.3.5 CO ₂ 激光差分吸收探测系统	298
9.4 CO ₂ 激光相干探测技术	310
9.4.1 CO ₂ 激光相干探测简史	310
9.4.2 CO ₂ 激光相干探测原理	311
9.4.3 CO ₂ 激光相干探测发射机	313
9.4.4 CO ₂ 激光相干探测接收机	317
9.4.5 CO ₂ 激光相干成像	320
9.4.6 CO ₂ 激光多普勒跟踪	329
参考文献	342
第十章 激光定向能技术	346
10.1 激光推进技术	346
10.1.1 概述	346
10.1.2 大气呼吸式激光推进	347
10.1.3 烧蚀式推进	350
10.1.4 激光微推进	353
10.2 激光武器技术	355
10.2.1 概述	357
10.2.2 CO ₂ 激光武器技术	360
10.2.3 国外 CO ₂ 激光武器	361
10.3 其他应用	365
10.3.1 激光钻井技术	365
10.3.2 激光清洗技术	366
10.3.3 激光驱雾技术	368

10.3.4 激光除冰技术	368
参考文献	369
第十一章 激光加工	371
11.1 激光加工的特点、类型及应用	371
11.1.1 激光加工的特点	371
11.1.2 激光加工用 CO ₂ 激光器	372
11.1.3 激光加工机床	372
11.2 激光打孔	373
11.2.1 激光打孔的物理过程	373
11.2.2 激光打孔的设备	375
11.2.3 典型材料的激光打孔	376
11.3 激光切割	381
11.3.1 激光切割的特点	382
11.3.2 激光切割方式	383
11.3.3 常用工程材料的 CO ₂ 激光切割	384
11.4 高功率激光深熔焊	396
11.4.1 激光深熔焊接理论基础	396
11.4.2 典型材料的激光焊接	396
11.5 激光熔覆与激光合金化	398
11.5.1 激光熔覆	398
11.5.2 激光合金化	400
参考文献	402

第一章 绪 论

激光,是 20 世纪科学史上最重大的发明之一。激光的发明,影响到了人类生活的方方面面,小到纳米技术开发,大到宇宙空间研究,简单到教学演示,复杂到生命科学探索,各方面的科技进步几乎都直接或间接地得益于激光技术的发展。时至今日,激光一词对人们来说已经不再陌生,计算机中的光驱、音响中的扫描系统、舞台上的激光表演、讲台上的指示教鞭以及工业加工中的激光设备等,即使是普通群众对此也是再熟悉不过了。一言以蔽之,激光作为新的应用工具发展速度之快,在科学技术史上较为罕见。究其原因,是这种神奇的光束提供了亘古未有的技术手段和途径,使以前可为的复杂难题变得简单,使以前不可为的事情变成现实,由此促进了科学技术的不断创新与持续进步,这些创新与进步反过来又使“泵浦”激光在新的更高技术层次上获得突破。有理由相信,随着激光技术不断发展,在不久的将来还有可能创造出一个我们无法预见的崭新未来。

1.1 引 言

1.1.1 激光术语与基本概念问题

激光是一种由激光器产生的相干电磁辐射。2008 年 10 月 1 日颁布实施的《激光术语》(GB/T 15313—2008)国家标准,对于“激光”和“激光器”及其相关术语做出了统一的定义。仔细地理解这些定义的真实含义对于认知激光的本质是大有裨益的。必须注意的是,还有些论文、技术报告、科普文章、工程书籍以及各种多媒体资料常将“激光器”错误地理解和定义为“由谐振腔(resonator)、增益介质(gain medium)和泵浦源(pumping source)构成的能够产生相干电磁辐射的器件”,或者与其类似的描述,并将“谐振腔、增益介质和泵浦源”称为构成激光器必备的“三要素”。如果按照这样的定义,则氮分子激光器就不可能属于激光器大家族中的成员了,因为氮分子激光器可以在没有谐振腔的情况下,仍然能够通过行波泵浦过程实现受激发射放大,产生波长为 337nm 的相干电磁辐射,文献一般称其为超辐射现象。之所以出现上述这样的错误解释和定义,主要是由于这些作者对激光的本质没有进行深入理解造成的。其实,《激光术语》国家标准并未限定激光器是如何构成的,而只是对于激光器产生激光的过程和结果做了限定,即要求产生过程为受激发射放大,波长不超过 1mm,辐射是相干的。为彻底搞清楚有关问题,参见《激光术语》做出的定义如下:

“激光器”(laser)定义为“能产生受激辐射波长直到 1mm 的相干辐射的器件。”

“激光”(laser)定义为“由激光器产生的,波长直到 1mm 的相干电磁辐射。它由物质的粒子受激发射放大产生,具有良好的单色性、相干性和方向性。”

“激光装置”(laser device)定义为“由激光器和使激光器工作所必需的外围器件(即冷却、温控、供电和供气等单元)所组成的装置。”

“激光组件”(laser assembly)定义为“由激光装置与专门用来处理光束的光、机、电部件所组成的组件。”

“激光设备”(laser unit)定义为“由一个或多个激光组件以及操作、测量、控制系统所组成的设备。”

无疑,这些定义为实际应用提供了唯一权威性的解释标准。虽然《激光术语》并未给出激光波长在短方向上的规定,但 2011 年 6 月日本理化学研究所和高辉度光科学研究中心联合发表新闻公报称,应用自由电子激光器(FEL)获得了波长为 0.12nm 的(X 射线)激光输出,打破了美国直线加速器相干光源于 2009 年 4 月创下的 0.15nm 的最短波长世界纪录。而在波长的长限方向上,太赫兹波段(即频率 0.1~10THz,相当于波长 30 μ m~0.3mm)的亚毫米激光辐射,是目前已知激光长波的极限。目前仍有少数人习惯上将产生毫米波辐射的器件称为毫米波激光器,但实际上是错误的称呼,应该予以纠正。从以上内容可知,无论采用什么技术手段,只要是具有粒子受激发射放大过程产生的“良好的单色性、相干性和方向性”技术特点的电磁辐射器件,就可以称为激光器。太赫兹波段的电磁辐射已经处于一个交叉的边缘波段,因为它既可以采用光子学(photronics)技术手段产生,也可以通过电子学(electronics)技术手段产生。因此,本书介绍的基于 CO₂ 激光差频技术产生的太赫兹辐射器件,可以叫做太赫兹激光器,而利用电子学技术手段产生的太赫兹辐射器件则不能称之为太赫兹激光器,同理,有些产生 X 射线的器件可以称为 X 射线激光器,而有些则只能称为 X 射线发生装置或者设备,这就像我们不能将探照灯或手电筒发出的光束称为激光一样。

根据《激光术语》规定,在中文里“激光”与“激光器”是有差别的,这一点与英文稍有不同;在英文里,激光和激光器几乎都由“laser”一个词来表示,其所代表的意思需要根据上下文内容来确定,只是在需要特指时,才加上其他限定词来表达,如写成 laser radiation 表示激光。开始时,“laser”(由 light amplification by stimulated emission of radiation 首字母缩写组成)的中文译名很混乱,常见的有脉泽、莱塞、受激发射光、光子放大器、光激励器等译法,命名的混乱给实际应用带来了很大的不便。1964 年,《光受激发射情报》杂志编辑部给中国著名科学家钱学森写了一封信请他给“laser”取一个中国的名字,不久钱学森就回信给编辑部建议命名为“激光”。这个名字既体现了光的本质,又描述了这类光和普通光的不同,具有受激发射、激发态等意义。这个名字提交给同年在上海召开的全国第三届光子学放大

器学术报告会讨论,受到与会者的一致赞同。从此,“laser”这一年轻的新生事物有了统一而有意义的汉语名称。但是,在此需要提醒读者注意的是,目前在中国香港和中国台湾等地仍然还将“laser”翻译为镭(雷)射等,我们只要将其理解为激光而不是别的东西就可以了,知道这一点就可避免了产生歧义。

1.1.2 激光常用计量单位、符号

激光器及其输出激光性质的定量描述方式是通过物理参数实现的。有些领域还对激光参数的计量单位、符号和测量方式等作出了统一的标准规定。本书所述内容大部分符合各类标准的规定,但可能有些习惯上的用法仍然出现在本书中,虽然用法没错,却与某些标准要求冲突,如气压单位托(Torr¹⁾)的使用等,这是考虑到引用公式写法上的一致性和直观性,故未将其转变为标准单位帕(Pa)表示,不过这类内容较少。

以下介绍描述激光参数常用的计量单位、符号,所述内容以符合国际单位制(SI)的要求为准。表 1.1 所示的是国际单位制的基本单位、辅助单位以及并用单位。

表 1.1 常用的计量单位情况

物理量	单位名称	单位符号	备 注
长度	米	m	SI 基本单位
质量	千克	kg	
时间	秒	s	
电流强度	安[培]	A	
热力学温度	开[尔文]	K	
物质的量	摩[尔]	mol	
发光强度	坎[德拉]	cd	
平面角	弧度	rad	SI 辅助单位
立体角	球面度	sr	
时间	分	min	SI 并用单位 注:本栏单位不允许 与 SI 单位组合使用
	[小]时	h	
角度	度	°	
	分	'	
	[角]秒	"	

为灵活而方便地表述各种参数的实际大小,在物理量 SI 单位之前加入词冠将其分成一系列的子单位,例如,在时间单位 s 之前加入词冠符号 m 写成 ms,则表

1) 1Torr=1.333 22×10⁵Pa.下同。

示千分之一秒的意思,参见表 1.2 各个词冠所表示的分度意义;但需注意的是,SI 并用单位中的各种量不能这样使用,如不能在时间 h 前加 m 表示千分之一小时等。

表 1.2 国际单位制词冠

因 数	词冠名称	词冠符号	英文词冠
10^{18}	艾[可萨]	E	exa
10^{15}	拍[它]	P	peta
10^{12}	太[拉]	T	tera
10^9	吉[咖]	G	giga
10^6	兆	M	mega
10^3	千	k	kilo
10^2	百	h	hecto
10^1	十	da	deca
10^{-1}	分	d	deci
10^{-2}	厘	c	centi
10^{-3}	毫	m	milli
10^{-6}	微	μ	micro
10^{-9}	纳[诺]	n	nano
10^{-12}	皮[可]	p	pico
10^{-15}	飞[母托]	f	femto
10^{-18}	阿[托]	a	atto

电泵浦激光器常用的计量单位如表 1.3 所示。

表 1.3 电泵浦激光器常用的计量单位

物理量名称	单位名称	单位符号	单 位	备 注
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}	—
气压	帕[斯卡]	Pa	$kg/(m \cdot s^2)$	—
能量	焦[耳]	J	$kg \cdot m^2/s^2$	—
功率	瓦[特]	W	$kg \cdot m^2/s^3$	—
波长	纳米/微米	nm/ μm	m	针对 CO ₂ 激光常用
脉宽	纳秒/微秒	ns/ μs	s	
容积	升	L	m^3	
电压	伏[特]	V	$kg \cdot m^2/(A \cdot s^3)$	—
电流	安[培]	A	A	—
电阻	欧[姆]	Ω	$kg \cdot m^2/(A^2 \cdot s^3)$	—
电容	法[拉]	F	$A^2 \cdot s^4/(kg \cdot m^2)$	—
电感	亨[利]	H	$kg \cdot m^2/(A^2 \cdot s^2)$	—

1.2 CO₂ 激光简介

1.2.1 CO₂ 激光器及其分类

二氧化碳激光器,常用其化学符号表示为 CO₂ 激光器,是一种以 CO₂ 为主要增益介质的分子气体激光器。虽然称其为 CO₂ 激光器,但目前所用的 CO₂ 激光的增益介质几乎都是由氦气(He)、氮气(N₂)和 CO₂ 这三种气体组成的混合体,因为单一的 CO₂ 激光器的输出强度极低。CO₂ 激光器与氩或氪等采用弧光放电的离子气体激光器不同,它需要辉光放电才能产生粒子数反转进而产生受激发射过程。CO₂ 激光器的主要输出光谱为 9P、9R 和 10P、10R 支跃迁谱带的谱线共计百余条,如果采用谱线调谐技术,可以选择 9~11 μ m 的可调谐波长输出。CO₂ 激光器既可以连续运转输出连续激光,也可以脉冲运转输出重复频率激光脉冲。

为叙述方便,本书按照 CO₂ 激光器的输出能力将其分类为封离式、快(速)轴流式与横流式三种,这个分类基本上代表了该激光器所能够输出的(平均)功率级别:封离式 CO₂ 激光器单位长度输出功率一般在 30~70W/m,整机输出功率取决于放电增益区的长度,通常在百瓦量级水平上;快轴流式的 CO₂ 激光器输出功率则在 300~600W/m,整机输出最高可达数千瓦至数万瓦之间范围;横流式 CO₂ 激光器代表最高的输出功率水平,一般可达到 500~10kW/m,最高输出可以超过 100kW,达到 150kW。对于单纯追求高能量输出的单脉冲 CO₂ 激光器而言,通常采用横流式结构,即所谓的 TEA(transversely excited atmospheric)CO₂ 激光器,辐射的激光能量可达 10kJ 以上。上述分类不能涵盖整个 CO₂ 激光器的全部类型,只是大致地划定了一个界限范围。这个分类已将诸如板条、波导、圆盘等形式的 CO₂ 激光器划归到分离式种类中,并未涉及激光器的泵浦和输出方式方法。

1.2.2 封离式 CO₂ 激光器

封离式大致的意思是指将气体介质封闭在一个特定的容器内。典型的封离式 CO₂ 激光管(未包括电源,若加上激光电源及控制系统则组成完整的激光器)实物照片及其基本结构如图 1.1 所示,由放电管、水套管、储气管、回气管、谐振腔镜、电极等部分组成。三层套管(放电管、水套管、储气管)中放电管是封离式 CO₂ 激光器中关键的部件,它基本上决定了激光输出的特性。普通 CO₂ 激光管常用的材料是硬质玻璃管,有特殊要求时也可利用熔石英制成,采用多层套筒式结构。放电管的直径通常为 8~10mm,管长较长时可适当增大。放电管长度与输出功率成正比。水冷套的作用是冷却工作气体,维持输出功率稳定,而且防止在放电泵浦过程

中,放电管因受热炸裂。储气管的作用一方面增加了增益介质的储气量,减小放电过程中工作气体成分和压力的变化,延长运转寿命,另一方面又增强了放电管的机械强度和稳定性。回气管是连接放电管中两电极空间的细螺旋管,可改善由电泳现象造成的极间电压的不平衡分布,较长的回气管还避免了储气管与电极之间产生放电作用,确保放电只发生在放电管中。封离式 CO₂ 激光器的谐振腔通常为平凹腔,中小功率激光器的凹面反射镜常采用 K9 光学玻璃或硅片加工而成,镜面上镀有高反射率的金属膜-金膜,在波长 10.6 μm 处的反射率达 99%;较大功率输出时则用铜基底镀金反射镜替代 K9 玻璃镜。输出镜通常采用合适反射率的镀膜锗(Ge)、硒化锌(ZnSe)和砷化镓(GaSe)等。封离式 CO₂ 激光器的放电电流较小,采用冷电极,用钼片或镍片做成圆筒状。封离式 CO₂ 激光器的优点是结构简单、维修方便、可靠性强、造价和运行费用低,其寿命可达到数千至上万小时。封离式 CO₂ 激光器的输出光束质量好,束散角接近衍射极限。激光器的输出功率与放电管的长度成正比,通常为 50~70W/m。要获得高的输出功率,需要增加放电管的长度。单管封离式 CO₂ 激光器的输出功率通常在 500W 以下。图 1.1 表示封离式 CO₂ 激光管实物照片及其结构示意图。

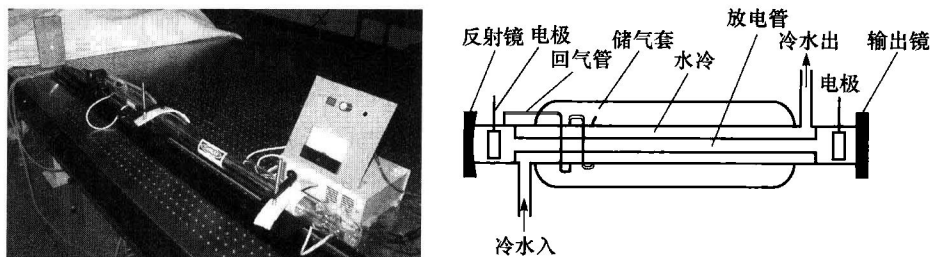


图 1.1 实验中的封离式 CO₂ 激光管实物照片及其基本结构示意图

利用与图 1.1 所示类似的封离式 CO₂ 激光管,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)激光与物质相互作用国家重点实验室研制了一台多功能的 CO₂ 激光器,如图 1.2 所示,主要技术指标如表 1.4 所示。该激光器采用连续激光增益区结合声光调 Q 技术解决了 CO₂ 激光输出百纳秒量级短脉冲、通过光栅色散原理实现波长调谐输出、晶体管-晶体管逻辑电平信号(TTL 信号)控制实现脉冲激光编码输出,并集多种动态实时显示于一体,综合实现了激光器的多功能输出:连续输出、普通脉冲输出、调 Q 脉冲输出和单脉冲输出,输出的激光谱线可以调谐,可见(632.8nm/532nm)指示激光,激光输出波长、激光输出功率、激光脉冲重复频率等实时显示,具有 TTL 编码信号控制激光输出功能以及可以满足用户指定的特殊设计接口等。



图 1.2 多功能 CO₂ 激光器

表 1.4 封离式多功能 CO₂ 激光的主要技术参数

激光器参数	技术指标
激光波长	9.2~10.8 μ m(单谱线可调谐)
输出功率	
连续功率	5W(无声光 Q 开关时为 25W)
脉冲功率	>50W(10.6 μ m/100Hz/100 μ s)
调 Q 功率	>2000W(10.6 μ m/1kHz/200ns)
脉冲宽度	
放电脉冲	≤ 3 ms
调 Q 脉冲	≤ 300 ns
重复频率	
放电脉冲	1~1000Hz
调 Q 脉冲	1~10kHz
激光功率稳定性	$\leq \pm 3\%$
光斑直径(激光出口处)	5mm
光束发散角(全角)	≤ 1.8 mrad
光束指向稳定性(8h): mrad	≤ 0.5
激光模式	TEM ₀₀
激光偏振状态	水平偏振
外控方式	TTL

封离式 CO₂ 激光管可以通过增加长度的方式提高输出激光功率,通常几十米的长度可获得千瓦级的功率输出。不过,这种落后的技术现在已经没人使用了。为了缩短长度所占用的空间,也可以将这些管子折叠,叫做折叠式 CO₂ 激光器。有些射频激励的 CO₂ 激光器因为采用了电极横向放电的方式,放电部分形成的增益介质是一个矩形,此时使用相应尺寸的反射镜和输出光学镜片系统灵活地构成各种输出方式,如小孔输出或者边缘耦合等。

1.2.3 快轴流 CO₂ 激光器

快轴流激光器提高输出功率的原理在于增益介质的快速流动,快流动使得进