

电子管技术丛书之二

二氧化碳激光器

《电子管技术》丛书之二

二氧化碳激光器

潘承志 编译

(内部读物)

《电子管技术》编辑组

毛主席语录

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

内 容 简 介

本书内容共分三部分。第一部分由 P. K. Cheo 所著《二氧化碳激光器》(系《LASERS, VOL. 3》一书的第二章)翻译而成。这一部分从二氧化碳分子结构和激光跃迁等理论基础出发,较全面系统地论述了二氧化碳激光器的工作原理及其输出特性,最后简要介绍了七十年代以前的一些新型二氧化碳激光系统。第二部分选译了七篇期刊文献,着重介绍七十年代以来二氧化碳激光器的一些新进展。第三部分搜集整理了1964~1973年的1230条二氧化碳激光文献索引,以利读者查阅。

本书可供从事二氧化碳激光器研制和应用工作的广大工人、科技人员和大专院校师生参考。

译 者 序

二氧化碳激光器是分子气体激光器中最典型的代表。自1964年第一台二氧化碳激光器问世以来，迄今已有十年的发展历史。由于它能产生连续大功率和脉冲大能量、转换效率高、发射波长正处于大气窗口、制作简便、又可以多种方式激励等独特优点，使它在军事、工业生产和科学技术各个领域占据非常重要的地位。越来越广泛的应用，反过来又推动二氧化碳激光器的研制工作大步向前发展。

我国广大工人、科技人员在毛主席革命路线指引下，以及在无产阶级文化大革命的推动下发扬“自力更生，艰苦奋斗”的革命精神，在短期内为发展我国激光事业作出了显著的成绩。

遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们编译了《二氧化碳激光器》一书，试图较全面系统地介绍二氧化碳激光器的有关知识及其新进展，以期对从事这方面工作的同志有所帮助。

P. K. Gheo 所著《二氧化碳激光器》一书是关于二氧化碳激光器的一部专著，它从二氧化碳分子结构和激光能级跃迁等基础理论出发，较全面系统地论述了二氧化碳激光系统的工作机理，详细分析了普通二氧化碳激光器的输出特性，将实验结果作了理论概括。该书对于从事这方面工作的同志有一定的参考价值。

但是，七十年代以来，由于气动二氧化碳激光器、横向激励大气压二氧化碳激光器、电子束控制的二氧化碳激光器和转移化学激光器等新技术的突破，使大功率大能量二氧化碳激光器获得了迅速的发展。而在发展高压二氧化碳激光器的同时，还研制成功了波长可连续调谐和锁模的二氧化碳激光器。由于波导二氧化碳激光器的问世，使二氧化碳激光器实现了小型化。加之，光泵浦和大气压连续波二氧化碳激光器的出现，使二氧化碳激光器的面貌为之一新。P. K. Gheo 所著的《二氧化碳激光器》一书最后虽简要地描述了一些新型二氧化碳激光系统，但由于年代的关系，远不能反映这些重要的新进展。我们在第二部分选译了七篇期刊文献，旨在弥补这方面的不足，试图能收到“窥一斑以观全豹”的作用。

二氧化碳激光技术发展速度很快，内容极为丰富。为便于大家及时查阅所需资料，我们在第三部分搜集了1964~1973年二氧化碳激光器文献索引1230条，并按主题作了整理。

张伦同志校对了本书第一部分的译稿，韩家瑞同志校对了第二部分的译文。

二氧化碳激光器所涉及的技术很广，由于水平有限，故无论在选题或译文质量上均难令人满意，恳请读者批评指正。

目 录

第一部分 二氧化碳激光器	1
符号表	2
第一章 历史述评	7
第二章 引论	10
第三章 二氧化碳分子结构与激光频谱学	13
第一节 正常振动模式	13
第二节 能级	17
§ 3.2-1 转动能级	17
§ 3.2-2 振动能级	19
第三节 振动-转动光谱	24
第四节 CO ₂ 激光跃迁	26
第五节 振动跃迁几率及辐射寿命	33
第六节 CO ₂ 激光光谱学测量	35
§ 3.6-1 吸收光谱	35
§ 3.6-2 透射光谱	36
§ 3.6-3 转动常数	40
第四章 粒子数反转机理	43
第一节 激励过程	43
§ 4.1-1 电子碰撞	44
§ 4.1-2 谐振转换	48
第二节 弛豫过程	51
§ 4.2-1 CO ₂ 激光器中的气体动力学	52
§ 4.2-2 01'0 能级的弛豫	55

§ 4.2-3 $00^{\circ}1$ 能级的弛豫	60
§ 4.2-4 $10^{\circ}0$ 及 $02^{\circ}0$ 能级的弛豫	66
§ 4.2-5 转动弛豫	70
第五章 普通激光系统	75
第一节 小信号增益	75
§ 5.1-1 增益对电流与温度的依赖关系	77
§ 5.1-2 增益对气压与管径的依赖关系	79
§ 5.1-3 气体流动对增益的影响	83
§ 5.1-4 增益分布	86
§ 5.1-5 分析——热力学方法	87
第二节 增益饱和	93
§ 5.2-1 二能级模型	94
§ 5.2-2 多能级系统	96
§ 5.2-3 激励和扩散的作用	98
第三节 其它特性——反常现象和非线性现象	102
§ 5.3-1 线宽和线形	102
§ 5.3-2 转动能级和模式竞争	109
§ 5.3-3 频率波动	114
§ 5.3-4 非线性现象	116
第四节 连续波功率输出	121
§ 5.4-1 流动激光系统	121
§ 5.4-2 大型激光系统	125
§ 5.4-3 密封激光器	127
§ 5.4-4 频率和强度的稳定	132
第五节 Q开关	135
§ 5.5-1 脉冲放电	138
§ 5.5-2 机械Q开关	139
§ 5.5-3 反应Q开关和被动Q开关	142

§ 5.5-4 声光Q开关和电光Q开关·····	147
§ 5.5-5 大功率脉冲雷达系统·····	154
第六章 新型激光系统 ·····	158
第一节 亚音速高速气流 ·····	159
§ 6.1-1 横向流动·····	159
§ 6.1-2 纵向流动·····	169
第二节 热泵浦及超音速流动 ·····	170
§ 6.2-1 一些早期的实验·····	171
§ 6.2-2 超音速流动·····	173
第三节 化学激光器 ·····	178
参考文献 ·····	179
第二部分 CO₂ 激光器的一些新进展 ·····	191
一、密封波导 CO₂ 激光器的特性 ·····	192
1-1. 引言·····	192
1-2. 等离子体缩尺关系·····	193
1-3. 实验结果·····	196
1-4. 结论·····	209
二、两年来的气动激光器 ·····	212
2-1. 水含量由1%增加到6%·····	212
2-2. 尖喷嘴与磨圆的喷嘴·····	215
2-3. 一氧化碳激光器·····	217
三、300焦耳几千兆瓦的二氧化碳激光器 ·····	220
3-1. 引言·····	220
3-2. 放电组件及激励电路·····	223
3-3. 放电瞬时特性·····	225
3-4. 小信号增益测量·····	230
3-5. 大功率大能量激光振荡器的特性·····	233

3-6. 激光媒质内的光击穿	236
3-7. 结语	238
四、电子束控制的二氧化碳激光放大器	243
4-1. 引言	243
4-2. 实验设计	244
4-3. 实验结果	248
五、光泵浦的大气压二氧化碳激光器	259
六、大气压连续波二氧化碳激光器	265
6-1. 引言	265
6-2. 放电均匀性	266
6-3. 大气压激光器	271
6-4. 结论	275
七、转移化学激光器——新近研究评论	278
7-1. 引言	278
7-2. 振动能量转移和消激活	280
7-3. 连续波亚声速 DF-CO ₂ 化学激光器	289
7-4. 连续波超声速 DF-CO ₂ 转移化学激光器	297
7-5. 脉冲 DF-CO ₂ 化学激光器	304
7-6. 结论	305
第三部分 CO₂激光文献索引(1964~1973)	313
主题索引	412

第一部分

二氧化碳激光器

[美] P. K. Cheo 原著

符 号 表

A	自发发射的爱因斯坦 A 系数
A_{mn}	在能态 m 和 n 之间的跃迁几率
a_0	玻尔半径
a_{ij}	核间力常数
a	吸收系数
a_1, a_2	反射镜半径
B, B_V	转动常数
b	最捷径距离
C_{ij}	动能平方项的系数
c	光速
D, D_V	转动常数(细结构)
D_{ij}	位能平方项的系数
$D_{\infty h}$	点群
d	调制深度
\mathcal{D}	扩散系数
E_i, E_V, E_ν	第 i 能级或 ν 模式的振动能量
E_r	转动能量
\mathcal{E}	电场
$F(J)$	转动能级的项值
f_i	第 i 条发射谱线的 f 数
f_P, f_R	分别为 P 分支和 R 分支中的拍频率
$G(\nu)$	振动能级的项值
$G(t, z)$	阶跃响应
g_l, g_u	分别为下、上能级的统计权重
$g(\nu), g(\omega)$	线形函数
g_{ll}	l 型加倍常数

$g(J)$	第 J 次转动能级的统计权重
H	方激光腔的宽度
H_V	哈密顿多项式
$h = h/2\pi$	普朗克常数乘 $1/2\pi$
I, I_e	惯量
I	激光强度
I_0, U_t	初始激光强度和透过的激光强度
I_S	增益饱和参量
J	转动量子数
K'_{ij}	上激光能级中的第 i 和第 J 转动能级之间的交叉弛豫速率常数
K''_{ij}	下激光能级中的第 i 和第 J 转动能级之间的交叉弛豫速率常数
K_1, K_δ	价力常数
k	波尔茨曼常数
k_e, k'_e	谐振交换速率常数
k_{vt}	振动弛豫速率常数
k_{A-B}	在粒子 A 和 B 之间的碰撞弛豫速率常数
k_{rot}, k_{A-B}^{rot}	转动弛豫速率常数
k_{ij}	在能级 i 和 j 之间的振动弛豫速率常数
L	激光器腔长; 又, 接线长度
l	在 C 和 O 之间核平衡距离
l_t	角动量量子数
M	相碰配对者 M ; 又, 碰量子数
M_O, M_C	氧原子和碳原子的质量
m	折合质量
$m = -J$	P 分支转动量子数
$m = J + 1$	R 分支转动量子数
N_e	平均电子密度

N_0	每单位体积中基态粒子数
N_0	归一化常数
n	折射率
n_e	电子密度
n_i	第 i 能级的粒子数密度
n_V	第 V 能级的振动粒子数密度
n_J	第 J 转动能级的粒子数密度
n_J^u, n_J^l	上、下转动能级的粒子数密度
n_T	第 T 转动能级的粒子数密度
P	气压
P_l	激光束的功率输出
$P(J)$	P 分支振-转跃迁
p	偶极矩
ρ	激励或去激励过程的几率
Q	谐振腔的品质因数; 又, 四极矩
R	反射镜的曲率半径
$R(J)$	R 分支振-转跃迁
R_x	x 粒子的流动速率
R_y	里德伯常数
r_0	强度的 $1/e$ 处之激光束半径
r_{ij}	在能态 i 和 j 之间激励或去激励速率
$r(t)$	经典轨道
S_i	对称坐标
S_{mn}, S	在能态 m 和 n 之间的谱线强度
STP	标准温度和压力; 即 273°K 及 1 个大气压
T, T_i	气体的平动温度
T_1	碰撞弛豫时间或损耗弛豫时间
T_2	均匀弛豫 (原子或分子移相) 时间
T_0	给定振荡模式的振动温度

t, t_m	反射镜的透过系数
t	光谱透射比
U	流体速度
U_0	脉冲响应
V'	相互作用位能
\bar{v}	平均热速度
v_l	振动量子数
W, W_m	方激光腔的宽度
W	感应发射速率
X	笛卡尔坐标
x	混合气中一种组分的克分子数
x_{ij}	非简谐力常数
Y	笛卡尔坐标
Z	平均碰撞数; 又, 笛卡尔坐标 (沿气流方向的坐标)
α_0	小信号增益系数
α_m	分子的极化率
β	壁反射系数
Γ_j	从基态到第 j 能级的粒子数系涌速率
γ_{ij}	在能态 i 和 j 之间激励和去激励速率
Δ_J	碰撞展宽的线宽
Δ, Δ'	硬和软碰撞线宽
δ_+, δ_-	分别为两个能级之间能量之和及差
ϵ	介电常数; 又, 平均电子能量
θ_{JM}	雅可比多项式
λ	波长
λ_l	特征行列式的根
μ	微米; 又, CO_2 分子的折合质量
μ_{mn}	能态 m 和 n 之间偶矩阵元
ν	光频

ν_0	光谱线的中心频率
ν_i	三个基本振动模式的频率
ν_c	碰撞频率
$\Delta\nu$	在最大强度的 1/2 处谱线的宽度
ξ_i	归一化坐标
ρ_i	第 i 模式的辐射通量密度
\sum_g, \sum_u, π_u	与 ν_1, ν_2 和 ν_3 模式相关的标符
$\Sigma, \pi, \Delta, \dots$	标志振动能级的光谱学命名
σ	横截面
τ_0	初始脉冲宽度
τ_R	光在腔内的环程渡越时间
τ_u, τ	上、下振动激光能级的碰撞寿命
τ_r	振动能级的辐射寿命
τ_v	有效振动寿命
τ_c	相继碰撞之间的时间间隔
τ_W	激光脉冲的宽度
τ_d	激光脉冲的衰减时间
ϕ	绕空间固定轴的幅角
Ψ_e	电子态的波函数
Ψ_v	振动态的波函数
Ψ_r	转动态的波函数
Ω	感应偶极的扭转频率
ω	角频率
ω_1, ω_2	分别为在平面和曲面反射镜上的模式光斑尺寸

第一章 历史述评

早在 1964 年, Patel 等人 (1) 首先报导了用 CO_2 气体观察到大约为 10.6 微米的连续波激光作用。由于当时对离子及分子的新激光跃迁的研究正处于高潮, 所以这种特殊的激光器与当时已报导过的数百种其它激光跃迁相比, 并未引起更多的注意。几个月之后, Patel (2) 又发表了 CO_2 激光器的连续波 (~ 1 毫瓦) 及脉冲输出功率频谱的详细研究, 并对以前报导的结果提出解释 (3)。一组法国科学家 (4~6) 独立地进行了类似的研究, 他们的兴趣主要是在分子光谱学的研究方面。

两年之内便取得了两项重大进展。第一项是利用 N_2 和 CO_2 的混合气作为激活媒质, 这几乎同时由 Legay 和 Legay-Sommaire (7) 以及 Patel (8) 提出。Patel (a) 后来证实, 振动能量从 N_2 的亚稳态 ($v=1$) 向 CO_2 上激光能级 ($00^{\circ}1$) 的谐振转换, 使 CO_2 激光器的输出从毫瓦级增至 10 瓦左右。Moller 和 Rigden (10) 完成了另一项进展。他们指出, 氦气和氮气一样也能增加激光输出, 尽管当时对作用的机理并不十分清楚。其间, Patel 等人 (11) 利用流动的 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ 混合气由 CO_2 激光器获得了大于 100 瓦的非常惊人的连续波输出功率。从当时还没有光学质量良好的红外元件提供的观点来看, 这是一项卓越的成就。很明显, 与当时所有的其它激光器相比, 这种激光器的效率和平均输出功率是绝无