

文章编号:1671-8879(2002)06-0095-04

微波激励 CO<sub>2</sub> 激光器放电机制

李贵安,宋建平,张相臣,李 貅

(西安交通大学 电子与信息工程学院,陕西 西安 710049)

**摘 要:**CO<sub>2</sub> 激光器是气体激光器中最重要、用途最广泛的激光器,其激励系统的主要放电方式可分为直流、射频和微波放电。介绍了一种利用微波放电获得激光输出的新型激光器,对这种采用最新放电方式激励的激光器均匀放电的机制进行了详细的理论分析,并把由理论推导得出的结果和实验结果作比较,二者吻合一致。

**关键词:**CO<sub>2</sub> 激光器;微波激励;矩形波导;场分布

**中图分类号:**TN248.22      **文献标识码:**A

Discharge mechanism of CO<sub>2</sub> laser excited by microwave

LI Gui-an, SONG Jian-ping, ZHANG Xiang-chen, LI Xiu

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** CO<sub>2</sub> laser is the most important and most widely used in gas lasers, its main discharge types are divided into DC, RF and MW discharge in excitation system. A new type CO<sub>2</sub> laser which obtain the laser output using MW discharge is introduced, the mechanism of uniform discharge using the newest discharge mode is analyzed. And the results derived from theory and experimental one are compared as well, the theoretical result is identical with the experimental one completely.

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser; microwave-excitation; rectangle waveguide; field distribution

CO<sub>2</sub> 激光器是世界上应用最为广泛的气体激光器<sup>[1]</sup>。其常见的放电激励方式主要有三种:直流(DC)放电、射频(RF)放电和最近刚刚兴起的微波(MW)放电。其中,最早使用的 DC 放电有逐步被 RF 放电所代替的趋势<sup>[2]</sup>。这主要是因为 RF 放电与 DC 放电相比具有如下优点:即不断提高了放电稳定性,简便的放电控制和由于缺少了金属电极而减少了气体分解。然而,采用这种放电方式激励的激光器,其最大的不足是需要十分昂贵的射频功率发生器,且运行花费高。这大大影响了它的广泛使用,为此,人们不得不尝试其它新的激励方式。目前,这种研究在实验室已初步获得成功,即采用 MW 放电方式激励激光器。它既能减小昂贵的花费又能克服 DC 放电存在的不足。这正是近年来国外竞相研究开发 MW 激励 CO<sub>2</sub> 激光器的主要原因<sup>[3~5]</sup>。与其它

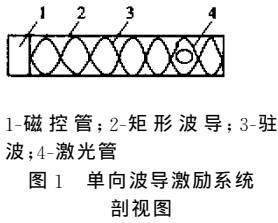
激光器相比,采用 MW 激励还具有如下明显的优点:放电管无电极,镜片和气体无污染;高功率可以注入到小的放电区域,放电均匀,激光器效率高,光束质量好;微波波导表面为基电位,避免了由于使用高电压而具有潜在的危险;微波源很低廉(采用普通微波炉的磁控管作微波源)。利用微波激励的这种特性制作成的激光器清洁、紧凑、高效、安全。因此,研制开发这种激光器具有十分诱人的前景。

目前,国内对这种新型激光器的研究开发未见报道,文献中对其激励系统的微波放电机制没有完善的理论解释。本文着重对这种新型微波激励 CO<sub>2</sub> 激光器获得均匀放电的激励电场进行相关的数学推导和理论分析,并将理论得出的结果与文献报道的实验结果作比较,二者吻合一致。从而由理论方面阐明了激光器采用微波激励实现均匀放电的可行性。

1 实验设置原理

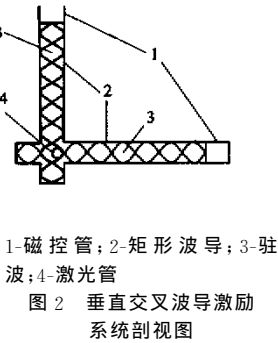
1.1 单向波导谐振腔激励系统

如图 1 所示,让微波在矩形波导腔内形成振荡,由于微波场在驻波波腹处处于极大值,若将激光管放在驻波波腹处,就可得到损耗小、效率高、放电面积大的微波激励场,这种结构称之为单向微波波导激励系统。



1.2 垂直交叉波导谐振腔激励系统

如图 2 所示,为了提高激励区域的放电均匀性,将两个尺寸相同的微波波导腔垂直交叉放置,让微波在两波导腔内形成振荡,调节调谐器,使两腔正交区域处于驻波极大值,若把激光管放在两波导腔的交叉处,则在两腔正交区域可得到强度高、均匀性好的微波激励电场,这种结构称之为垂直交叉微波波导激励系统。



2 矩形波导谐振腔中振动模的场分布及理论分析

2.1 单向波导谐振腔振动模的场分布理论及分析

由电动力学结论可得,对于宽度为  $a$ ,高度为  $b$  的无限长矩形波导,在波导内传播电磁场  $TE_{nm}$  模的瞬时表达式为(坐标原点在波导的一个顶点)

$$\left. \begin{aligned} E_x &= jE_{x0} \cos(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b) \cos(\omega t - \beta z) \\ E_y &= -jE_{y0} \sin(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \cos(\omega t - \beta z) \\ E_z &= 0 \\ H_x &= jH_{x0} \sin(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \cos(\omega t - \beta z) \\ H_y &= jH_{y0} \cos(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b) \cos(\omega t - \beta z) \\ H_z &= H_{z0} \cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \cos(\omega t - \beta z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $E_{x0}$ 、 $E_{y0}$ 、 $H_{x0}$ 、 $H_{y0}$ 、 $H_{z0}$  分别为各场分量的振幅;  $m$ 、 $n$  分别代表场量在波导宽边  $a$ 、窄边  $b$  上的驻波半周期数;  $\beta$  为相移常数。

对于矩形谐振腔,则只需在上述矩形波导内电磁场分布的结果中使用  $z=0, l$  两端的边界条件  $H_z=0$  即可。于是,电磁波必定在  $z$  方向来回反射而形成驻波,即

万方数据  
$$H_z = H^+ + H^- = H_0^+ \cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) e^{-j\beta z} +$$

$$H_0^- \cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) e^{j\beta z}$$

利用  $z=0, l$  处的边界条件得

$$H_z = -j2H_0 \cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \sin(p\pi z/l) \quad (2)$$

将式(2)代入矩形波导结论的表达式<sup>[6]</sup>(即用电场或磁场的纵向分量表示横向分量的表达式)易得

$$\left. \begin{aligned} E_x &= (2\omega\mu_0/K_c^2)(n\pi/b)H_0 \cos(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b) \sin(p\pi z/l) \\ E_y &= -(2\omega\mu_0/K_c^2)(m\pi/a)H_0 \sin(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \sin(p\pi z/l) \\ E_z &= 0 \\ H_x &= j(2/K_c^2)(m\pi/a)(p\pi/l)H_0 \sin(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \cos(p\pi z/l) \\ H_y &= j(2/K_c^2)(n\pi/b)(p\pi/l)H_0 \cos(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b) \cos(p\pi z/l) \\ H_z &= -j2H_0 \cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \sin(p\pi z/l) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $K_c^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$ 。

习惯中,矩形波导腔三边即宽  $a$ 、高  $b$ 、长  $l$  分别按直角坐标系  $x, y, z$  坐标方向放置,坐标原点取在波导腔的一个顶点,且取  $l > a > b$ ,则矩形腔  $TE_{10p}$  模( $p$  为大于 1 的整数)的场方程为

$$\left. \begin{aligned} E_y &= -(2\omega\mu_0 a/\pi)H_0 \sin(\pi x/a) \sin(p\pi z/l) \\ H_x &= j2(a/l)H_0 \sin(\pi x/a) \cos(p\pi z/l) \\ H_z &= -j2H_0 \cos(\pi x/a) \sin(p\pi z/l) \\ E_x = E_z = H_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由于在微波放电激励中,决定气体放电强弱分布的是微波场的电场强度  $E$ ,因此,从式(4)可知,在  $x=a/2$ ,且  $z=l/(2p)$  各处均形成最大驻波场,这些地方为驻波的波腹。为方便讨论起见,将原坐标原点由矩形波导的顶点平移至驻波波腹的中心,则激励电场  $E$  的大小分布应由形如  $A \cos x \cdot \cos z$  的式子决定。要讨论激光管某一横截面上的屯场强度,  $x$  (该轴与激光管光轴重合)应取该放电区内一确定值,不妨取  $x$  为 0 的截面,且取  $-\pi/2 < y, z < \pi/2$ ,其对应的电场强度分布如图 3( $x$  不为 0 的截面场强分布规律与其相同,只是强度比其小而已)。由图 3 可知,  $E$  的大小分布是中间区域最强,两边强度逐渐减弱,且与  $y$  无关,只与  $z$  有关。若将激光管放在驻波波腹处,激光气体就能得到较高的电场(强度接近

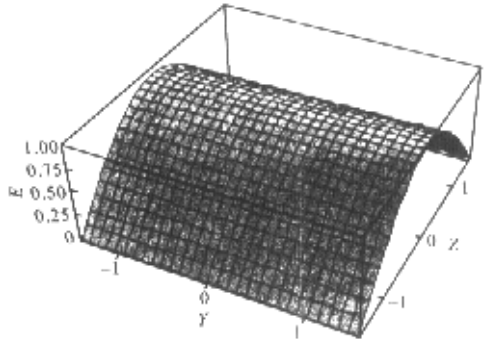


图 3 单向波导激励系统在激光管  $x=0$  的横截面上的场强  $E$  分布

或等于 1) 激励。在激光管内离光轴较远的边缘地方,由于离驻波极大处较远而场强很小(强度远小于 1),不易引起有效放电。由于该波导产生的电场是单向电场,放电激发只能局限在驻波极大这一有限的区域内,激光气体有效放电面积不会很大,激光效率应较低。文献[4]报道,此种结构装置的激光管横截面上放电的亮度分布如图 4。其亮度分布呈现为一个较狭长的中央亮带区域,约占激光管横截面积的 40%,这说明只有少部分激光气体对激光增益起作用。采用这种激励装置的激光器的效率不高( $\eta=14.3\%$ ),这与理论分析的结果一致。在这里,理论与实验得到的亮度分布图的略微差别是因为把波导内的电场理想化为严格的驻波场而造成的。

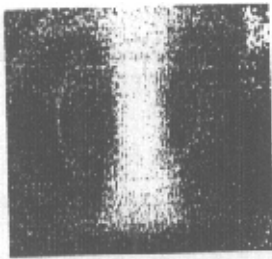


图 4 单向波导激励系统放电时  
激光管横截面上的亮度分布

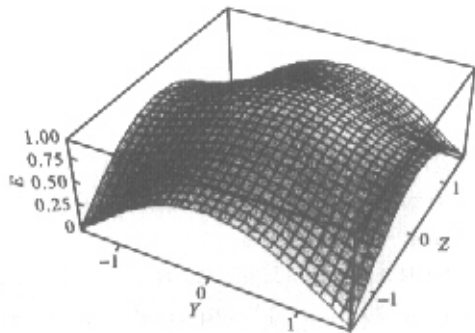
2.2 垂直交叉波导谐振腔振动模的场分布及分析

对于垂直交叉谐振腔,将每个矩形波导腔中的场分布作近似处理,假设与单个矩形波导腔中场分布相同。设  $E_1$  和  $E_2$  分别为两个正交波导腔中的电场,两腔内微波频率近似相等。直角坐标系按如下选取:坐标原点取在两垂直交叉波导腔重叠区域的中心处,激光管轴线过坐标原点且平行于波导宽边;取水平放置波导腔的三边  $a, b, l$  分别沿坐标轴的  $x, y, z$  方向,则另一垂直交叉放置波导腔的三边  $a, b, l$  就自然地分别沿坐标轴的  $x, z, y$  方向。于是,在波导腔体重叠区域的电场  $E$  分别由两个相互垂直方向( $y, z$  轴取向)的电场矢量  $E_1$  和  $E_2$  合成而成,其形式可表示为

$$E = E_1 + E_2 = - (2\omega\mu_0 a / \pi) H_0 \cos(\pi x / a) \cdot [\cos(p\pi z / l) e_y + \cos(p\pi y / l) e_z]$$

式中: $e_y, e_z$  分别为  $y, z$  轴的单位矢量。

由此式易见,波导腔内在  $x=0, z=0, y=0$  处合场强矢量最大,它是两种驻波极大的叠加,其激励电场  $E$  的大小应由形如  $(A \cos x \cos z \cdot e_y + A \cos x \cdot \cos y \cdot e_z)$  的合矢量的模决定。同样,要讨论激光管某一横截面上的电场强度,  $x$  (该轴与激光管光轴重合) 应取一确定值,不妨取  $x$  为 0 的截面,且取  $-\pi/2 < y, z < \pi/2$ , 其对应的电场强度分布如图 5。  $E$  的大小分布是中心区域最强,周围逐渐减弱。通过比较可知,其强度最大值及最大值周围凸起部分的强度明显大于单向谐振腔时的最大值(这些区域的强



度值均大于 1)。因而激光气体将得到比单向谐振腔更高且更为广泛的激励电场,能使激励更充分。在激光管内远离光轴中心以外的各点,合场强  $E$  的幅值很小(强度远小于 1),不易引起有效放电,对激光不能起到增益作用。从激光管轴向观察中心区域的激励电场,其场强分布应近似为一个圆形区域。这与文献[4]所报道的同种结构装置的激光管横截面上放电亮度分布(中间区域最亮,周围逐渐变暗的圆形光斑,约占激光管横截面积的 70%,如图 6)完全一致。由于有效激发区域明显增大,激光管内绝大部分工作气体被有效激发,使激光工作气体增益增强,因而激光效率明显提高( $\eta=20.2\%$ )。

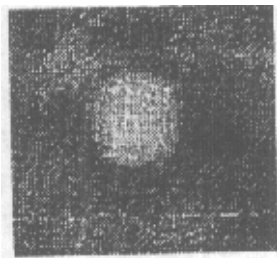


图 6 垂直交叉波导激励系统放电  
时激光管横截面上的亮度分布

### 3 结 语

本文介绍了利用激光波放电获得激光输出的一种新型激光器,通过理论和实验两方面说明了实现微波均匀放电的可行性。对这种激励方式产生均匀放电的机制进行了详细的数学推导和理论分析,把理论结论和实验结果作比较,二者吻合一致。并得出如下结论:

(1) 在激光器激励系统中,采用这种微波激励方式,可使两个微波场的最大振幅调整在激光管的中心,小的放电区域可以注入高的微波能量,且可以获得均匀放电,激光器效率高。若把多个交叉波导谐振腔沿激光管轴向串联安装在激光管上,可大大提高激光器的输出功率。

(2) 与单向波导激励系统相比,垂直交叉波导激励系统在激光管横截面上的放电分布均匀且面积广,激光气体有效工作体积大。这正是这种激光器效

率高、输出功率大,吸引了众多研究者竞相研究开发的主要原因。

参考文献:

[1] Sugiyama T, Kimura M, Yamane S. Pulsed CO<sub>2</sub> laser oscillator excited by microwaves [J]. SPIE, 1998, 3574:815—819.

[2] Wester R, Herziger G, Schulke H. High frequency excitation of CO<sub>2</sub> lasers[J]. SPIE, 1987, 801:14—22.

[3] Saito K, Kato M, Yajima H. Microwave-discharge-excited CO<sub>2</sub> lasers using orthogonal electric fields [J]. SPIE, 1997, 2987:2—12.

[4] Choo D, Takenaka Y, Yamane S. High power microwave excited CO<sub>2</sub> lasers oscillator[J]. SPIE, 1997, 3092: 210—238.

[5] Tokoro T, Matsuoka N, Yasuda M. CO<sub>2</sub> lasers excited by microwave discharge using stripline [J]. SPIE, 1997, 3092:235—238.

[6] Li Yixu. Electromagnetic field and microwave technology (the last volume) (a second edition) [M]. Guangzhou, Press house of South China University of Science and Engineering, 2001, 42.

[责任编辑 郭庆健]

(上接第 91 页)

不同材料的路面的摩擦系数不同,相应的减速度也不相同,报警和制动距离也不相同,系统必须能够根据实际情况,及时调整减速或制动时的减速度,从而得到一个接近当时实际情况的、安全的报警或制动距离。图 3 所示为在与图 2 类似情况下,不同路面的报警与制动距离,其中报警 1、报警 2 和报警 3 分别为路面结冰( $\varphi$  为 0.3),有水( $\varphi$  为 0.7)和正常( $\varphi$  为 1.0)时的报警距离,可见,随着路面状况的变化,报警距离和制动距离会有较大的变化,若不加区分,就会降低防碰撞的效率。

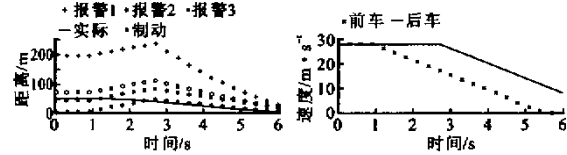


图 3 不同路面对安全距离的影响

4 结 语

车辆防碰撞系统涉及信号检测、信号处理、车辆控制等多个领域,其工作也受多个因素的约束,车辆碰撞的危险既与车间距离,己车速度和两车的相对

速度等有关,也受行车环境和驾驶员的驾驶风格的影响。因此,在进行危险分析和判断时,除考虑己车速度,相对速度等因素外,还必须考虑不同环境和不同驾驶员对安全距离模型的影响,只有这样,才能既提高分析判断的准确性,又可使该系统人机界面友好,方便不同的驾驶员使用,从而提高系统防碰撞的效率。

参考文献:

[1] Seller P, Song B, Hedrick J K. Development of a collision avoidance system[J]. Automotive engineering, 1998, (9):24—30.

[2] 陈光武. 高速公路实用安全车距计算模型[J]. 人类工效学, 2001, 1(7):41—49.

[3] Kenue S K. Selection of range and azimuth angle parameters for a forward looking collision warning radar sensor [A]. Intelligent Transportation Systems'97 [C]. Boston:IEEE, 1997. 494—499.

[4] Alvarez L. Emergency braking control in automated highway systems with underestimation of friction coefficient[A]. Proceedings of the American Control Conference[C]. Chicago, June, 2000. 574—579.

[责任编辑 郭庆健]

作者: [李贵安](#), [宋建平](#), [张相臣](#), [李貅](#)  
作者单位: [西安交通大学, 电子与信息工程学院, 陕西, 西安, 710049](#)  
刊名: [长安大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC** **PKU**  
英文刊名: [JOURNAL OF CHANG'AN UNIVERSITY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)  
年, 卷(期): 2002, 22(6)

## 参考文献(6条)

1. [Sugiyama T;Kimura M;Yamane S Pulsed CO<sub>2</sub> laser oscillator excited by microwaves](#)[外文期刊] 1998
2. [WESTER R;Herziger G;Schulke H High frequency excitation of CO<sub>2</sub> lasers](#) 1987
3. [Saito K;Kato M;Yajima H Microwave-discharge-excited CO<sub>2</sub> lasers using orthogonal electric fields](#)  
[外文期刊] 1997
4. [Choo D;Takenaka Y;Yamane S High power microwave excited CO<sub>2</sub> lasers oscillator](#)[外文期刊] 1997
5. [Tokoro T;Matsuoka N;Yasuda M CO<sub>2</sub> lasers excited by microwave discharge using stripline](#)[外文期刊]  
1997
6. [Li Yixu Electromagnetic field and microwave technology\(the last volume\) \(a second edition\)](#) 2001

## 本文读者也读过(10条)

1. [周引穗](#), [高爱华](#), [郑新亮](#), [李恩玲](#), [胡晓云](#), [陆治国](#), [Zhou Yinshui](#), [GAO Aihua](#), [Zheng Xinliang](#), [Li Enling](#), [Hu Xiaoyun](#), [Lu Zhiguo](#) 气体激光器射频至微波放电激发的某些规律[期刊论文]-[光子学报](#)2001, 30(5)
2. [王炜晔](#), [姚立](#), [葛茂发](#), [王殿勋](#) 卤素化合物的微波放电研究[会议论文]-2005
3. [程平](#), [王鸿梅](#), [李建权](#), [张为俊](#), [曹德兆](#), [储焰南](#) 微波放电研究大气中NO<sup>+</sup>和H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>(H<sub>2</sub>O)<sup>n</sup>离子的形成过程[期刊论文]-[量子电子学报](#)2003, 20(3)
4. [诸定昌](#), [皇甫炳炎](#) 微波炉所产生放电等离子体的若干性质[期刊论文]-[灯与照明](#)2000, 24(4)
5. [孙心媛](#), [周灵平](#), [李宇农](#), [易学华](#), [陈本敬](#), [SUN Xin-yuan](#), [ZHOU Ling-ping](#), [LI Yu-nong](#), [YI Xue-hua](#), [CHEN Ben-jing](#) 射频放电辅助热丝CVD金刚石生长速率的研究[期刊论文]-[人工晶体学报](#)2007, 36(2)
6. [混合型氧碘激光器的进展](#)[期刊论文]-[激光与光电子学进展](#)2002, 39(2)
7. [眭聿文](#), [Sui Yuwen](#) 微波激励CO<sub>2</sub>激光器调谐调配的研究[期刊论文]-[桂林电子工业学院学报](#)1999, 19(4)
8. [杨春林](#), [陈俊芳](#), [符斯列](#), [史磊](#), [张洪宾](#), [黄孟祥](#), [赖秀琼](#), [YANG Chun-lin](#), [CHEN Jun-fang](#), [FU Si-lie](#), [SHI Lei](#), [ZHANG Hong-bin](#), [HUANG Meng-xiang](#), [LAI Xiu-qiong](#) 微波放电氢等离子体的特性诊断和分析[期刊论文]-[华南师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)
9. [李文斌](#), [李光辉](#), [眭聿文](#), [谭从兵](#) 气体激光器波导耦合腔的研制与测试[期刊论文]-[湘潭矿业学院学报](#) 2003, 18(2)
10. [赖秀琼](#), [陈俊芳](#), [杨春林](#), [史磊](#) 微波等离子体制备类金刚石薄膜的研究[会议论文]-2007

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_xagljtdx200206025.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_xagljtdx200206025.aspx)