

# 新型微波激励 CO<sub>2</sub> 激光抽运系统的研究

朱 钧<sup>1</sup> 杨风雷<sup>2</sup> 陈钰清<sup>1</sup> 王静环<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学近代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027; <sup>2</sup> 中国计量学院信息工程系 杭州 310034)

**提要** 介绍了一种高效、高功率的新型微波激光抽运系统, 分别对其两种形式——一字型微波波导抽运系统和十字型微波波导抽运系统的抽运电场作理论分析, 并与相关文献报道的实验结果作一比较, 理论计算与实验结果吻合得非常一致。

**关键词** 微波抽运, 波导, 电场

近几年国外对微波激励 CO<sub>2</sub> 激光器的研究正深入发展, 它的优点是: 激光管无放电电极, 镜片无污染; 高功率可以注入到小的放电区域, 效率高; 微波波导表面为地电位; 微波源价廉。因而, 这种激光器清洁、紧凑、高效、安全。但是长久以来人们只用单向微波激励技术实现常规的纵向或横向放电激励。由于放电面积不大, 因而不能做到大面积均匀放电, CO<sub>2</sub> 激光器的效率只能达到 10% 左右。目前, 国外文献报道提出利用微波波导腔传导微波能量的新型激光抽运系统<sup>[1,2]</sup>。其基本原理是: 让微波在矩形微波波导腔内形成振荡, 由于微波场在驻波波腹处处于极大值处, 若将激光管放在驻波波腹处, 这样就可以得到损耗小、效率高、放电面积大的微波抽运电场, 称之为一字型微波波导抽运系统, 如图 1 所示。波导的尺寸为 75 mm × 35 mm × 690 mm, 磁控管作为微波源 (2.45 GHz), 由于波导的尺寸限制, 所以只有 TE<sub>01</sub> 模在波导腔中传播。为了提高抽运区域的放电均匀性, 将两个尺寸相同的微波波导腔正交放置, 让微波在两微波腔内形成振荡, 调节调谐器使两腔正交区域处于驻波极大值, 把激光管放在两微波腔的交叉处, 那么在两腔正交区域可得到强度高、均匀性好的微波抽运电场, 称之为十字型微波波导抽运系统, 如图 2 所示。与传统的微波激励相比这种激励方式具有下列优点: (1) 微波能量在微波谐振腔中传播, 微波的能量损耗小; (2) 可以使两个微波场的最大振幅调整在激光管的中心, 微波能量能更有效地激励工作气体; (3) 这种激励方式还有一个很大的优点, 可以在激光谐振腔轴向按一定的间隔并排加入多级相同的微波交叉电场激励源, 则可以大大提高激光器的输出功率。国外文献报道<sup>[1]</sup>, 一字型微波波导抽运系统抽运的 CO<sub>2</sub> 激光器, 最大效率为 14.3%, 输出功率为 137.5 W; 而用单级十字型微波波导抽运系统抽运的 CO<sub>2</sub> 激光器, 最大效率为 25.2% (输入功率为 1070 W), 最大输出功率为 273 W (输入功率为 1450 W), 若用 5 级十字型微波波导抽运系统, 最大效率为 22.7% (输入功率为 1394 W), 最大输出功率为 690 W (输入功率为 3590 W)。这是激光技术的一次飞跃。

但是, 目前文献中对这种激励方式激励场分布形式还没有完善的数学解释, 对于为什么十字型微波波导抽运系统的激励场更均匀还没有一个理论的解释。在此, 我们将对这种新型微波

激励的 CO<sub>2</sub> 抽运系统的激励场分布作理论分析, 并与文献中的实验结果作对比。

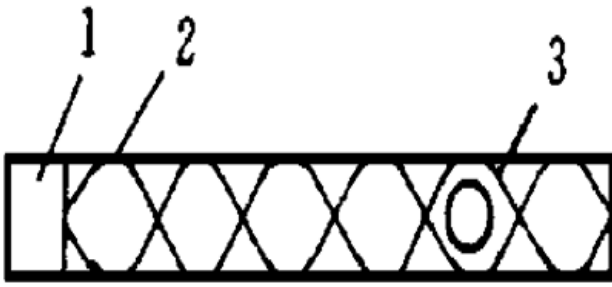


图 1 一字型微波波导抽运系统的横截面  
1: 磁控管; 2: 微波波导腔; 3: 激光管

Fig. 1 Cross-section of one-way channel microwave waveguide pumping system

1: magnetron; 2: waveguide; 3: laser tube

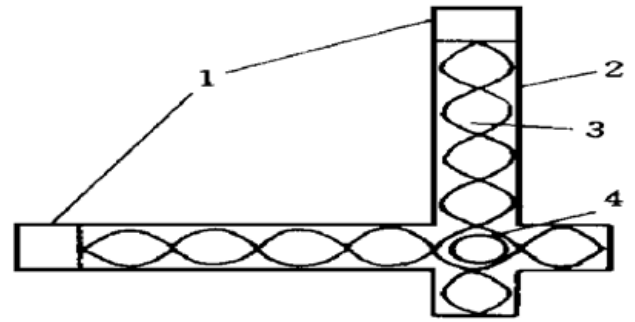


图 2 十字型微波波导抽运系统的横截面  
1: 磁控管; 2: 微波波导腔; 3: 驻波; 4: 激光管

Fig. 2 Cross-section of cross channel microwave waveguide pumping system

1: magnetron; 2: waveguide; 3: standing wave; 4: laser tube

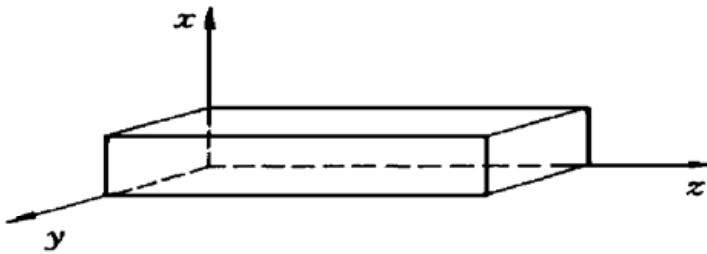


图 3 一字型微波波导抽运系统

Fig. 3 One-way channel microwave waveguide pumping system

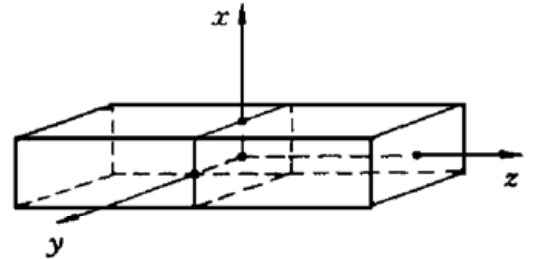


图 4 坐标转换后的新坐标系

Fig. 4 The new transformed coordinate

在微波激励中, 决定气体放电强弱分布的应是微波场的电场强度  $\vec{E}$ 。所以我们接下去讨论一字型和十字型微波波导抽运系统的电场强度  $\vec{E}$ 。

对一字型的微波激励抽运系统, 电磁场的分布形式相当于空心矩形腔的电磁场。由于所用的微波电场(频率为 2.45 GHz) 可以看成是时谐电磁场, 只须考虑其空间的分布情况。由电动力学可知, 如图 3 所示的坐标系下, TE<sub>01</sub> 模的电场可写成如下形式

$$\vec{E}(\vec{r}) = A \sin k_y y \cdot \sin k_z z \cdot \vec{e}_x \tag{1}$$

其中,  $k_y = k_z = \pi/75$ ,  $A$  为电矢量的振幅,  $\vec{e}_x$  表示沿  $x$  轴方向的单位矢量。为了便于讨论, 对图 3 坐标系作如图 4 所示的转换。若激光管轴向沿波导横截面的宽边放置, 并且激光管光轴与  $y$  轴重合, 调节驻波电场使  $z = 0$  时电场处于极大值, 此时 TE<sub>01</sub> 模的电场可以写成如下形式

$$\vec{E}(\vec{r}) = A \cos k_y y \cdot \cos k_z z \cdot \vec{e}_x \tag{2}$$

为了讨论激光管横截面上的电场强度情况,  $y$  应取一定值。 $y$  分别取 0 mm,  $\pm 25$  mm 时, 用(2)式计算得到的  $\vec{E} \sim x, z$  的关系如图 5(a), (b) 所示, 其中  $-17.5 \text{ mm} < x, z < 17.5 \text{ mm}$ 。由图 5 可见, 若  $y$  取上述值时,  $\vec{E}$  的大小分布是中间强, 两边弱; 与  $x$  轴无关, 只与  $z$  有关。计算表明当  $y$  为其他值时  $\vec{E}$  的分布规律与图 5 相同, 只是  $\vec{E}$  的幅值不同而已。越远离  $y$  轴中心  $\vec{E}$  的幅值越小。从纵向( $y$  轴方向) 观察累计的放电效果, 就应该是一条中间亮、两边暗的带状区域。这一现象与文献[1]报道的单微波波导腔的放电现象(如图 6 所示) 基本一致。不过图 6 表明, 激光管边缘的放电区域略比中间区域宽, 整个放电区域呈现为两头略大, 中间平直。理论计算结果与实验结果之间的略有差异是因为把波导内的电场近似理解为驻波电场造成的。可见用

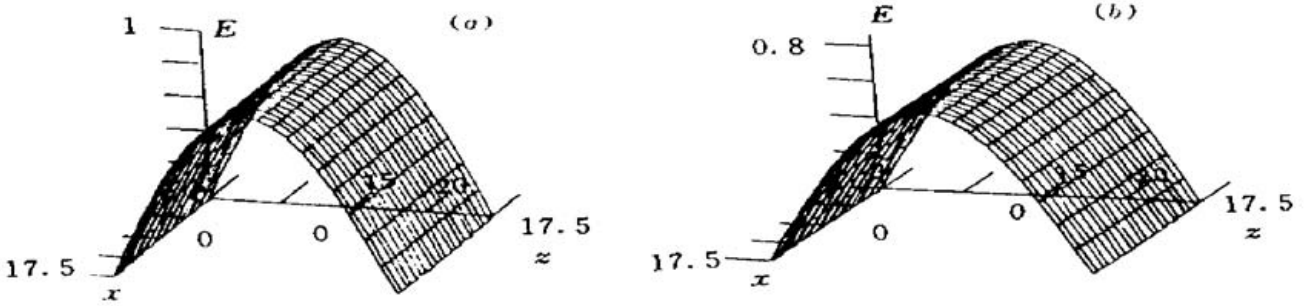


图 5 使用一字型微波波导管抽运系统, 在激光管  $y = 0, \pm 25 \text{ mm}$  的横截面上  $\vec{E}$  的强度分布图

Fig. 5 The intensity distribution of  $\vec{E}$  on the cross-section of laser tube in the

one-way channel microwave waveguide pumping system for (a)  $y = 0$  and (b)  $y = \pm 25 \text{ mm}$

驻波电场作近似处理, 讨论激光管中心区域的放电情况还是比较精确的, 而对激光增益起作用

则是中间区域。现在讨论十字型微波波导管抽运系统的电场强度  $\vec{E}$ 。将十字型微波波导管抽运系统的每个矩形波导管中的场分布作近似处理, 假设与单个矩形波导管中的场分布相同。设系统的坐标系如图 7 所示, 激光管沿微波波导管的宽边放置, 光轴与  $y$  轴重合, 调节驻波电场使得  $z = 0$  时电场处于极大值。若  $\vec{E}_1, \vec{E}_2$  分别为两个正交波导管体中的电场, 两腔体中的微波频率近似相等, 则

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = A \cos k_y y \cdot \cos k_z z \cdot \vec{e}_x \quad (3)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}) = A \cos k_y y \cdot \cos k_x x \cdot \vec{e}_z \quad (4)$$

其中,  $k_x = k_y = k_z = \pi/75$ 。则在两腔体的重叠区域电场  $\vec{E}$  的形式可以写成

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_1(\vec{r}) + \vec{E}_2(\vec{r}) = A \cos k_y y \cdot \cos k_z z \cdot \vec{e}_x + A \cos k_y y \cdot \cos k_x x \cdot \vec{e}_z \quad (5)$$

为了讨论激光管横截面上的电场强度情况, 由(5)式计算  $y$  取  $0 \text{ mm}, \pm 25 \text{ mm}$  时的  $\vec{E} \sim$

$x, z$  的关系, 如图 8(a), (b) 所示, 其中  $-17.5 \text{ mm} < x, z < 17.5 \text{ mm}$ 。若  $y$  取上述值时,  $\vec{E}$  的大小分布是中间强, 周围弱。计算表明当  $y$  为其他值时  $\vec{E}$  的分布规律与图 8 相同, 只是  $\vec{E}$  的幅值不同而已。越远离  $y$  轴中心  $\vec{E}$  的幅值越小。若从纵向( $y$  轴方向) 观察累计的放电效果, 就应该是一个中间亮, 周围暗, 近似为圆形光斑。这一现象与文献[1]报道的十字型微波波导管抽运系统的放电现象一致, 如图 9 所示。可见前面的近似处理对讨论十字型微波波导管抽运系统的电场分布是可行的。

一字型微波波导管抽运系统对于激光器而言有一定的不足之处。因为在垂直于激光管轴向的截面内放

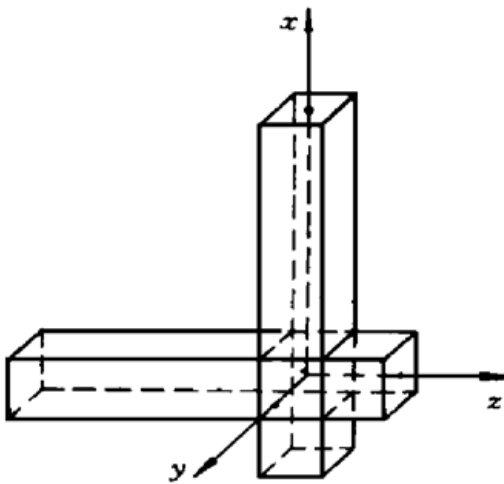


图 7 十字型微波波导管抽运系统

Fig. 7 Cross-channel microwave waveguide pumping system

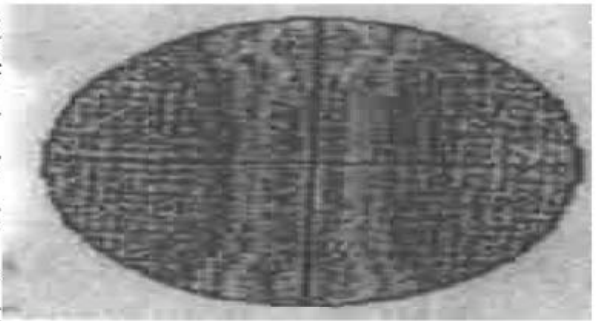


图 6 用一字型微波波导管抽运系统放电时的激光管横截面上的亮度分布

Fig. 6 Electric discharge brightness distribution on the laser tube cross-section using one-way channel microwave waveguide pumping system (from ref. [1])

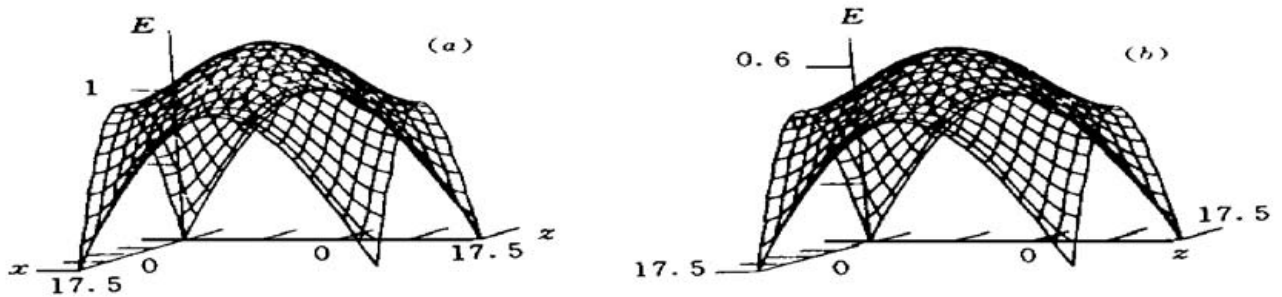


图 8 使用十字型微波波导管抽运系统,在激光管  $y = 0$  (a),  $\pm 25$  mm (b) 的横截面上  $\vec{E}$  的强度分布图

Fig. 8 The intensity distribution of  $\vec{E}$  on the cross-section of laser tube in the cross-channel microwave waveguide pumping system for (a)  $y = 0$  and (b)  $y = \pm 25$  mm

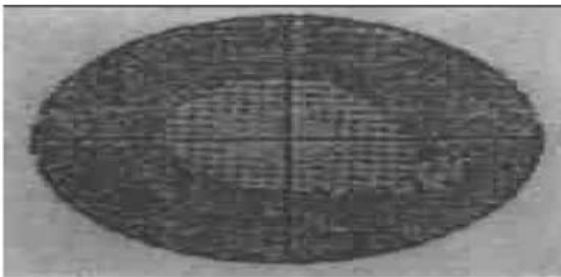


图 9 用十字型微波波导管抽运系统放电时的激光管横截面上的亮度分布

Fig. 9 Electric discharge brightness distribution on the laser tube cross-section using cross-channel microwave waveguide pumping system (from ref. [1])

电区是一条中间亮,两边暗的带状区域。 $\text{CO}_2$  激光管的直径为 21 mm,所以激光管的边缘处放电区不能有效地放电激发,对激光并不能起到增益作用,因此这部分放电其实是系统的损耗之一。只有在靠近激光管横截面中心处的气体放电才会对激光的增益起作用,所以它的有效工作模体积较小,相应地  $\text{CO}_2$  激光器的输出功率低。与一字型微波波导管抽运系统相比,十字型微波波导管抽运系统的放电并不是集中在中间的一条带状区域,而是在对激光管光轴而言轴对称分布的一个近似为圆的区域中。可以让它的整个放电区域对激光的增益起作用。所以十字型微波波导管抽运系统的有效工作模体积大, $\text{CO}_2$  激光器的输出功率高,它的工作

效率自然也比一字型微波波导管抽运系统大。要使这种多级的微波波导管抽运系统抽运的  $\text{CO}_2$  激光器正常运行,还必须配有高抽速真空泵。

### 参 考 文 献

- 1 Koichi Saito, Makoto Kato. Microwave-discharge-excited  $\text{CO}_2$  laser using orthogonal electric field. *SPIE*, 1997, **2987**: 2~ 12
- 2 D. Choo, Y. Takenaka. High power microwave excited  $\text{CO}_2$  laser oscillator. *SPIE*, 1997, **3092**: 210~ 214

## Theoretical Research of a New Microwave Excited $\text{CO}_2$ Laser Pumping System

Zhu Jun<sup>1</sup> Yang Fenglei<sup>2</sup> Chen Yuqing<sup>1</sup> Wang Jinghuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Lab. of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

<sup>2</sup>The Department of Information Engineering, China Institution of Metrology, Hangzhou 310034

**Abstract** A new microwave laser pumping system with high efficiency and power was discussed in this paper. The distributions of the pumping electrical field inside the one-way and cross channel microwave waveguide are calculated. The results are qualitatively coincident with the reported experiment results.

**Key words** microwave pumping, waveguide, electrical field