用扫描法研究 CO_2 激光横模

复旦大学光学系工农兵学员　计荣才　卢富山

提　　要

本文叙述一种鉴别 CO_2 激光束横模结构的简单方法及测量装置。我们用这种装置对放电长500毫米、管径7毫米的 CO_2 激光管作了实验研究。研究了放电电流、He的分压比、总气压对输出激光模式的影响，并作了初步分析。

一、引　　言

发射10.6微米红外光的 CO_2 激光器，具有功率大、效率高、输出波长处于大气窗口等特点，因此在国防建设、工业生产和科学研究等方面得到广泛的应用。

许多应用，例如雷达、测距、通讯、精密加工等等，要求激光束截面的强度分布是高斯型的单模，即 TEM_{00} 模。至少也希望有接近 TEM_{00} 模的激光束。这是因为 TEM_{00} 模有许多良好的特性，比如，它的发散角比其它高次横模小，能量密度高。这样用于雷达、测距、通讯，可以获得比较小的辐射面积；用于精密加工，可以会聚成线度极小、能量密度极高的光点。在这些应用中，高次模是不适宜的。因而，鉴别和研究激光束的横模对激光应用是必不可少的。我们根据科学实验为社会主义革命和社会主义建设服务的方针，研究了 CO_2 激光束的横模，以便制造出更好的 CO_2 激光器，为国防建设和工农业生产服务。

鉴别和研究激光束的横模，对可见光来说是比较容易的。因为可见光可以用眼观察，合适的感光材料和探测元件也比较多。但对于10.6微米波长的红外光来说就比较困难。10.6微米的红外光，既不可见，又缺少合适的感光材料和使用方便的探测元件。一般用泡沫塑料烧孔[1]，荧光涂料[2]、液晶[3]、热敏纸显示等方法观察；或者简单地用烧纸、烧耐火砖等方法观察。这些方法只能作较粗糙的定性分析，难于同理论进行定量地比较。虽然有人用红外扫描照相机[4]，但设备复杂而昂贵。

本文叙述用扫描法测定连续 CO_2 激光器输出的10.6微米波长激光束的横模结构，并对影响模式的某些因素，如电流、气体的混合比、充气气压作了分析。这种方法简单易行，对低次横模，特别是对 TEM_{00} 模可同理论计算作定量地比较。

二、实 验 装 置

我们工作中所用的实验装置如图1。图中激光器是封离型的，它的总长700毫米，放电长500毫米。为了利用横模之间的迭合与竞争效应获得单模[5]，选择管径为7毫米。镀金全反射镜曲率半径为2.5米，锗平面镜输出。实验时，放电管接在排气台上，以便改变气压。最佳条件下输出功率为20瓦，输出光斑直径4毫米左右。

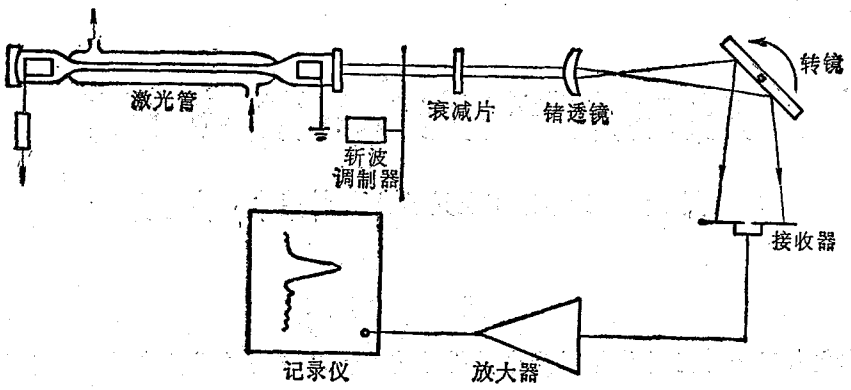

图1　测定和研究 CO_2 激光模式的实验装置示意图

激光束输出后通过检波器，调制成 1.2 千赫的光信号，经过衰减，再由锗透镜扩展。锗透镜焦距约 25 毫米，锗透镜离激光器输出窗约 1 米左右。

扩展后的光束射到反射镜上。反射镜用慢速马达驱动旋转，转速可以从 20 转/小时调节到 2 转/分。光束经过转镜反射到接收器。随着镜面的转动，在光束截面上某一直线上的各点先后进入接收器，这也就是对某一坐标轴扫描。

我们所用的接收器为 204 型热敏电阻红外探测器，探测面积约 1 平方毫米。在接收器的位置上，激光束直径扩展为几厘米。相比之下，探测面积已足够小，可以不加光阑或狭缝。适当选取衰减片的衰减量，使接收器工作在线性范围内。探测器装在一只垂直方向可以移动的支架上。实验中用转镜作 x 方向扫描，移动接收器则可测 y 方向各点的强度。

接收器接收的光信号变为电信号输入放大器。经过放大、检波，输入记录仪。我们实验中用 XWC 型自动记录仪。

三、实验结果与分析

实验用图 1 所示的装置对激光器输出横模作了研究。对我们所用的腔结构，光束截面上光强度分布是极坐标 ρ、θ 以及模数的函数。对 TEM_{pl} 模强度分布近似为[6]

$$I(\rho、\theta)=I_0 2^l\left(\frac{\rho}{w}\right)^{2l}\left[L_p^l\left(2\frac{\rho^2}{w^2}\right)\right]^2\exp\left[-2\frac{\rho^2}{w^2}\right]\cdot\cos^2 l\theta$$

其中，p、l 是模数，w 是 TEM_{00} 模斑半径，即光强下降到 $1/e^2$ 处的半宽度，$L_p^l\left(2\frac{\rho^2}{w^2}\right)$ 为缔合拉盖尔多项式。

对于 TEM_{00} 模则可以简化为高斯型函数：

$$I(\rho)=I_0\exp\left[-2\frac{\rho^2}{w^2}\right]$$

因为 $\rho^2=x^2+y^2$，所以也可以写为 x, y 的函数

$$I(x, y)=I_0\exp\left[-2\frac{x^2+y^2}{w^2}\right]$$

我们在实验中固定接收器位置，用转镜对 x 方向扫描。移动接收器，可以得到不同 y 值时 x 方向的分布曲线，这样可以获得二维分布 $I(x、y)$。分析横模是否基模实际上只要知道

$x=0$ 时 y 方向的分布，或者 $y=0$ 时 x 方向的分布就可以了，这样作图也比较简单、明了。所以下面我们只画出一维的分布图。

1. 单模输出和高斯曲线的比较

实验所用的激光管在比较好的条件下输出单模。我们把测量得到的实验曲线和标准高斯曲线作了比较，见图 2。测量时有关参量：$y=0$，总气压 35 乇，气压比 $CO_2:N_2:He$ 为 1:2:7，电流为 8 毫安。图中实线是高斯曲线，虚线是归一化的 x 方向扫描曲线。从图上可以看出，实验曲线与高斯曲线基本上吻合。这说明激光输出基本上是 TEM_{00} 模。实验曲线和高斯曲线有一点偏离，而且不是严格对称的，这说明激光输出不是纯粹的 TEM_{00} 模。我们认为这可能是光学元件不均匀和测量误差所引起的。

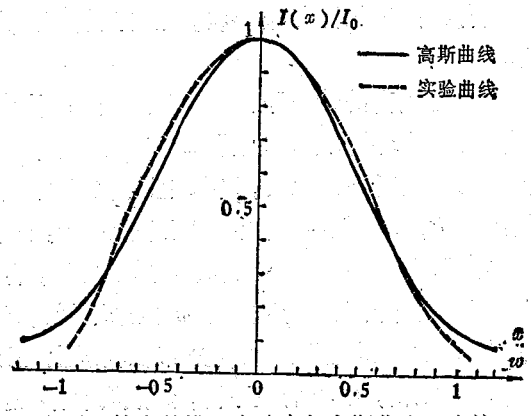

图 2　输出基模强度分布与高斯曲线的比较

从这一比较可以看到，用图 1 的装置作定量比较还是相当满意的。

2. 模式与放电电流的关系

不同的放电电流下，x 方向记录仪扫描的典型曲线如图 3、4 所示。

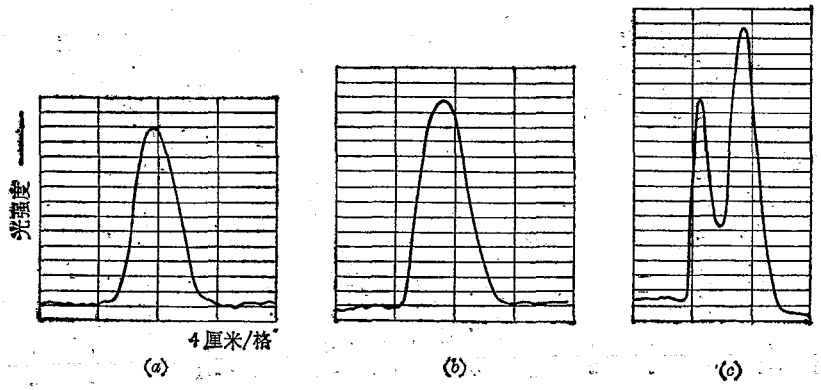

图 3　不同放电电流下 x 方向强度变化

$y=0$, (a) 电流 $I=8$ 毫安，(b) $I=10$ 毫安，(c) $I=13.5$ 毫安

测量时其他参量为：总气压 35 乇，混合比 $CO_2:N_2:He$ 为 1:2:7，再加入 0.3 乇 Xe，0.1 乇 H_2。

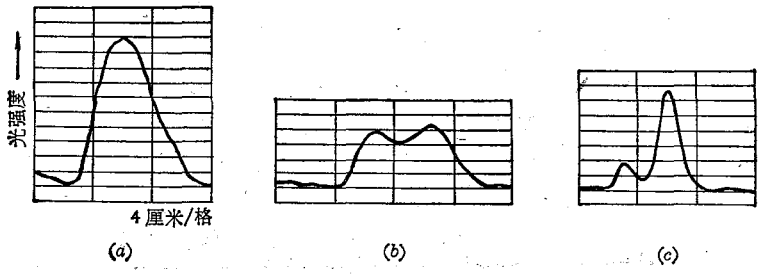

图 4　不同放电电流下 x 方向强度变化

$y=0$, (a) $I=10$ 毫安，(b) $I=13$ 毫安，(c) $I=14.5$ 毫安

其他参量为总气压 30 乇，混合比同图 3。

从图 3、4 的曲线可以看出，放电电流太高会出现高次模式，强度分布不再是高斯型的，而是几种模式迭加的复杂形状。这种强度分布一般是中心对称的，但是对 x 轴或 y 轴不一定对称。

电流较高的情况下出现高次模，这可从 CO_2 激光器工作机理来解释。CO_2 激光器中，激光下能态 10^00 的粒子是通过 01^10 态的热转移来消激发的，所以 10^00 态粒子数与气体温度关系很密切。随着温度上升，10^00 态的粒子数很快上升。而激光上能态 00^01 因为与基态相差能量比较大，粒子数与气体温度几乎无关[7]。这样温度上升，反转粒子数下降，增益也就下降。在封离型激光器中，靠管壁冷却来降低温度，管轴附近靠扩散来冷却。当放电电流升高时，气体温度升高。升高到一定程度，扩散来不及冷却气体时，管轴附近温度比管壁附近高得多。电流小时，增益沿放电管的径向分布在轴线上是比较高的。随着电流升高，增益分布变得平坦起来，电流太高，中心增益下降，形成马鞍形[8]。这显然不利于 TEM_{00} 模振荡，而有利于轴线上强度低的高次模振荡。

3. 模式与 He 分压比的关系

模式随 He 分压比的变化是比较明显的。我们用 y 方向的强度分布说明这种变化。典型的实验曲线如图 5 所示。因为分压比改变，输出功率相差很大，测量时，放大量、衰减量都不同。为了便于比较，作强度归一化曲线。

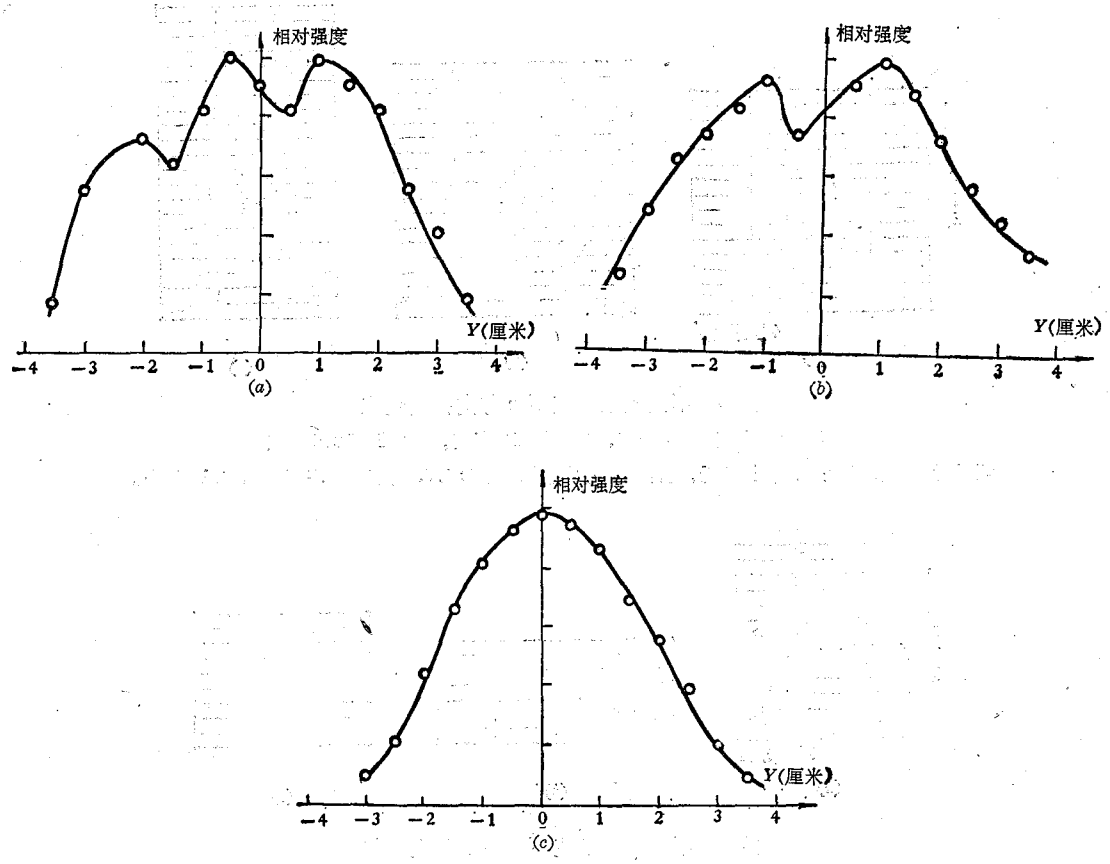

图 5 不同 He 分压比时 y 方向的强度分布

$x=0$, CO_2:N_2:He 为 (a) 1:2:3, (b) 1:2:5, (c) 1:2:7。

测量时总气压为 38 乇，放电电流 9 毫安。从这些曲线可以看到 He 的分压比低时，得不到基模振荡，分压比越低，模式越复杂。在 CO_2:N_2:He 为 1:2:7 时获得了基本上是基模的输出。

这种现象也可以用气体温度的变化来解释。一般认为 He 的主要作用是降低气体温度，He 的分压比低，冷却效果变差，轴线附近温度升高，又会出现马鞍形的增益分布，造成高次模振荡。反之，He 分压高，有利于基模振荡。

4. 模式与总气压的关系

图 6 为不同总气压下 y 方向的强度变化的典型曲线。测量时分压比 CO_2:N_2:He 为 1:2:7，放电电流均为 10 毫安。从图上可以看到，气压太低要出现高次模振荡。我们认为产生这种现象的原因可能是 He 的绝对量太少，总气压降到 17 乇时，He 的含量只有 12 乇左右。而图 5 中出现三峰的图(a)，He 的含量为 19 乇左右。这样冷却气体的效果显然是比较差的。看来模式不光与 He 的分压比有关，还和 He 的绝对量有关。不过从量方面看，我们的结果与资料[5]不一致。这一方面还需做进一步的研究。

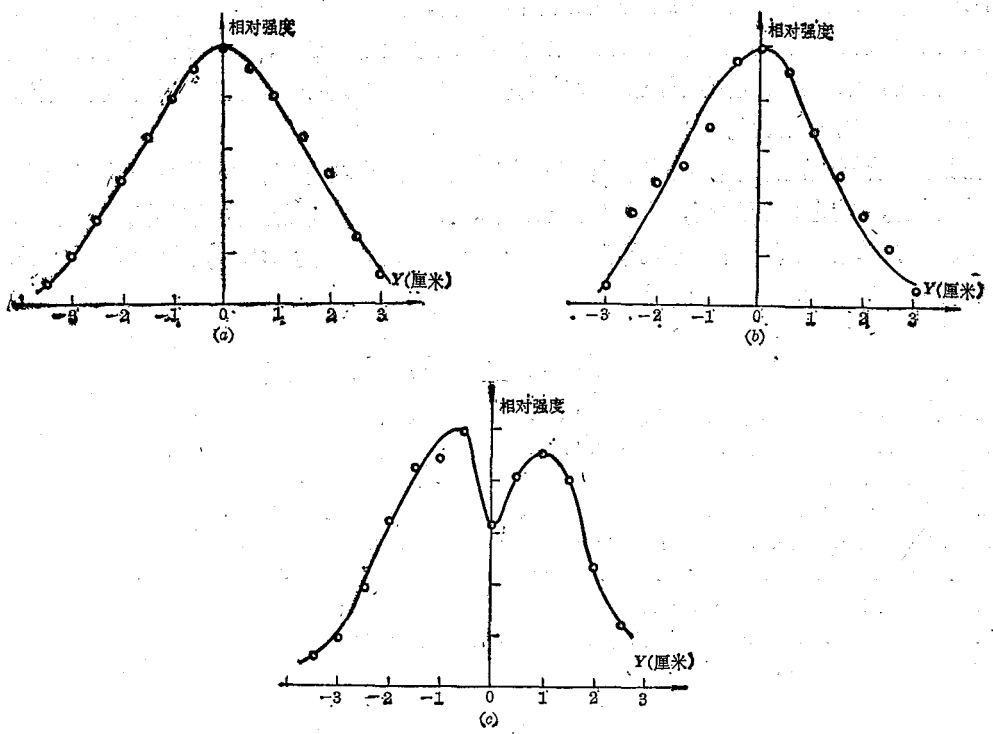

图 6　不同总气压下 y 方向强度分布

x=0，总气压分别为 (a) 32 乇，(b) 29 乇，(c) 17 乇

5. 激光器输出稳定性测量

为了估计测量误差，我们利用图 1 所示的装置，对实验用的激光管输出稳定性进行了测量。转镜的转速调到每分钟 2 转，固定接收器的位置，选择单模的情况下，记录纸上出现一连串脉冲。这些脉冲的峰尖画出了稳定性曲线。这种方法测稳定性是方便的。测得的曲线如图 7 所示。测量时总气压 35 乇，混合比 CO_2:N_2:He 为 1:2:7，放电电流 10 毫安。从曲线估计 15 分钟内激光输出波动约 ±8%。因为我们没有采取稳定措施，电源、水源的波动，激光腔

的变化，放电不稳定等因素都可能是产生这种变化的原因。从测量情况来分析，这是主要的误差来源。实验中，x 方向扫描，因为时间短，激光输出变化影响不大；在 y 方向测量时，测一组曲线需几分钟，激光输出的不稳定性就能比较明显地表现出来。

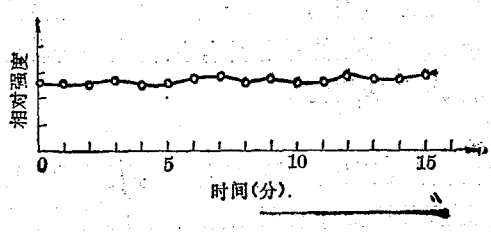

图7 激光器输出稳定性曲线

四、总结与讨论

本文所叙述的扫描法测 CO_2 激光束的横模结构，装置简单（在记录仪灵敏度足够时，甚至可以省去放大器，只要适当考虑阻抗匹配就可以了），测量方便，是一种比较好的测量方法。如果能在提高记录速度的前提下，加快 x 方向扫描速度，再增加一个转速较慢的转镜作 y 方向扫描，用起来就更加理想了。

我们对影响模式的某些参量作了研究。初步分析了放电电流、He 的分压比以及总气压对模式的影响。放电电流过高，He 的分压比低，总气压过低都会产生高次模，对获得基模不利。从实验看来，管径 7 毫米的管子，选择混合比 $CO_2:N_2:He$ 为 1:2:7，总气压 32 乇时，放电电流从 5 到 13 毫安，均能得到接近基模的输出。

参 考 资 料

[1] D. Meyerhofer, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-4**, 1968, p. 969.
[2] Б. М. Булгаков 等，国外激光，1973, No. 8, p. 29.
[3] 国外激光，1972, No. 5, p25.
[4] R. J. Freiberg *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-8**, 1972, p. 882.
[5] W. J. Witteman, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **QE-4**, 1968, p. 786.
[6] H. Kogelnik, *Appl. Opt.*, **5**, 1966, p. 1550.
[7] A. J. De Maria, *AIAA Paper*, No. 71—63.
[8] D. L. Franzen, R. J. Collins, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-8**, 1972, p. 400.