

# 激光束基本参数的实验测定

物理学系光学专业气体激光实验室

## 摘 要

本文描述了测定激光束空间分布的实验方法和结果,并与理论计算进行了对比。

通过对激光束能量空间分布以及激光束功率的测量,直接确定出激光束半径、角宽度、功率密度、亮度以及电场强度等基本参数。

在生产和科学实验工作中,最常用的连续波激光束基本参数大致包括下述诸项:

激光束能量的空间分布  $I(X)$ ;

激光束能量的频率分布  $I(\nu)$ 、(频谱与线宽);

激光束截面(光斑)半径  $W$ ;

激光束的角宽度(发散角)  $\theta$ ;

激光束的功率  $P$  及功率密度  $\rho$ ;

激光束的亮度  $B$ ;

激光束的电场强度  $E$ ;

激光束的偏振度  $P$ ……等等。

对于脉冲激光束还应包括峰值功率与平均功率、脉冲重复率以及脉冲宽度等参数。

在激光光学仪器、激光准直、激光通讯、激光测距、激光雷达等的应用中,常需测定  $W$ 、 $\theta$ 、 $B$  等项参数;

在激光打孔、焊接、切割或医学、生物学试验等的应用中,  $P$ 、 $\rho$ 、 $\theta$  等参数的确定通常都是必要的;

在非线性光学效应的各种定量研究中,首先要确定实验条件下激光束的电场强度。……。

在上述所有诸项参数的测量中,最基本的是激光束能量空间分布  $I(X)$  和激光束功率  $P$  的测量。从这两个基本参数的测定中将可直接导至其它几个参数 ( $W$ 、 $\theta$ 、 $\rho$ 、 $B$ 、 $E$  等) 的确定。

图1示出激光束能量空间分布的实验装置原理图。探测器为光电倍增管(GDB型),入射狭缝的高度 $h$ 和宽度 $S$ 可调,以保证在对线度为 $D$ 的光束截面测量过程中,做到 $D \gg h$ 和 $D \gg S$ 。从而提高空间测量的分辨率,入射狭缝与光电管接收面之间加入衰减网及毛玻璃片,以保证探测器的接收面光照状况基本匀称,狭缝的水平移动均有微动装置。水平方位的移动精度为 $10^{-2}$ 毫米。在测量过程中务必注意:光路上的环境条件变动都将导致测量误差,诸如空气中尘埃飞扬、光路上温度场不均匀所引起的折射率抖动等等。

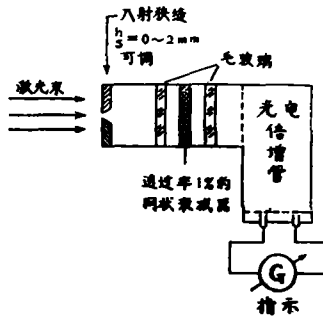


图 1

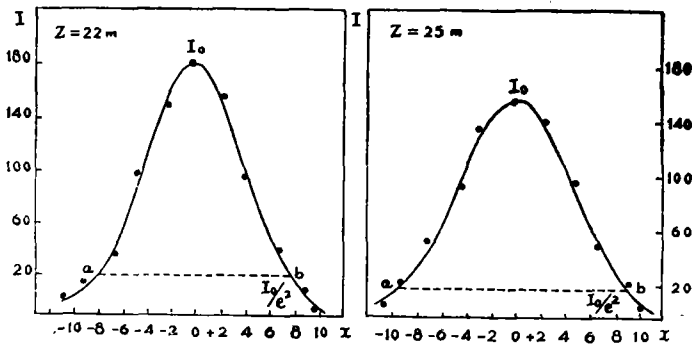


图 2

我们曾利用这一装置对 $A_r^+$ 激光束和He—Ne激光束进行了较大的测量。结果表明,测量的稳定性、重复性和准确度都可以满足一般实际工作的要求。现将其中一次对基模式 $A_r^+$ 激光束(波长 $\lambda = 4880\text{\AA}$ )的测量参数列于表I及图2。并与理论值作了对比。

谐振腔辐射场的波动理论分析指出,对于稳定腔的振荡基模(TEM<sub>00</sub>)的电场振幅呈高斯型分布,

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{x^2}{w^2}\right)$$

表 I

Z I(x) X (mm)	22 (m)			25 (m)		
	实 测	理 论	差 值	实 测	理 论	差 值
-11	3	1.82	+1	5	4.2	+1
-10	6	4.0	+2	6	7.9	-2
-9	7	8.4	-1	11	13.8	-3
-8	19	16.0	+3	25	23.1	+2
-7	31	28.4	+3	34	36.1	-2
-6	44	46.2	-2	56	53.4	+3
-5	67	70.3	-3	72	74.1	-2
-4	100	98.3	+2	95	97.2	-2
-3	133	129.6	+3	124	119.8	+4
-2	155	156.5	-1	140	139.2	+1
-1	179	174.7	+4	150	152.3	-2
0	183	182	+1	159	157	+2
+1	175	174.7	0	150	152.3	-2
+2	159	156.5	+2	141	139.2	+2
+3	132	129.6	+2	122	119.8	+2
+4	94	98.3	-4	100	97.2	+3
+5	72	70.3	+2	70	74.1	-4
+6	48	46.2	+2	55	53.4	+2
+7	25	28.4	-3	35	36.11	-1
+8	18	16.0	+2	25	23.1	+2
+9	9	8.4	+1	11	13.8	-3
+10	3	4.0	-1	6	7.8	-2
+11	2	1.82	0	5	4.2	-1

注 1, Z~测量点与激光器输出镜面的距离(米)

X~测量点与激光束轴线的距离(毫米)

I~相对强度(光电流:微安)

2: 实验为 X 每隔 0.2 mm 测一点, 为简明起见, 表中只列出每隔 1 mm 的各点的数  
据。表中数据为三次测量的平均值。

并定义 E 降至 E<sub>0</sub> 的 1/e 处时的 X (=w) 为光束半径; 对于激光束的光强分布, 亦应为高斯型:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2x^2}{w^2}\right)$$

故此,从图2中测得的曲线可以找出光强下降到峰值 $I_0$ 的 $1/e^2$ 处的a、b两点,  
 $\Delta X_{ab} = 2w$ 即为光束直径。

从距离输出镜(亦为光束腰部)22米及25米处所测得的光强分布曲线分别获得如下解析表达

$$I = 182 \exp\left(-\frac{2x^2}{52.7}\right) \quad (Z = 22 \text{ 米})$$

$$I = 157 \exp\left(-\frac{2x^2}{68.0}\right) \quad (Z = 25 \text{ 米})$$

这结果表明:激光束的光强沿径向分布确实是高斯型的。

把由处于远场(本情况为 $Z \gg 25$ 厘米)的两点所测得的光斑半径 $w_1$ 、 $w_2$ ,按几何关系即可算出光束的角宽度 $\theta$ 。

同时,已知该谐振腔的参数为:全反射镜M1的曲率半径为3000毫米;输出镜M2为平面;镜间距离 $L = 1450$ 毫米。从而可按谐振腔理论算出激光束腰部半径(在输出镜面上)为 $w_0 = 0.48$ 毫米;光束角宽度为 $\theta = 0.32 \times 10^{-3}$ 弧度。(图3)。

上述实测与理论计算结果列于表II。

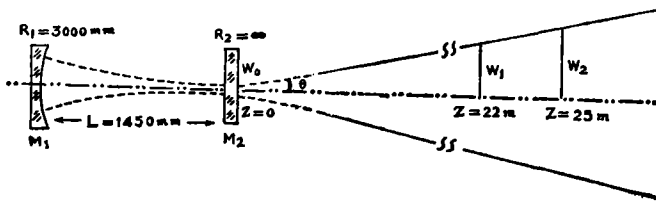


图 3

表 II

Z	光束截面(光斑)半径W			光束角宽度 $\theta$		
	实 测	理 论	差 值	实 测	理 论	差 值
22(m)	7.2mm	7.26mm	+0.06	$0.33 \times 10^{-3}$	$0.32 \times 10^{-3}$	-0.01
25(m)	8.2mm	8.25mm	+0.05	弧 度	弧 度	$\times 10^{-3}$

此外,利用了炭锥能量计及计时快门测量了上述连续波激光束的功率为 $P = 800$ 毫瓦。由此可分别获得 $Z = 0$ 、 $Z = 22$ 米、 $Z = 25$ 米各点处的功率密度 $\rho = P/\pi w^2$ ,其结果列于表III。

从前面测量所获得的参数,可以直接计算出激光器的输出亮度 $B$ ;  
 当激光束的角宽度 $\theta$ 不大时,它所张的立体角近似为

$$\Omega = \frac{\pi}{4} \times \theta^2 = 8.5 \times 10^{-8} \text{ 立体角}$$

由此得激光器的输出亮度为

$B = \rho/\Omega = 1.3 \times 10^9$  瓦/厘米<sup>2</sup> 立体角, 这相当于太阳表面积亮度的  $10^6$  倍 (太阳表面积亮度为  $10^3$  瓦/厘米<sup>2</sup> 立体角)。或相当于太阳表面单色亮度 (以  $\Delta\lambda = 1\text{\AA}$  来估算, 其实  $\Delta\lambda$  激光束带宽更小, 约  $\Delta\lambda \sim 10^{-2}\text{\AA}$ ) 的  $10^9$  倍。(太阳表面在辐射峰值波长  $4830\text{\AA}$  附近  $1\text{\AA}$  带宽范围内单色亮度为  $0.1$  瓦/厘米<sup>2</sup> 立体角)。

从前面测量所获得的功率密度值  $\rho$ , 还可直接算出激光束的峰值电场强度  $E_{\text{峰}}$ :

$$E_{\text{峰}} = \sqrt{2\rho\sqrt{\mu/\epsilon}}$$

其中  $\mu$ 、 $\epsilon$  分别为介质的导磁率和介电常数, 对于真空, 有  $(\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 367.7$  欧。所得结果均列于表 III

表 III

功 率 P	800 (mW)		
	距 离 Z	0	22 (mm)
光斑半径 W (Z)	0.48 (mm)	2.7 (mm)	8.2 (mm)
功率密度 $\rho$	110 (W/Cm <sup>2</sup> )	0.5 (W/Cm <sup>2</sup> )	0.4 (W/Cm <sup>2</sup> )
激光束亮度 B	1.3 × 10 <sup>9</sup> (瓦/厘米 <sup>2</sup> 立体角)		
激光束电场强度 $E_{\text{峰}}$	288 (V/Cm)	19.4 (V/Cm)	17.3 (V/Cm)

关于激光束能量按频率分布的测量 (模频谱及线宽) 可以采用高分辨率光谱学设备以及频谱分析仪等方法解决。

至于对外腔式激光器输出的激光束的偏振度的测量, 我们目前尚未进行, 但在我们过去的工作中做了若干分析, 预期一般带有布鲁斯特窗的气体激光器输出光束的偏振度  $P > 98\%$ 。