

## 实验 12 高斯光束的参数测量及透镜变换实验

### 引言

激光器由光学谐振腔、工作物质、激励系统构成，相对一般光源，激光有良好的方向性，即光能量在空间的分布高度集中在光的传播方向上，但也有一定的发散度。在激光的横截面上，光强是以高斯函数型分布，故称为高斯光束。在激光的生产与应用中，如定向、制导、精密测量、光通讯等，需要了解激光光束的各种参数指标。因此，掌握高斯光束的测量方法是光电专业学生必须具备的能力。

### 一、实验目的

- 1、了解高斯光束光场分布的特性和参数指标。
- 2、掌握描述高斯光束传播特性的参数的物理意义。
- 3、了解掌握理想透镜对高斯光束的变换作用和变换规律。
- 4、熟悉高斯光束相关参数的测量方法。

### 二、实验原理

#### 1、高斯光束的基本性质

众所周知，电磁场运动的普遍规律可用 Maxwell 方程组来描述。对于稳态传输光频电磁场可以归结为对光现象起主要作用的电矢量所满足的波动方程。在标量场近似条件下，可以简化为赫姆霍兹方程，高斯光束是赫姆霍兹方程在缓变振幅近似下的一个特解，它可以足够好地描述激光光束的性质。使用高斯光束的复参数表示和 ABCD 定律能够统一而简洁的处理高斯光束在腔内、外的传输变换问题。

在缓变振幅近似下求解赫姆霍兹方程，可以得到高斯光束的一般表达式：

$$A(r, z) = \frac{A_0 \omega_0}{\omega(z)} e^{-r^2/\omega^2(z)} \cdot e^{-i[\frac{kr^2}{2R(z)} - \psi]} \quad (12.1)$$

式中， $A_0$  为振幅常数， $\omega_0$  定义为场振幅减小到最大值的  $1/e$  的  $r$  值，称为腰斑。它是高斯光束光斑半径的最小值。 $\omega(z)$ 、 $R(z)$  和  $\psi$  分别表示了高斯光束的光斑半径、等相面曲率半径和相位因子，是描述高斯光束的三个重要参数，其具体表达式分别为：

$$\begin{aligned} \omega(z) &= \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_0}\right)^2} \\ R(z) &= Z_0 \left( \frac{z}{Z_0} + \frac{Z_0}{z} \right) \\ \psi &= \lg^{-1} \frac{z}{Z_0} \end{aligned} \quad (12.2)$$

其中， $Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$ ，称为瑞利长度或共焦参数。

(1)：高斯光束在  $z = \text{const}$  的面内，场振幅以高斯函数  $e^{-r^2/\omega^2(z)}$  的形式从中心向外平

滑的减小，因而光斑半径  $\omega(z)$  随坐标  $z$  按双曲线：

$$\frac{\omega^2(z)}{\omega_0^2} - \frac{z}{Z_0} = 1 \quad (12.3)$$

规律而向外扩展，如图 12.1 所示

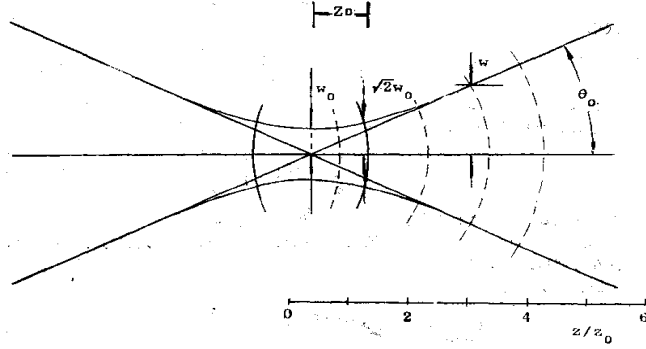


图 12.1 高斯光束以及相关参数的定义

(2): 在 (12.1) 式中令相位部分等于常数，并略去  $\psi(z)$  项，可以得到高斯光束的等相面方程：

$$\frac{r^2}{2R(z)} + z = \text{const} \quad (12.4)$$

因而，可以认为高斯光束的等相面为球面。

(3): 瑞利长度的物理意义为：当  $|z| = Z_0$  时， $\omega(Z_0) = \sqrt{2}\omega_0$ 。在实际应用中通常取  $z = \pm Z_0$  范围为高斯光束的准直范围，即在这段长度范围内，高斯光束近似认为是平行的。所以，瑞利长度越长，就意味着高斯光束的准直范围越大，反之亦然。

(4): 高斯光束远场发散角  $\theta_0$  的一般定义为当  $z \rightarrow \infty$  时，高斯光束振幅减小到中心最大值  $1/e$  处与  $z$  轴的交角。即表示为：

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} \\ &= \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \end{aligned} \quad (12.5)$$

## 2、高斯光束的复参数表示和高斯光束通过光学系统的变换

定义  $q = \frac{1}{R} - i \frac{1}{\pi\omega^2}$ ，由前面的定义，可以得到  $q = z + iZ_0$ ，因而 (12.1) 式可以改写为

$$A(r, q) = A_0 \frac{iZ_0}{q} e^{-kr^2/2q} \quad (12.6)$$

$$\text{此时, } \frac{1}{R} = \operatorname{Re}\left(\frac{1}{q}\right), \quad \frac{1}{\omega^2} = -\frac{\pi}{\lambda} \operatorname{Im}\left(\frac{1}{q}\right)。$$

高斯光束通过变换矩阵为  $M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  的光学系统后, 其复参数  $q_2$  变换为:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (12.7)$$

因而, 在已知光学系统变换矩阵参数的情况下, 采用高斯光束的复参数表示法可以简洁快速的求得变换后的高斯光束的特性参数。

### \*3.刀口法测量高斯光束参数

高斯光束光斑的光强分布为:

$$I = I_0 \left[ \frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 e^{-2r^2/\omega(z)} \quad (12.8)$$

#### (1) 采用 90/10 刀口法对高斯光束光斑及束腰进行测量,方法如下:

将刀片固定在可四维调节的光学平台上,且平台下面装有沿前后、左右两垂直方向都可较长距离旋进的螺旋测微器,使刀片所在的平面垂直于高斯光束轴线(  $z$  轴),如图 2 所示。设在刀片没有遮挡时高斯激光光束的功率为  $P$ , 沿  $x$  轴方向旋转测微器移动刀口,当刀口运动  $x_1$  处时,刀片会挡住 10% 的激光功率,即此时功率计探测到的功率为  $P_1$ , 且  $P_1 = 90\%P$  时,记录下此位置所对应的螺旋测微器示数  $x_1$ 。再沿  $-x$  轴方向继续移动刀口,当功率计示数为  $P_2$ , 且  $P_2 = 10\%P$  时,记录下此位置所对应的螺旋测微器示数  $x_2$ 。此时测量到的高斯光束 10%-90% 的直径  $\omega = x_1 - x_2$ 。再旋转纵向螺旋测微器,在高斯光束束腰两侧沿  $z$  轴等距离间隔测出一组光束直径  $\omega_n$ , 如图 3 所示, 就可以通过双曲线拟合方程  $\omega_n^2 = A + Bz + Cz^2$  拟合出系数  $A, B, C$ , 再通过公式  $\omega'_0 = \sqrt{A - B^2/4C}$  计算出高斯光束束腰直径的测量值  $\omega'_0$ 。进而计算得实际的高斯光束束腰直径为  $\omega_0 = 1.561\omega'_0$ , 对应的  $z$  坐标就是束腰的位置。

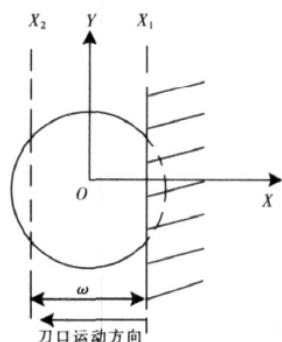


图 12.2 高斯光束横向测量示意图

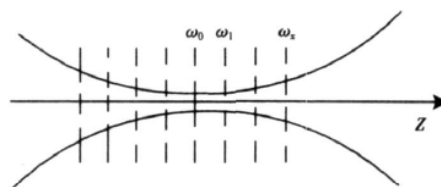


图 12.3、高斯光束纵向测量位置示意图

#### (2) 基本测量原理

当利用一刀口垂直于光束测  $x$  方向移动,将遮盖部分光束,则图二所示,此时透过的激光功率可由下式给出:

$$P(x) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2P_0}{\pi\omega^2} \exp[-2(x^2 + y^2)/\omega^2] dy$$

$$P_0 = I_0 \cdot \pi\omega_0^2$$

$$= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2x^2/\omega^2) dx \quad (12.9)$$

因此,

$$\frac{P(x)}{P_0} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2x^2/\omega^2) dx$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{2}x}{\omega} \right) \right] \quad (12.10)$$

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$  是高斯误差函数。可以计算, 选择 P%, 1-P%时, 束腰半径与刀口的两位置坐标之差有如下关系:

P%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%
1-P%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%
$\omega/(x_2 - x_1)$	1.217	1.561	1.931	2.375	2.967	3.817	5.181	7.874	15.873

### 三、实验装置

- 1、He-Ne 内腔式激光器组件 ( $TEM_{00}(632.8nm; 2mw)$ )
- 2、光学导轨组件
- 3、可变光阑组件 ( $\Phi 2-29mm$ )
- 4、高斯光束变换透镜 (实现 2-4 倍扩束变换和聚焦功能)
- 5、激光衰减器 (实现 1-0.1%光强变化)
- 6、CCD 组件 (1/2 英寸 600 线)
- 7、图像采集卡 (DH-CG300)
- 8、BEAMVIEW 光束分析与测量软件
- 9、示波器
- 10、四维光学调节台 (附刀片)
- 11、功率计

### 四、实验内容与步骤

#### 1、实验内容

- (1) 将 He-Ne 激光器开启, 调整高低和俯仰, 使其输出光束与导轨平行。可通过前后移动一个带小孔的支杆实现。调整好光路, 使激光束通过各光学元器件中心
- (2) 启动计算机, 运行 Beam View 激光光束参数测量软件。
- (3) He-Ne 激光器输出的光束测定及模式分析: 转动可变衰减器, 使激光光斑的最强位置大于其饱和值的 2/3 但不饱和。利用激光光束参数测量软件分析激光束的模式, 判定其输

出的光束为基模高斯光束还是高阶模式。利用激光光束参数测量软件显示激光束的二维和三维分布。

(4) He-Ne 激光器输出的光束束腰位置的确定：

- 调节好光路，使 He-Ne 激光器输出的光束的光轴与测量所用的光学导轨平行；
- 沿着测量所用的光学导轨前后移动 CCD 探测器，同时观察软件界面上的光斑图像；
- 确定光斑最小的位置，此位置即为激光束光束的束腰位置。
- 如果在前后移动 CCD 探测器时始终没有光斑最小的位置，说明激光束的束腰在谐振腔内，这时需加一辅助球面透镜，重复上述步骤，可确定出激光光束束腰的像位置。

通过成像物像公式：

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (12.11)$$

可计算出束腰的实际位置。

(5)\* 用刀口法测量 He-Ne 激光器输出的光束束腰和束腰位置，并与用 CCD 测量的参数进行比较。

(6) He-Ne 激光光束经不同透镜、柱面镜变换后光场分布的测量：

透镜换成其它焦距的透镜或换成柱面镜，利用激光光束参数测量软件观测经过其它焦距的透镜或柱面镜变换后光场的变化情况，显示其二维和三维分布。

(7) 扩束系统的测量：保持测束腰系统不变。

学生自行从实验设备箱中所放置的透镜组中，选定合适的镜片组和，达到 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍凸/凹透镜激光扩束镜组的效果，并通过软件中的直径测量功能记录数据、练习科学地对数据进行均值处理并作验证（实验设备中提供的 HN 激光器光束直径 800 微米）。

本实验系统含有：焦距为+300,+150,+100,-150,-75,-50 的镜片组。可有 10 种不同的组合可能。提示：可根据无焦望远镜扩束比公式：

$$M = \frac{f_0}{f_i} \quad (12.12)$$

激光扩束镜即倒置的无焦望远镜。

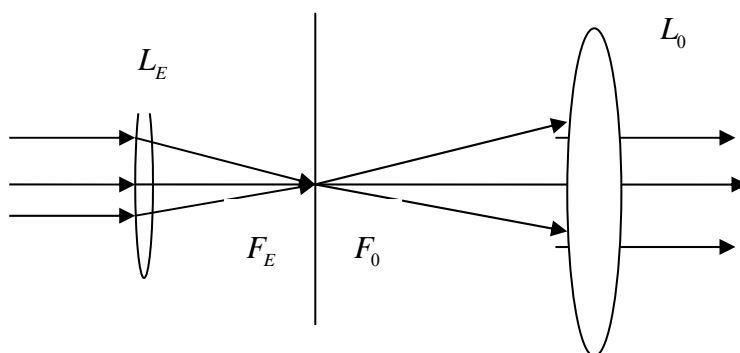


图 12.4 激光扩束镜原理

注意：在大约束腰的位置放置扩束镜片（学生思考这样放置的原因）。

## 2、实验步骤

- (1) 点亮氦氖激光器，调整光路，用激光光束分析仪测试氦氖激光的高斯光束参数，计算出腰斑位置和大小、远场发散角、共焦参数；

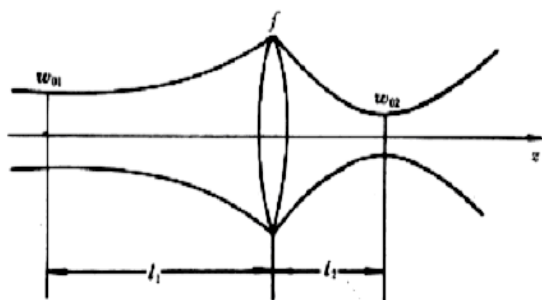


图 12.5 基于薄透镜的高斯光束  
聚焦光学系统

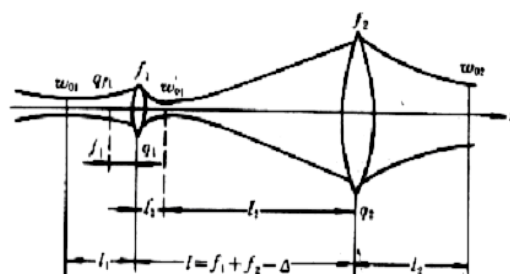


图 12.6 望远镜系统对高斯光束的  
准直与扩束

- (2) 按照实验要求和图 12.4，自行选择合适的透镜，在光具座上搭建高斯光束聚焦光学系统，并测量高斯光束经过聚焦光学系统后高斯光束的参数。根据光学透镜的参数和步骤 1) 中测量到的高斯光束的参数，理论计算变换后的高斯光束的参数，并和试验测量结果对比分析。
- (3) 按照实验要求自己选择合适的透镜，搭建高斯光束扩束准直光学系统，并测量高斯光束经过扩束准直光学系统后高斯光束的参数。根据光学透镜的参数和步骤 1) 中测量到的高斯光束的参数，理论计算变换后的高斯光束的参数，并和试验测量结果对比分析。

## 五、注意事项

- 1、激光器电源电压较高，实验时应注意安全。
- 2、调整光路时，应注意人眼安全。
- 3、实验过程中，注意保护光学元器件的清洁。

## 六、思考题

- 1、设计高斯光束的聚焦光学系统应注意哪些问题？
- 2、如何优化设计高斯光束的准直光学系？
- 3、比较刀口法与 CCD 测量束腰以及束腰位置的优缺点。

## 七、参考文献

- 1、《激光光学：激光束的传输变换和光束质量控制》，吕百达，四川大学出版社，1992；
- 2、《强激光的传输与控制》，吕百达，国防工业出版社，1999；
- 3、杨晓冬，邵建新，廖生鸿，谭锦业，周杰，蒋跃文，刀口法测量高斯光束光斑半径研究，激光与红外，39(8)，829-832(2009)

---

## 附：BeamView激光光束参数测量软件安装说明

- 1、软件运行环境：Windows2000或Windows XP 操作系统。
- 2、本软件为免安装版本，解压后要先进行注册才能够使用。
- 3、软件注册方法：运行文件夹中的注册机，将会产生随机的机器码，将该机器码通过手机短信或者Email发送给软件开发单位（手机号码：13911676851），将会得到的注册码。将得到的注册码输入到注册码提示栏中，点击注册机可完成注册。
- 4、注意：务必将注册机与应用程序放在同一目录下，并且不要改变应用程序的名称，否则无法完成注册！
- 5、如果需要将应用程序拷贝到其它机器上运行，需要重新按上面的方法进行注册。

## 附：BeamView激光光束参数测量软件使用说明

本软件可以用来实时显示CCD相机采集到的光斑图像，采用二维和三维的方式进行显示，并且可以根据光斑图像计算出光斑的大小以及光斑质心位置坐标，软件界面上具体各部分功能如下面介绍所示：

### 一、图像操作区域：

- 1、显示：用来实时显示图像。
- 2、停止：停止显示图像。
- 3、扣除背景：从采集到的图像中以灰度值相减的方法扣除掉已知的背景图像；
- 4、载入图像：读入一幅8位灰度图像。
- 5、保存图像：将当前显示的图像保存为.bmp图像文件。
- 6、计算直径：根据图像计算出X和Y方向上的光斑大小和光斑质心位置坐标。
- 7、3D显示：将光斑图像以三维的方式显示出来。
- 8、帮助：获得本软件的帮助文档。

注意：上述3-8按钮只用在停止采集图像的时候才是可用的。

### 二、光斑信息区域：

分别显示光斑大小和光斑质心位置坐标，均从XY两个方向显示，单位分别为微米和像素。

鼠标所指像元区域：

当停止采集时，显示鼠标所在位置的坐标值（定义图像显示区域左上角为坐标原点）以及鼠标所指图像像元的灰度值（0-255）；右边图像显示客户区用来对图像进行二维显示，水平和垂直两条曲线分别显示鼠标所指位置所在行和所在列的像元的灰度信息。

## 实验 13 He-Ne 激光器的模式分析

### 引言

相对一般光源，激光具有单色性好的特点，也就是说，它具有非常窄的谱线宽度。这样窄的谱线，不是受激辐射后自然形成的，而是受激辐射经过谐振腔等多种机制的作用和相互干涉后形成的。所形成的一个或多个离散的、稳定的又很精细的谱线就是激光器的模。每个模对应一种稳定的电磁场分布，即具有一定的光频率。相邻两个模的光频率相差很小，我们用分辨率比较高的分光仪器可以观测到每个模。当从与光输出的方向平行（纵向）和垂直（横向）两个不同的角度去观测和分析每个模时，发现又分别具有许多不同的特征，因此，为方便每个模又相应称作纵模和横模。

在激光器的生产与应用中，我们常常需要先知道激光器的模式状况，如精密测量、全息技术等工作需要基横模输出的激光器，而激光稳频和激光测距等不仅要求基横模，而且要求单纵模运行的激光器。因此，模式分析是激光器的一项基本而又重要的性能测试。

### 一、实验目的

- 1、了解激光器的模式结构，加深对模式概念的理解。
- 2、通过测试分析，掌握模式分析的基本方法。
- 3、对本实验使用的分光仪器—共焦球面扫描干涉仪，了解其原理、性能，学会正确使用。

### 二、实验原理

#### 1、激光器模的形成

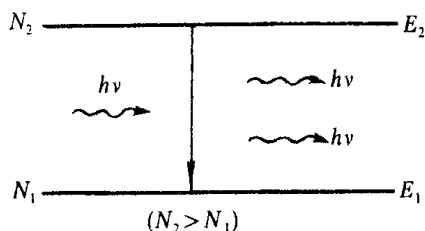


图 13.1 粒子数反转分布

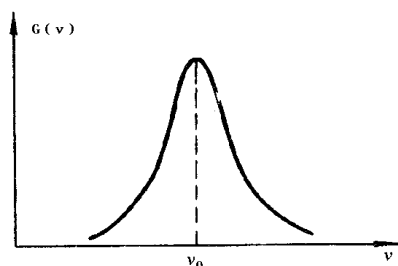


图 13.2 光的增益曲线

激光器的三个基本组成部分是增益介质、谐振腔和激励能源。如果用某种激励方式，在介质的某一对能级间形成粒子数反转分布，由于自发辐射和受激辐射的作用，将有一定频率的光波产生，在腔内传播，并被增益介质逐渐增强、放大，如图 13.1 所示。实际上，由于能级总有一定的宽度以及其它因素的影响，增益介质的增益有一个频率分布，如图 13.2 所示，图中  $G(\nu)$  为光的增益系数。只有频率落在这个范围内的光在介质中传播时，光强才能获得不同程度的放大。但只有单程放大，还不足以产生激光，要产生激光还需要有谐振腔对其进行光学反馈，使光在多次往返传播中形成稳定、持续的振荡。形成持续振荡的条件是，光在谐振腔内往返一周的光程差应是波长的整数倍，即