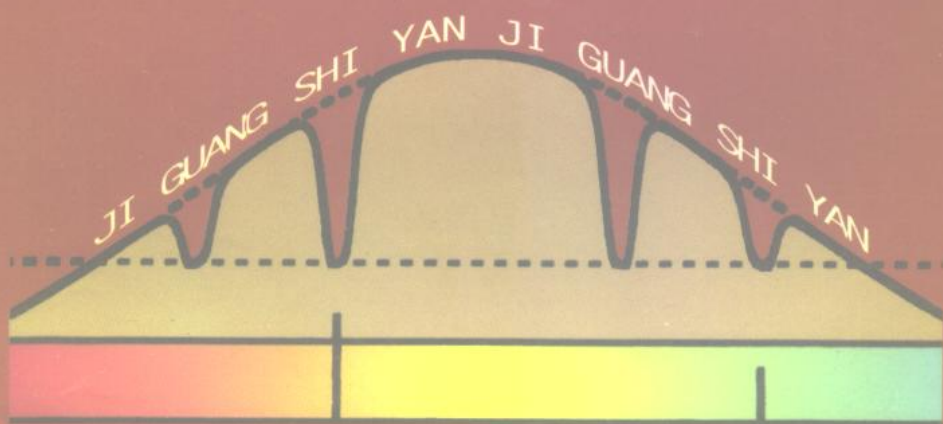


北京大学现代光学丛书

激光实验

黄植文 黄显玲 主编



北京大学出版社

TN24-33

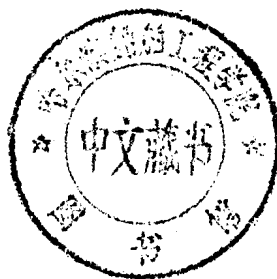
H 12

392000

北京大学现代光学丛书

激 光 实 验

黄植文 黄显玲 主编



北京大学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

DL65/11
激光实验/黄植文, 黄显玲主编. —北京: 北京大学出版社,
1996.9

(北京大学现代光学丛书)

ISBN 7-301-03163-7

I. 激… II. ①黄… ②黄… III. 激光技术 - 实验 IV. T
N24-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96)第 13123 号

书 名: 激光实验

著作责任者: 黄植文 黄显玲

责任编辑: 瞿 定

标准书号: ISBN7-301-03163-7/O·0378

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

电 话: 出版部 62752015 发行部 62559712 编辑部 62752032

排 印 者: 北京大学印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

版 本 记 录: 850×1168 毫米 32 开本 7.75 印张 190 千字

1996 年 9 月第一版 1996 年 9 月第一次印刷

印 数: 0001—1800 册

定 价: 11.50 元

前 言

激光实验是北京大学物理系自 1980 年以来为本科高年级学生开设的选修课.它与激光物理课程相配合,但又是完全独立的课程.经过十多年的教学实践,从实验内容到数量都得到了不断的更新和扩充.这里选择了十九个较有代表性的实验整理出版.其中大多数内容是在本校科学研究成果的基础上提炼而成的,体现了基础性、实用性和先进性.有个别实验是近一二年新建设的,尚需进一步完善.我们尽力使课程内容能反映激光领域中基本的物理规律、典型的激光器件和重要的激光技术.

书中每个实验内容都是独立的,具备相当于大学本科高年级水平的读者在掌握了实验内容后都可以独立地进行操作.每个实验分量不完全相同,一般预习需要 3~5 学时;实验操作测量需用 6~8 学时;总结分析需用 3~5 学时.学习者在独立完成以上三个过程后将会在独立工作和综合实验能力上得到较好的训练和提高.

这本教材是由九位教师合作编写完成的,教材的编写较为详尽.是北京大学现代光学丛书之一,已出版的丛书有王国文教授编著的原子和分子光谱导论,邹英华、孙驹亨教授编著的激光物理学,随后还会有其他内容的教程出版.

在整个实验课程建设和发展过程中得到了许多老师的指导和帮助,在这里要特别感谢的是杨葭荪、夏宗炬、邹英华、王国文、陈天杰几位教授.还有赵绥堂高级工程师,也给予了许多具体的帮助.在此衷心表示我们真诚的谢意.

编 者

1994 年 12 月

内 容 简 介

本书是北京大学物理系激光实验课十几年所积累经验之总结。书中选择了有代表性的实验,有些构思独特,也安排一些新进展方面的实验,各实验后又给出思考题,指导读者作更深入细致的观察与研究。内容包括激光基本现象的观察;主要参数的测量;典型激光器的调节及使用以及重要的激光技术应用等。每个实验较详细地介绍了原理、装置、方法及主要步骤。对有条件的大专院校、工厂、科研单位都有较大的参考价值。

目 录

实 验 一	高斯光束和发散角的测量	1
实 验 二	He-Ne 激光器的模式分析	11
实 验 三	用光谱相对强度研究氩氛放电管的增益特性	24
实 验 四	氩氛多谱线激光器	37
实 验 五	氩氛激光器的参数测量	51
实 验 六	CO ₂ 激光器小信号增益系数的测量	63
实 验 七	光纤光栅外腔半导体激光器的光谱观测	75
实 验 八	N ₂ 激光泵浦的染料激光器及其特性测量	83
实 验 九	调 Q 脉冲 YAG 激光器	99
实 验 十	非线性晶体中的二倍频与和频	111
实验十一	声光调制锁模激光器	123
实验十二	激光稳频与测量技术	137
实验十三	光纤通信	153
实验十四	单模光纤的损耗和截止波长的测量	167
实验十五	单模光纤维尔德常数的测定	175
实验十六	光学双稳实验	185
实验十七	晶体的电光效应及其应用 —— 用相位补偿测量 双折射样品的微小相位差	197
实验十八	相位调制法对黑白图像进行等密度假彩色编码	219
实验十九	用散斑照相方法测量漫射体的平移	230

实验一 高斯光束和发散角的测量

黄 显 玲

相对一般光源,激光束具有方向性好的特点,也就是说,光能量在空间的分布高度集中在光的传播方向上,但是它仍有一定的发散度,同时光强分布有着特殊结构,如由球面镜构成谐振腔产生的激光束,既不是均匀的平面波,也不是均匀的球面波,在它的横截面上,光强是以高斯函数型分布的,故称作高斯光束,此种激光束有着广泛的实际应用,同时它也是研究其他分布类型激光束的基础,本实验是以He-Ne激光器 6328Å 基横模输出的高斯光束为例,分析和研究其光强在空间的分布情况——传播特性。

本实验的目的:

- (1) 加深对高斯光束物理图象的理解。
- (2) 学会对描述高斯光束传播特性的主要参数即光斑尺寸、远场发散角的测量方法。
- (3) 学习和运用微型计算机控制物理实验。

一、实 验 原 理

光波是光振动在空间的传播,根据波动方程,一束沿某一方向(设为 z)传播的高斯光束,其电矢量 E 的空间变化表示为

$$E(x, y, z) = \frac{A_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{w^2(z)}\right] \cdot \exp\left\{i\left[-k\left(\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + z\right) + \varphi(z)\right]\right\}, \quad (1-1)$$

其中等式右边,乘点前的那部分表示 E 的振幅,乘点后的部分为 E 的相位。 $A_0/w(z)$ 为 z 轴上 ($x=y=0$) 各点的电矢量振幅 $A(0, 0, z); w(z)$

叫 z 点的光斑尺寸, 它表示电矢量振幅下降到中心值 (中心点 $(0, 0, z)$ 的振幅) 的 $1/e$, 或光强下降到中心光强的 $1/e^2$ 时, 所对应的点 (x, y, z) 到中心点的距离. 光斑尺寸的表示式为

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1-2)$$

其中, w_0 是 $z=0$ 点的光斑尺寸, 称作光斑的“腰粗”, 它是高斯光束的特征参量, 由激光器结构决定. 例如平凹腔的 w_0 为

$$w_0 = \left[\frac{\lambda^2}{\pi^2} (RL - L^2) \right]^{1/4}, \quad (1-3)$$

其中, λ 为激光波长, L 为激光器谐振腔腔长, R 为凹面镜的曲率半径. $R(z)$ 是 z 处波阵面的曲率半径:

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right], \quad (1-4)$$

$\varphi(z)$ 是与 z 有关的相位因子:

$$\varphi(z) = \arctg \frac{\lambda z}{\pi w_0^2}. \quad (1-5)$$

只要 w_0 给定, 就可求出 $R(z)$, $w(z)$, $\varphi(z)$.

以上 (1-1) 至 (1-5) 式共同描述激光束的物理图象, 现在分段分析光束传播的特点 (参看图 1-1):

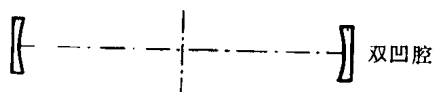
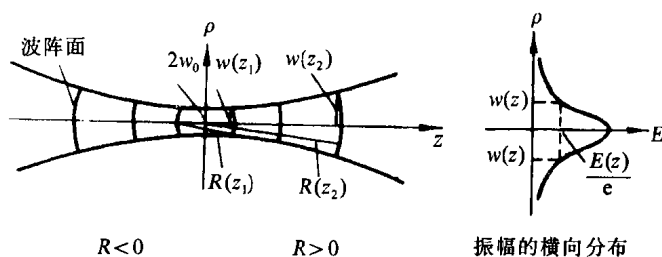


图 1-1 曲率半径相同的双凹腔中基横模 TEM_{00} 的剖面图

(1) $z=0$ 处

波阵面: 从(1-4)式中看出, $\lim_{z \rightarrow 0} R(z) = \infty$, 所以 $z=0$ 处的波阵面是一个平面.

振幅:

$$A(x, y, 0) = \frac{A_0}{w_0} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{w_0^2}\right]$$

为高斯函数型, 设 $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$, 表示点 (x, y) 到中心的距离. 在

$\rho=0$ (即光斑中心) 处, $A(0, 0) = \frac{A_0}{w_0}$, 振幅最大; 在 $\rho=w_0$ 处, $A(w_0, 0) =$

$\frac{1}{e} \cdot \frac{A_0}{w_0} = \frac{1}{e} A(0, 0)$, 振幅下降到中心值的 $\frac{1}{e}$; 当 ρ 继续增大时, 振

幅将继续下降, 逐渐趋于 0. 所以振幅的变化是中心最大, 沿半径向外逐渐减小, 没有清晰的边缘. 总的说来, 在 $z=0$ 处, 尽管波阵面是个平面, 然而光强的分布是不均匀的, 所以它不同于平行光束的平面波.

(2) $z=z_0>0$ 处

波阵面: 从(1-1)式相位部分看出, 它虽比均匀球面波多了一个相位因子 $\varphi(z_0)$, 但 $\varphi(z_0)$ 是个常数, 不影响波阵面的形状, 所以它的波阵面仍是一个球面, 曲率半径为 $R(z)$. 从(1-4)式中还可看到, 波阵面的曲率半径 $R(z)$ 是随 z 而变化的, $R(z)$ 总大于 z_0 , 即不同 z 处的球面波的中心都不在原点, 但随 z 的增加逐渐趋于原点.

振幅: 与 $z=0$ 处具有相同的变化规律. 仍是中心最大, 由中心向外以高斯函数形式逐渐减小, 所以它不同于点光源发射的球面波.

(3) $z=z_0<0$ 处

与 $z=z_0>0$ 处一样, 都是高斯球面波. 不同的是, $R(-z_0)<0$ 是沿 z 传播的会聚球面波, $R(z_0)>0$ 是沿 z 传播的发散球面波, 它们以

$z=0$ 平面为对称分布。

总的说来,光斑尺寸 $w(z)$ 是随 z 的增加而增加的,成为两条对称曲线.在 $z=0$ 处最细,故形象地称作光束的“腰”,它位于双凹腔的中心.对于平凹腔激光器,它相当于双凹腔的一半,不难看出腰应位于平面镜的中心.平凹腔情况见图 1-2.

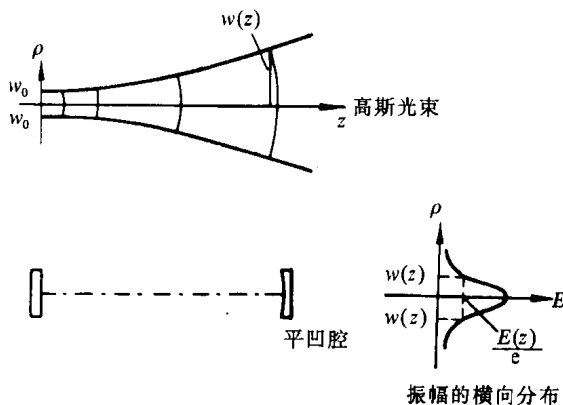


图 1-2 平凹腔中基模 TEM_{00} 的剖面图

我们将 (1-2) 式变换一下形式,得

$$\frac{w^2(z)}{w_0^2} - \frac{z^2}{(\pi w_0^2/\lambda)^2} = 1, \quad (1-6)$$

正是双曲线方程.它表明光斑尺寸的轨迹是一组以 $z=0$ 为原点的双曲线,见图 1-1.

我们用全发散角 2θ 表征它的发散程度,定义

$$2\theta \equiv 2 \frac{dw(z)}{dz} = \frac{2\lambda^2 z}{\pi w_0^2} (\pi^2 w_0^4 + z^2 \lambda^2)^{-1/2}. \quad (1-7)$$

现在分析 2θ 在整个传播光路中的变化情况.显然,在 $z=0$ 处, $2\theta=0$.当 z 增大, 2θ 增加.在 $z=0 \rightarrow z=z_r$ 这段范围内,全发散角变化较慢,我们称 z_r 为准直距离,

$$z_r \equiv \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (1-8)$$

在 $z > z_r$, 全发散角变化加快. 当 $z \rightarrow \infty$, 2θ 变为常数. 我们将此处的全发散角称为远场发散角, 有

$$2\theta = 2 \frac{\lambda}{\pi w_0}. \quad (1-9)$$

不难看出, 远场发散角实际就是以光斑尺寸为轨迹的两条双曲线的渐近线间的夹角, 见图 1-3.

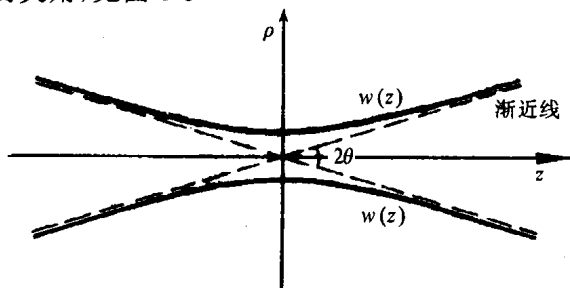


图 1-3 高斯光束远场发散角

实验中, 我们如何测量远场发散角呢? 由于不可能在无穷远处测量, 故 (1-9) 式只是理论上的计算式, 不能作为测量公式, 而需用近似测量来代替. 可以证明, 当 $z \geq 7z_r = 7\pi w_0^2/\lambda$ 时, $2\theta(z)/2\theta(\infty) \geq 99\%$, 即当 z 值大于 7 倍 z_r 时所测得的全发散角, 可和理论上的远场发散角相比, 误差仅在 1% 以内. 那么 z 值带来的实验误差已不是影响实验结果的主要因素了, 这就为我们提供了实验上测远场发散角所应选取的 z 值范围.

可采用以下两种近似计算:

一种方法是, 选取 $z > z_r$ 的两个不同值 z_1, z_2 , 根据光斑尺寸定义, 从 $I-\rho$ 曲线中分别求出 $w(z_1), w(z_2)$, 利用公式

$$2\theta = 2 \cdot \frac{w(z_2) - w(z_1)}{z_2 - z_1}. \quad (1-10)$$

另一种方法是, 由于 z 足够大时, 全发散角为定值, 好像是从源点发出的一条直线, 所以实验上还可用一个 z 值 ($z \geq 7z_r$) 及与其对应的 $w(z)$, 通过公式

$$2\theta = 2w(z)/z \quad (1-11)$$

来计算,选择哪一个近似公式更好,要根据具体情况和误差分析而定。

下面我们讨论对高斯光束(TEM_{00} 模)的鉴定.实验上我们测出的 $I-\rho$ 光强分布曲线是否符合高斯函数型,可采用以下两种作图法证明。

方法一:取对数,使之变成线性关系.因高斯分布为

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

$I-\rho$ 是非线性关系,当取对数后,

$$\ln I = \ln I_0 - 2 \frac{\rho^2}{w^2(z)},$$

z 值已确定, $\ln I_0$ 和 $w(z)$ 是定值, $\ln I - \rho^2$ 成为线性关系.我们从实验中测出的 $I-\rho$ 曲线上任取一组数据,列表,画出 $\ln I - \rho^2$ 曲线.若是一条有一定截距、斜率为负的直线,即可证明。

方法二:标准化.高斯分布的简单形式是 $y = e^{-x^2}$, 我们现在要把 $I = I_0 \exp\left\{-2 \frac{\rho^2}{w^2(z)}\right\}$ 标准化,令 $I_0 = 1, w(z) = 1$, 得 $I' = \exp\{-2\rho'^2\}$, 这样,通过坐标变换, $I-\rho$ 曲线变成了 $I'-\rho'$ 曲线,就更接近高斯函数的标准化形式.如果后者能与 $y-x$ 曲线图很好地符合,即可证明。

比较起来,第一种方法简单,第二种方法形象、直观,也有利于误差来源分析.在我们的实验中,两种方法同时都采用了。

二、实验装置

实验装置见图 1-4, 图中各部分说明如下:

① 光源为 He-Ne 激光器. 平凹腔、 TEM_{00} 模、激光器的曲率半径 R 、腔长 L , 由实验室给出。

② 激光电源. 工作电流 $4 \sim 5 \text{ mA}$ 。

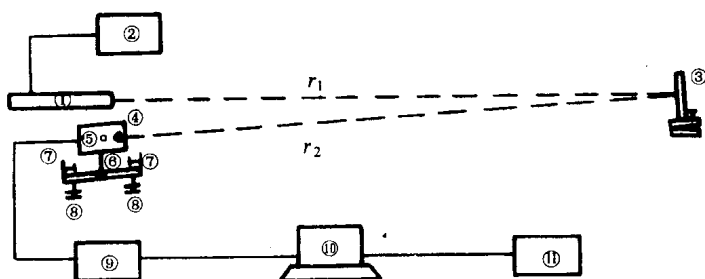


图 1-4 测量装置简图

③ 可调平面反射镜.测量距离 $z=r_1+r_2$, 是从激光束的腰到平面反射镜再到接收器内的光电池的总距离。

④ ⑤ 接收器.含有光阑小孔④,孔径为0.2mm 和光转换元件——硅光电池⑤,它紧贴在接收小孔后面。

⑥ 丝杠,螺距为 1mm,由马达旋转带动坐在丝杠上的接收器,使其在光斑横截面上作一维扫描。

⑦ 接触继电器.控制扫描正负方向,调节扫描长度,最大扫描行程为 4cm。

⑧ 可调节支架,使扫描方向水平。

⑨ 放大器.首先调零点,即调输入微机的光强值的起点和终点;然后调放大倍数,把光强值尽量放大,可以提高测量精度。

⑩ Apple II 型微机(包括主机、磁盘驱动器、显示器)。

⑪ 打印机。

这是一组以 Apple II 计算机为中心的自动测量装置.微机控制接收器在激光束传播距离为 z 的反射光斑的直径方向作一维扫描.通过输入有关数据,荧光屏自动显示出光强分布 $I-\rho$ 的实验曲线和理论曲线,然后进行比较;并给出相应的光斑尺寸和全发散角的实验值、理论值及误差;还可用作图方法一,对其是否为高斯光束进一步给予鉴定;最后由打印机打印出全部实验结果.这套装置自动化程

度和精度都比较高,比用 X - Y 记录仪画光强分布曲线的实验方法,无论从作图质量上还是数据的采集、结果的计算上都大大提高了一步.这也为同学们学习和体会微机在现代物理实验中的应用,增加了一次实践的机会.

三、实验步骤与内容

1. 光路调整

(1) 调整激光束出射方向.此方向根据实验需要和条件而定.可用同心光靶协助调整,并在远端定标监视.

(2) 测出实验要求的距离值 z_i (1.00 m, 2.00 m, 3.00 m, 4.00 m, 5.00 m, 6.00 m, 7.00 m 共 7 个点),并在各位置处作标记.

(3) 将平面反射镜放在某一 z_i 值的反射位置,调反射镜的方位和仰俯角,使光束的反射光线和入射光线保持在同一垂直面内(思考:如何操作),并将反射光线的光斑中心调到和接收小孔在同一水平高度上.

(4) 调整接收器的扫描方向和起始位置.接收器小孔在入射光束横截面直径(或椭圆形入射光截面短轴)的水平方向上扫描,并使接收器小孔的起始位置处于入射光斑左侧 2 cm 处(因扫描的最大行程是 4 cm).以上通过调接收器基座支架和移动其方位实现.

2. 电路连接

按照“实验室说明”进行电路连接.在确认全部连接正确后,再把计算机主机、显示器、打印机、放大器电源插头接入电路中.

3. 正式测量

(1) 启动.按“实验室说明”的顺序进行.

(2) 插入磁盘后,仪器自动进入程序.屏幕上显示出提示文字,

按提示依次完成以下操作:

i) 根据不同 z 处光强的变化首先调整好放大器的零点和放大倍数.零点是输入微机光强的起点和终点,可用 1~9 中任何一个个位数字来代替,这个数字因与中心光强 I_0 相比要小几个数量级,故可忽略不计.又因光斑之外光强均为 0,范围太大,故常不选用零为起点.放大倍数应尽量调大,用以提高测量精度,但又不要满挡或超出,即当扫描到光斑中心时,电压表头的指针以不超出量程为宜.这两项需经多次扫描反复调试完成.

ii) 输入激光器的有关参数:距离 z_i 值、曲率半径 R 和腔长 L 值.

iii) 正式扫描记录.得出光斑尺寸 $w(z)$ 和全发散角 2θ 的实验值、理论值及误差.若误差值不超过 10%,可继续进行后面操作,若超过,要分析原因,重新调整.

iv) 画出实验上的光强分布曲线和理论高斯曲线,它们处在同一坐标中,便于比较、分析误差来源,正确后打印出结果.

v) 画出光强分布的 $\ln I - \rho^2$ 直线,作进一步鉴定,并打印出结果.

vi) 重复 i) ~ v) 的操作内容,测出各不同 z_i 处的光强分布曲线、得出光斑尺寸、全发散角和误差.

vii) 关闭.与启动顺序相反,取出磁盘、断开电源.

4. 实验报告要求

除一般报告要求的常规内容外,在实验结果中要对以上打印出的数值部分归纳整理,列表示之;画出 $w(z) - z$ 的光斑发散图;分别对每个 $I - \rho$ 图作简要分析;总结误差来源(系统误差、偶然误差、在影响误差的诸因素中哪些是主要的);小结光路的调整方法及重要性.

思 考 题

1. 从本人实验结果中,举例说明当光强分布的实验曲线与理论曲线

不完全符合时,反映出存在的问题及应如何改进.

2. 为什么实验结果常出现正误差? 若出现了负误差又说明了什么问题.
3. 欲再提高测量精度,还可从哪几方面改进? 是否可行?

参 考 资 料

- [1] 陈天杰,激光基础,高等教育出版社,北京,1987,第二章.
- [2] 邹英华,孙驹亨,激光物理学,北京大学出版社,北京,1991,第二章.

实验二 He-Ne 激光器的模式分析

黄 显 玲

相对一般光源,激光还具有单色性好的特点.也就是说,它可以具有非常窄的谱线宽度.这样窄的谱线,并不是仅从能级受激辐射就自然形成了,而是受激辐射后又经过谐振腔等多种机制的作用和相互干涉,最后形成的一个或多个离散的、稳定的又很精细的谱线,这些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.而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,为方便每个模又可以相应称做纵模和横模.

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基横模而且要求单纵模运行的激光器.因此,进行模式分析是激光器的一项基本又重要的性能测试.

本实验是以几支具有不同模式的 He-Ne 激光器为例,从它们展示出的频谱结构入手,来分析和研究激光器不同的纵模、不同的横模所具有的场分布特征,从而得出纵模个数、纵模频率间隔、横模个数、横模频率间隔、横模模序等结果.

本实验的目的:

- (1) 了解激光器模的形成及特点,加深对其物理概念的理解.
- (2) 通过测试分析,掌握模式分析的基本方法.
- (3) 对本实验使用的重要分光仪器——共焦球面扫描干涉仪,了解其原理、性能,学会正确使用.