

# He-Ne 激光器纵横模频率特性的实验测量

陈 钢, 魏高尧

(浙江工业大学 物理实验中心, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**利用开腔 He-Ne 激光器开展了多纵模及复杂横模的频率特性的实验测量,从扫描干涉仪给出的纵模频谱,可以清晰地认识纵模的物理概念及纵模的变化情况。结合激光光斑图样和频谱,对标准的横模进行精确的鉴别。而对于较复杂的混合模,提出了一种简单可行的分辨方法,计算机模拟和实验结果一致。该研究方法和结论对激光原理及相关课程的理论和实验教学具有一定参考价值。

**关键词:**激光原理; 激光模式; 频率间隔; 扫描干涉仪

**中图分类号:** O 4-33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-7167(2010)06-0033-04

## Measurement of the Frequency Characteristics of Longitudinal and Transverse Modes in He-Ne Lasers

CHEN Gang, WEI Gao-yao

(Physics Experimental Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In order to realize the abstract concept of the longitudinal and transverse laser modes, and carry out the courses and experiment efficiently, the measurement study of the frequency characteristics of the multi-longitudinal and complex transverse modes was investigated in an open cavity He-Ne lasers. From the spectrum of longitudinal modes obtained by the scanning interferometer, the concept and variation of the longitudinal modes can be realized clearly. With the laser spot pattern and spectrum, the standard transverse modes can be distinguished accurately. While for the complex mixing modes, a simple and feasible method was proposed. The computational simulation results agree well with the experiments. The study methods and corresponding conclusions are of great benefit to the teaching of theoretical and experimental courses in the principle of lasers.

**Key words:** principle of lasers; laser modes; frequency spacing; scanning interferometer

### 1 引言

“激光原理”及其相关课程是电子、信息、光学、物理等专业的高年级本科生和研究生课程,该课程理论性强、内容抽象,仅靠课堂教学很难达到预期的教学效果。激光原理实验是“激光原理”教学的重要组成部分,是学生真正认识激光器、理解激光理论的重要途径。在激光原理的教学中,激光器的纵模、横模概念比

较抽象,学生不易理解和掌握。如果能借助一些生动的教学课件或实验测量结果来介绍这些概念,无疑能加深对抽象概念的理解<sup>[1]</sup>。同时,如果能够开展相关实验,对学生认识抽象概念将具有非常大的帮助<sup>[2-3]</sup>。

激光器的纵模、横模特性是激光器非常重要的指标,在激光应用领域,已有大量文献开展了激光模式的测量与控制研究<sup>[4-7]</sup>。这些研究成果尽管也可以在激光原理的教学中开拓学生的视野,增加学习的兴趣,但对于学生要掌握的基本理论,并不具有非常直接的作用。然而,面向激光原理教学方面的有关详细研究相对较少,所见的报道重点都在讨论教学模式<sup>[8-9]</sup>,而真正可以参考的教学资源和素材非常缺乏。本文利用扫描干涉仪测量了开腔 He-Ne 激光器的频谱分布,给出了不同纵模、横模之间的频率间隔,从而加深对纵、横

收稿日期:2009-09-02

基金项目:浙江工业大学研究生教改项目(2008008);浙江工业大学校教改基金项目(E109001915)

作者简介:陈 钢(1975-),男,陕西西安人,副研究员,主要从事激光物理、激光动力学研究。

Tel.:0571-85290310;E-mail:gangchen@zjut.edu.cn

模等抽象概念的认识,同时给出了一些横模分布图样,为更好地理解纵、横模的概念,有效地开展激光原理及相关课程的理论和实验教学提供帮助。

## 2 实验原理

由谐振腔理论可知,在腔内来回反射的光束形成驻波,其频率须满足谐振条件<sup>[10]</sup>,

$$v_q = \frac{c}{2\eta L}q, \quad q = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $c$ 是真空光速; $\eta$ 是激活介质的折射率; $L$ 是谐振腔长; $q$ 为纵模序数。由于激光的频率很高,一般仪器不能直接测量,因此通常用相邻2个谐振频率的间隔,即纵模间距 $\Delta v$ 表示其频率特性,由式(1)可得

$$\Delta v_q = v_{q+1} - v_q = \frac{c}{2\eta L} \quad (2)$$

激光器中最终能够振荡的频率,即能够出现的纵模数由以下几个因素决定:①谱线的荧光光谱线宽,谱线展宽越大,可能出现的纵模数越多;②激光器谐振腔长度,腔长越长,纵模间隔越小,同样的谱线宽度内可以容纳的纵模数越多;③最重要的,即满足谐振条件,同时增益大于损耗的那些频率,才能形成持续稳定振荡,获得激光输出<sup>[10]</sup>。

当激光器以一个或多个纵模振荡时,每个纵模内部还会表现出不同的横模特性。不同横模也对应不同的频率,横模序数越大,频率越高,通常用 $TEM_{mn}$ 来表示激光模式。每一组 $m, n$ 表示一个光场的横向分布,称为一种横模。 $m, n$ 取值不同,代表不同的横模,其频率间隔经推导得<sup>[10]</sup>

$$\Delta v_{m+n} = \frac{c}{2\eta L} \left\{ \frac{m+n}{\pi} \arccos \left[ \left( 1 - \frac{L}{R_1} \right) \left( 1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

式中: $m, n$ 分别表示 $x, y$ 方向上横模阶数; $R_1, R_2$ 为谐振腔两反射镜的曲率半径。

激光器最终形成的振荡模式,除了上述因素外,还与放电管的粗细、内部损耗等因素有关。一般说来,放电管直径越大,可能出现的横模阶数越大,横模个数越多。但是横模阶数越大,其衍射损耗越大,形成稳定振荡也就越困难,所以小功率激光器往往工作在低阶横模,只有在大功率激光器中才存在很高阶的横模。

## 3 实验装置

实验用一台开腔、可调整的 He-Ne 激光器,谐振腔的长度可以精确地调节,从而可以调节出所需的纵模个数。横模的产生通过微调出射平面镜来产生不同的横模,横模光斑图样的测量通过一个短焦透镜扩束,成像在白纸上,再利用数码相机拍摄。激光纵横模的频谱通过一台共焦球面扫描干涉仪来进行测量,其自

由光谱区(FSR)为 1.83 GHz。实验装置的布置如图 1 所示,激光器出来的光束通过小孔光阑进入干涉仪,干涉仪在锯齿波电压的驱动下进行线性扫描,不同频率的光波在不同的电压下产生相干极大而输出,光信号通过光电二极管接收进入示波器 Y 通道, X 通道为扫描电压信号。这样在示波器上显示出 X-Y 扫描的稳定李萨如图形,即纵横模的频谱图。用数码相机拍摄下示波器上稳定的频谱图,利用计算机进行定量的分析计算,如果具备数字存储式示波器,该过程会方便许多。

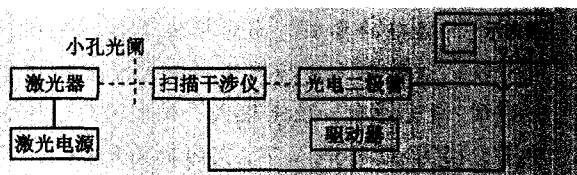


图1 实验装置图

## 4 实验结果

### 4.1 纵模

He-Ne 激光器的荧光光谱线宽约为 1.5 GHz<sup>[2]</sup>,按照式(2)计算,对稀薄气体, $\eta$ 近似为 1,所以当腔长 $L = 10$  cm 时,恰好可以有一个纵模振荡,并且腔长每增加 10 cm,纵模数增加一个。实验中腔长的改变从最短的 $L = 43.5$  cm 增加到 $L = 82$  cm,测量了纵模数从 4 个增加到 8 个的过程,通过实验测量其相应的纵模间隔,和理论值进行比较。同时,通过微调出光平面镜,改变损耗大小,还可以对同一腔长下的纵模数进行控制。前面已经提到,只有满足振荡条件同时增益大于损耗的模式才能形成稳定振荡,这个实验也正好可以说明这一点。由于实验数据较多,这里仅给出腔长为 73.5 cm 时的纵模频谱图。在腔长为 73.5 cm 时,理论上可以存在 7 个纵模,实验中我们得到了该腔长下 1~7 个纵模的频率图,即纵模的个数可以很方便地进行控制,由于要比较其纵模的间隔,所以下面仅给出纵模数为 2~7 个的实验结果,如图 2 所示。

实验数据的处理过程如下,将数码相机拍摄下的频谱图进行数据处理。由于频谱图的横坐标是相对值,实际计算时可以用图片中的像素坐标进行比较。首先确定自由光谱区的长度,即从频谱图中找出 2 个纵模序列 $q$ 序和 $q+1$ 序中所对应的 2 个峰值的横坐标差值 $\Delta x$ ,然后分别比较 2 个序列中相邻峰值横坐标的差值,取其平均值为 $\Delta x_i$ ,则纵模间隔可计算如下

$$\Delta v_q = \text{FSR} / \Delta x \cdot \Delta x_i \quad (4)$$

从图 2 可以看出, $q+1$ 序中相邻峰值的宽度比 $q$ 序中稍微大些,这主要是因为所用的扫描干涉仪的压电陶瓷材料的线性伸缩存在误差,因此,分析数据时取 2 个序列的平均值来减小这些误差。

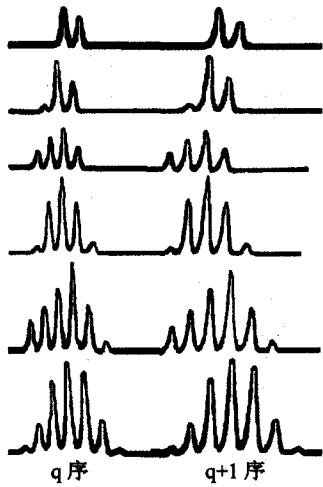


图2 示波器观测到的激光纵模频谱图

对图2中2~7个纵模的实验数据进行分析,结果和理论值进行了比较,如表1所示。可以看出,无论激光器形成的是几个纵模,其纵模间隔都基本不变,这也表明纵模间隔主要是由谐振腔的长度决定的,而纵模个数要考虑增益和损耗两方面因素。同时,还可以看出,实验值均比理论值偏小一些,这主要来自图片中线条比较粗,确定峰值位置时会有误差。

表1 腔长73.5 cm时纵模间隔的实验测量与理论值比较

	纵模个数					
	2	3	4	5	6	7
理论值/GHz	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
实验值/GHz	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17

### 4.2 横 模

实验上要观测到不同的横模,可以在谐振腔长度增加到较大时,适当微调出光平面镜来获得。此时谐振腔内的激活体积较大,增益较高,有利于高阶横模的振荡,横模频率间隔的测量同纵模频率间隔的测量一样。由式(3)可看出,不同  $m+n$  的横模对应不同的频率间隔,但横模阶数  $m$  和  $n$  无法从频谱图上确定,因为频谱图上只能看到有几个不同的  $m+n$ 。所以仅靠频谱图还是无法区分各个横模,要确定  $m$  和  $n$  各是多少,还需结合激光器输出的光斑图样进行判断。

对单一模式的横模分布,通过观测其横模分布特点,对照标准的横模分布,很容易确定  $m, n$  的数值,可以肯定这种光强分布属于那个模式,同时借助频谱图给出的频率间隔再加以确认。由于横模的出现是通过调节平面输出镜获得的,圆对称已经破坏,所以观测到的横模分布需要用方形镜给出的厄米-高斯分布描述。图3是实验中观测到的一种横模分布,其分布是一种单一模式,图中颜色越深代表强度越大。对照标准的厄米-高斯分布,光斑在  $X$  方向有一条节线,可以判断其为  $TEM_{10}$  模。结合图4给出的频谱图,以及表2计

算得出横模间隔为  $m+n=1$  时的频率间隔,从而确定为  $TEM_{10}$  模。

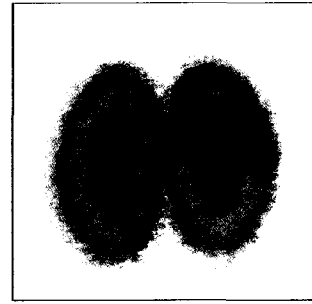


图3  $TEM_{10}$  模光斑图样

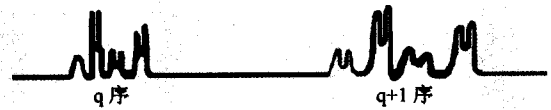


图4  $TEM_{(m+n=1)}$  的频谱图

表2 腔长73.5 cm时横模间隔理论值与实验值比较

$TEM_{10}$ 模	理论值/GHz	实验值/GHz
纵模间隔	0.204	0.209
横模间隔	0.067	0.070

对于多个横模叠加而形成的混合模<sup>[4,7]</sup>,仅从光斑图样上还不能确定具体是那几种横模的叠加,必须借助频谱图来加以分析。图5为实验中观测到的一种混合模,光斑呈椭圆形,中心有2个没有能量的白色区域。该模式与单一的标准横模分布不能对应,因此,可以肯定是几个单一模式叠加而成的混合模,称其为“8”字形模式。

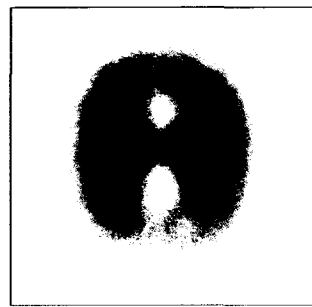


图5 实验观测到的混合模的光斑图样

图6是示波器上观测到的频谱分布,由图可见,谐振腔内形成了3个纵模,从左至右,频率最低的纵模为单一峰,频率较高的纵模分裂成2个峰,而频率最高的纵模分裂成3个峰。在右边的频谱中,经频率间隔计算,中间的2个峰对应  $m+n=1$  的横模频率间隔,最右边的3个峰中包含了  $m+n=1$  和  $m+n=2$  两种频率间隔,具体计算结果如表3所示。所以可以判断这个光斑模式中包含了  $TEM_{00}$ 、 $TEM_{m+n=1}$  模,以及  $TEM_{m+n=2}$  模。由此可以得到结论,作为判断横模阶数的简单依据,如果纵模不分裂,则输出光斑为基模

TEM<sub>00</sub>模;如果纵模分裂为2个,则为TEM<sub>m+n=1</sub>模,具体是TEM<sub>10</sub>还是TEM<sub>01</sub>可以很容易地从光斑图样上进行区分;如果纵模分裂为3个,则包含TEM<sub>00</sub>模、TEM<sub>m+n=1</sub>模和TEM<sub>m+n=2</sub>模。

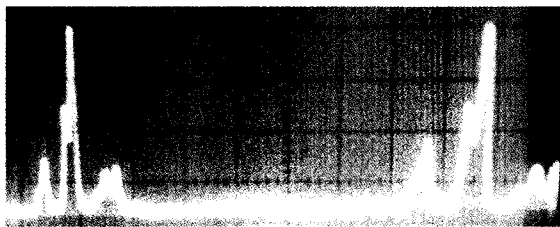


图6 混合模的频谱图

表3 多横模时横模间隔理论值与实验值比较

	理论值/GHz	实验值/GHz
纵模间隔	$\Delta\nu = 0.204$	$\Delta\nu = 0.205$
横模间隔	$\Delta\nu_{m+n=1} = 0.067$	$\Delta\nu_{m+n=1} = 0.069$
	$\Delta\nu_{m+n=2} = 0.134$	$\Delta\nu_{m+n=2} = 0.136$

多种模式叠加后,光斑图样显示出奇特的分布,要区分出高阶模到底是那种组合,就比较困难。对于TEM<sub>m+n=2</sub>要确定具体的 $m$ 和 $n$ 值,仅依靠频谱图是不够的,同样依靠光斑图样也是不行的,必须两者结合,再加上一些单一模式的简单叠加来确定<sup>[6]</sup>。从频谱图上已经知道模式中含有TEM<sub>(m+n=2)</sub>的模式,可能的 $m$ 、 $n$ 值组合可以是 $(m=1, n=1)$ ,  $(m=0, n=2)$ , 以及 $(m=2, n=0)$ 这3种组合。结合单一模式时TEM<sub>11</sub>、TEM<sub>02</sub>、TEM<sub>20</sub>的光斑图样,让这3种不同模式与TEM<sub>00</sub>、TEM<sub>10</sub>模式进行叠加,然后比较叠加后的图样和实验所拍摄图样。图7是计算机模拟TEM<sub>02</sub>模和

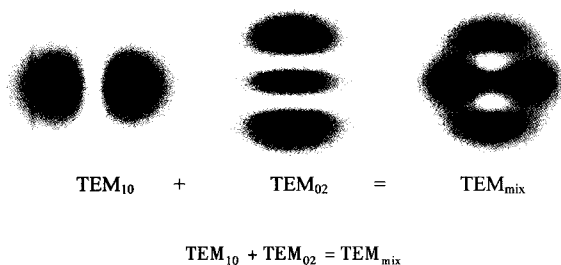


图7 模拟计算得到的混合模的叠加过程

TEM<sub>10</sub>模叠加的结果,其中TEM<sub>10</sub>模和TEM<sub>02</sub>模的强度取做一样,可以看出,模拟结果和实验观测非常符合。而TEM<sub>00</sub>模由于是中心亮斑,强度较弱,不影响叠加后的分布。因此可以确定混合模是TEM<sub>00</sub>、TEM<sub>10</sub>和TEM<sub>02</sub>模的叠加。

## 5 结 语

针对激光原理中较抽象的纵模、横模概念,利用开腔He-Ne激光器从实验上开展了多纵模和复杂横模的频率特性的测量研究。利用扫描干涉仪给出的纵横模的频谱图,可以清晰地认识激光器中不同纵模的变化情况。结合激光横模光斑图样和频率图,可以对标准的横模进行精确的鉴别。而对于较为复杂的混合模,提出了一种简单可行的分辨方法,通过计算机模拟得到了和实验结果一致的结论。该研究方法和结论对本科生及研究生激光原理及相关课程的理论和实验教学提供了一定参考。

## 参考文献 (References):

- [1] 田来科,田东涛,董庆彦. 激光原理 MCAI 的架构与创意设计[J]. 量子电子学报,2003,20(2): 253-256.
- [2] 卢炳嵩. 激光器模式分析实验教学探讨[J]. 阜阳师范学院学报,1996,29(3): 89-91.
- [3] 张春平,张光寅. 多横模内腔 He-Ne 激光器的特殊偏振现象[J]. 物理学报,1982,31(11): 1541-1546.
- [4] 王智勇,陈涛,贺平,等. 大功率 CO<sub>2</sub> 混合模激光束传输参数的精确测量[J]. 中国激光,2000,27(12): 1075-1079.
- [5] 程成,马行超,许周速,等. 高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光横模随时间变化的测量[J]. 中国激光,2008,35(4): 549-554.
- [6] 陈虹,吴世凯,张正伟,等. 高功率激光束特性对激光加工的影响[J]. 光学技术,2006,32(6): 834-837.
- [7] 杨杰,刘焰发,姚建华. 混合模激光的模式拟合[J]. 光电工程,2002,27(5): 44-46.
- [8] 于文兵. 激光原理与技术课程中开展研究性学习的探索[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版),2008,28(3): 116-118.
- [9] 居桂方. 激光原理实验教学改革的探索与实践[J]. 广东工业大学学报(社会科学版),2005,5(9): 140-141.
- [10] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M]. 5版. 北京:国防工业出版社,2005:26-27,166.

## · 知识园地 ·

## 摘 要

摘要又称概要、内容提要,它是对论文内容不加评论和补充解释、简明、确切地陈述与概括。是整篇文章的重要组成部分,能让读者迅速总揽论文内容,是各种数据库中常见的检索对象。本刊采用报道性文摘,其基本要素包括研究目的、方法、结果和结论4部分。有时也包括具有情报价值的其它重要信息。摘要应具有独立性和自明性,并且拥有与论文同等量的主要信息,即不阅读全文,就能获得必要的信息。摘要文字要简明、内容要完整、具体。一般宜300~400字,英文摘要不宜超过250个单词。

(本刊编辑部)