

氦氖激光的模式分析

指导老师:白翠琴

摘要：本实验使用共焦球面干涉仪测量氦氖激光模式，根据共焦球面干涉仪原理以及仪器所测数据，运用 Matlab 软件对实验图像进行拟合重现。借用拟合图形进行模式，共焦球面干涉仪参数等分析。

关键词：激光 氦氖激光器 共焦球面干涉仪 模式

一. 实验原理:

1. 激光模式的一般分析

由光学谐振腔理论可以知道，稳定腔的输出频率特性为：

$$\nu_{mq} = \frac{C}{2\eta L} \left[q + \frac{1}{\pi} (m+n+1) \cos^{-1} \right]$$

$$\left[\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \right]^{1/2}$$

其中：L—谐振腔长度；

R_1 、 R_2 —两球面反射镜的曲率半径；

q—纵模序数；

m、n—横模序数；

η —腔内介质的折射率。【1】

横模不同 (m、n 不同)，对应不同的横向光场分布（垂直于光轴方向），即有不同的光斑花样。正因为如此，人们常用目测方法判断激光器的横模结构，这对于简单且规范的横模花样较方便，但对于复杂的横模，目测则很困难。精确的方法是借助于仪器测量，本实验就是利用共焦球面扫描干涉仪来分析激光器输出的横模结构。

由上式看出，对于同一纵模序数，不同横模之间的频差为：

$$\Delta\nu_{mn,m'n'} = \frac{C}{2\eta L \pi} (\Delta m + \Delta n)$$

$$\cos^{-1} \left[\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \right]^{1/2}$$

其中： $\Delta m = m - m'$ ； $\Delta n = n - n'$

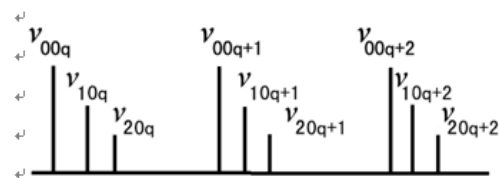
对于相同的横模，不同纵模间的频差为

$$\Delta\nu_{q,q'} = \frac{C}{2\eta L} \Delta q$$

其中： $\Delta q = q - q'$ ，相邻两纵模的频差为

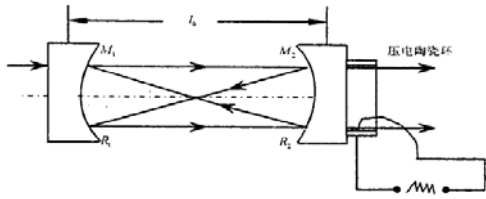
$$\Delta\nu_q = \frac{C}{2\eta L}$$

由 (2)、(3) 式看出，稳定球面腔有如下图的频谱。



2. 共焦球面扫描干涉仪的基本工作原理

共焦球面扫描干涉仪是由两块镀有高



反射率膜层的球面镜组成的,其曲率半径 R_1 、 R_2 和腔长 l_0 满足关系式 $R_1=R_2=l_0$,因而它们的近轴焦点相重合,构成一共焦系统,其结构如图所示。图中镜 M_1 固定不动,镜 M_2 装在压电陶瓷环的一个自由端面上。如果在压电陶瓷上加以一定幅度的锯齿波电压,可使腔长 l 在 l_0 附近作微小振动, l 的变化幅度为半波长数量级。设有某一近轴光线沿平行于轴线的方向射入干涉仪,光线在腔内来回反射,经四次反射后将与原入射光线重合。显然,当它们的光程差为波长 λ 的整数倍时,该干涉仪对入射光有最大透过率。利用压电陶瓷进行腔长扫描就可以实现频率扫描。当我们用压电陶瓷带动反射镜 M_2 使之沿轴向作微小周期性振动时,就能使入射的各个激光模式满足上述条件而依次透过干涉仪。如果用光电接受器接受透射光的光强,并将接受器的输出送到示波器的y输入端,同时将压电陶瓷的驱动电压信号(一般为锯齿形)加到示波器的x输入端,则示波器屏上的横向位移大致正比透射光的频率变化,在荧光屏上就可以看到透射过干涉仪的激光各个模所构成的频谱。【2】

输入光强与输出光强满足这样的关系:

$$I_1 = I_0 \left(\frac{T}{1-R^2} \right) \left[1 + \left(\frac{2R}{1-R^2} \right)^2 \sin^2 \beta \right]^{-1} \quad (1)$$

上式中, I_1 为输出光强, I_0 为输入光强, R 为凹面反射

镜曲率半径, β 为往返一次形成的位相差。 T 为透射率。

3. 实验仪器数据

氦氖激光器:

谐振腔曲率半径	1m
中心波长	632.8nm
谐振腔长度	0.31m

共焦球面扫描干涉仪:

腔长	20mm
凹面反射镜曲率半径	20mm
凹面反射镜发射率	99%
精细常数	>100

二. 实验结果:



上图即是示波器上显示的大概图形
从示波器上读出:

	两峰之间间隔 (div)	M (us)
1-1'	4.2	250
1-2	0.8	50
1-4	2.15	50
1-3	2.9	50

1. 理论值的纵模频率差 ($\Delta q=1$):

$$\Delta \nu_{\Delta q=1} = \frac{C}{2\eta L} = 4.83 \times 10^8 \text{ Hz}$$

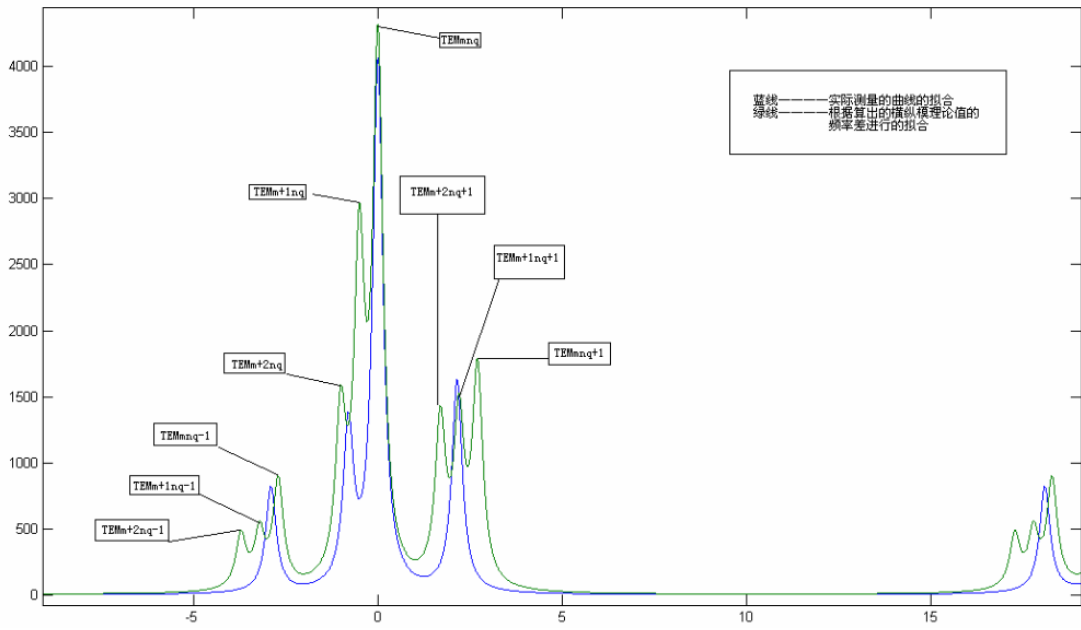
2. 理论值的横模频率差 ($\Delta m + \Delta n=1$):

$$\Delta \nu_{\Delta m + \Delta n=1} = \frac{C}{2\eta L} \left[\frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right] \right]^{1/2} = 0.9 \times 10^8 \text{ Hz}$$

3. 共交球面扫描干涉仪自由光谱范围:

$$\Delta \nu' = \frac{C}{2\eta L'} = 3.75 \times 10^9 \text{ Hz}$$

4. 根据实验数据,运用Matlab复原实验所测图形【3】。再根据理论所得的单位横模,纵模的频率差,进行理论值的拟合,拟合图像如下:



如上图所示，蓝线即为实际测量曲线的拟合，绿线为理论值进行的拟合，两条线基本上重合。上式中， $m=0, n=0$ 。

三. 实验分析

1. 关于实验拟合的说明：

1>根据公式一可知， $\beta = 4 \eta L \pi / \lambda$ 。当 $\beta = k\pi$ 时，也就是 $4 \eta L = k \pi$ 时，透射率极大，在示波器上表现为一个波峰。其实也就是将空间坐标变换成了频率坐标。当横坐标 X 变化的时候，也就对应了压电陶瓷的微下位移 Δx ；而这个微小位移正好也就对应于每一次相干叠加的光程差 Δ ，也就是对应于频率 ν 。

所以也可以确定根据坐标转换关系在频谱上基本符合

$$I_1 = I' [1 + (\frac{2R}{1-R^2})^2 \sin^2 4\eta L \pi \nu / c]^{-1}$$

这个关系。

所以可以将实验结果根据上式进行拟合（这里重要的是分析频率的关系，也就是实验图形中的横坐标，至于纵坐标就根据实验中所记录的图形适当取之）。

2>. 因为自由光谱范围已知，为 $3.75 \times 10^9 \text{Hz}$ 。其在实验图中表示的意义即为 $1-1'$ 之间的频差。根据实验所测得的 1, 2, 3, 4

峰之间的间隔与自由光谱范围的间隔之比，就是上述 1, 2, 3, 4 峰之间的实际测量频率差异，在拟合图像中表现为横坐标之差的比值。实验所测得的频率为：

ν_{12}	$1.42 \times 10^9 \text{Hz}$
ν_{13}	$5.17 \times 10^9 \text{Hz}$
ν_{14}	$3.83 \times 10^9 \text{Hz}$

3>实验过程中肯定会存在很多的误差，但是对于这种定性地分析模式来说。图形表示比起数值，误差更为直观。

2. 根据实验值与理论值的对比可以很清楚得看出

当纵模为 $q-1$ 时，由于电子噪声干扰以及仪器本身分辨率的影响， TEM_{20q-1} 基本上已经看不到了，而由于 TEM_{10q-1} 的影响实际所测的峰值与 TEM_{00q-1} 基本重合，但稍微偏向于 TEM_{10q-1} 。

当纵模为 q 时，由图形可以明确看出，由于 TEM_{00q} 与 TEM_{10q} 的峰值都比较大，线宽影响都比较大，所以基本上 TEM_{10q} 在 TEM_{00q} 的内部。而实验时所测得的峰为 TEM_{20q} 。

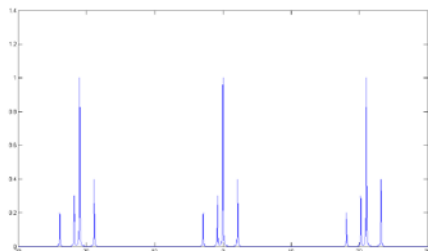
当纵模为 $q+1$ 时，三个峰值都比较靠近，可能是因为仪器分辨率或者在观察时没有察觉峰值上的分岔而导致的只出现了一个峰。

以上所提的三点都存在是否符合瑞利判据的条件 [4]，在 TEM_{q-1} 和 TEM_{q+1} 也有可能

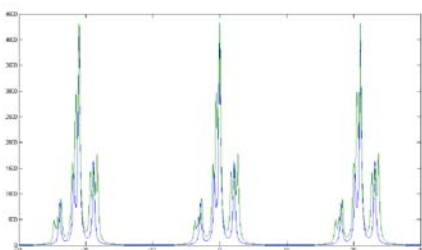
是因为其叠加的总光强分布曲线中其最小值大于最大值的 $8/\pi^2$,所以干涉仪无法分辨。

3. 通过从理论上改变R值, 观察对于实验结果的影响:

按照仪器要求取R=99%带入实验拟合公式, 得出图形如下



取值R=95%带入拟合公式得图如下:

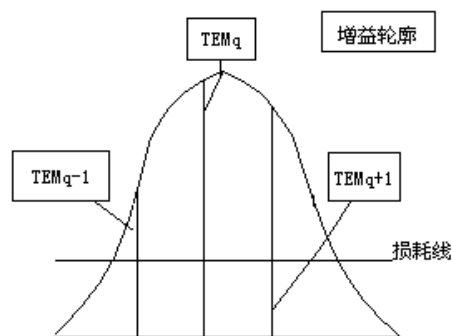


从上面两张图可以明显地看出, 当R越大, 图形越趋向于 δ 函数。R越小, 波形的展宽越大。原因是当反射率R越小时, 投射出来的光线就越多, 也就对其除了满足相干叠加频率的其他频率的部分光强变强。继而使得频谱谱线加宽。继而可以判断, 实验中所用共焦球面干涉仪反射率应该不到99%。

4. 不仅R对测得谱线的带宽有所影响, 而且激光本身的加宽也对其有所影响。对于氦氖激光器, 主要的加宽方式为自然加宽, 碰撞加宽以及多普勒加宽, 前两种均匀加宽, 后一种为非均匀加宽。

5. 由于在增益介质【5】对于入射光场进行放大作用时存在增益轮廓, 分别为洛伦兹线型以及高斯线性。但不管对于那种线性都存在对于中央部分的光放大比周围区域放大得多, 如下图所示:

所以也就解释了为什么实验所得的谱线峰值1>峰值4>峰值3



四. 实验总结:

本实验通过Matlab软件进行实验记录的模拟重现, 不仅使得实验更加丰富和形象, 更加大了我对于氦氖激光器以及共焦球面干涉仪更为深刻的理解。

参考文献:

- 【1】 伍长征 王兆永 陈凌冰 赵衍盛 1989年09月第1版激光物理学 125页
- 【2】 宋根宗 杨玉玲 张 多 小功率He-Ne激光管模式的研究 大学物理实验 第19卷 第4 期
- 【3】 罗成汉, 刘小山 曲线拟合的Matlab 实现 文章编号: 1004- 373X (2003) 20-016-02
- 【4】 李富铭 刘一先 光学测量 1986年08月第1版 94页
- 【5】 伍长征 王兆永 陈凌冰 赵衍盛 1989年09月第1版激光物理学 129页