

# He-Ne 激光器的模式分析报告

(实验日期:)

激光是在受激辐射以后，经过谐振腔的作用产生的。其中形成一个或多个离散的模，从不同方向观察，每个模又可以相应的称为纵模和横模。激光生产与应用中，我们需要知道激光器的模式状况，进行模式分析。本实验中我们分析和研究 He-Ne 激光器不同横纵模的场分布特征，纵横模个数，频率间隔，对应模序等结果。

**关键词:** He-Ne 激光器，模式分析

## I. 引言

氦-氖激光器是最早出现也是最为常见的气体激光器之一。它于 1961 年由在美国贝尔实验室从事研究工作的伊朗籍学者佳万 (Javan) 博士及其同事们发明，工作物质为氦、氖两种气体按一定比例的混合物。根据工作条件的不同，可以输出 5 种不同波长的激光，而最常用的则是波长为 632.8 纳米的红光。气体激光器利用气体作为工作物质产生激光的器件。它由放电管内的激活气体、一对反射镜构成的谐振腔和激励源等三个主要部分组成。主要激励方式有电激励、气动激励、光激励和化学激励等。其中电激励方式最常用。在适当放电条件下，利用电子碰撞激发和能量转移激发等，气体粒子有选择性地被激发到某高能级上，从而形成与某低能级间的粒子数反转，产生受激发射跃迁。激光器的模式是激光器光学谐振腔中稳定的光场分布方式。光场在光腔的三个方向上必须满足谐振条件，即形成驻波分布。模式控制是激光器研究的主要课题之一。本实验通过使用共焦球面扫描干涉仪使我们掌握模式分析的方法。了解激光模形成与特点，加深概念理解。

## II. 理论

### 1. TEM 模式理论

激光器三个组成部分分别是：增益介质、谐振腔、激励能源。介质经过粒子数反转辐射出一定频率的光波，由于能级有一定宽度，经过谐振腔之后存在自然展宽，碰撞展宽，多普勒展宽等多种展宽，本实验以多普勒展宽为主。其中满足

$$2\mu L = q\lambda_q$$

的光会获得增强，其他的光相互抵消。其中  $\mu$  是折射率，L 是腔长，q 为纵模序数，为整数。我们关心的是相邻两个纵模的频率间隔

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} = \frac{c}{2\mu L} \approx \frac{c}{2L}$$

\*

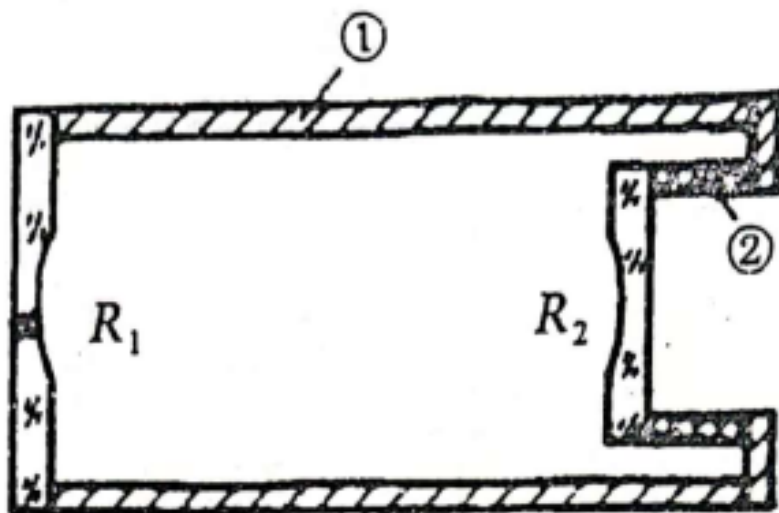


图 1. 共焦球面扫描干涉仪

可以看出缩短腔长是一种获得单纵模的办法。

谐振腔对波在横向也有些影响，在纵模的横向波腹处形成稳定的衍射光斑，一种光斑称为一种横模。一个模由三个量子数表示，写作  $TEM_{mnq}$  是纵模标记， $m, n$  分别是  $x, y$  方向的横模标记，常见的横模有： $TEM_{00}, TEM_{10}, TEM_{01}, TEM_{20}, TEM_{02}, TEM_{11}$  等。

横模和纵模间频率差公式为

$$\Delta\nu_{\Delta m + \Delta n} = \frac{c}{2\mu L} \left\{ \frac{1}{\pi} (\Delta m + \Delta n) \arccos [(1 - L/R_1)(1 - L/R_2)]^{1/2} \right\}$$

$R_1, R_2$  为谐振腔两个反射镜的曲率半径，当  $\Delta m + \Delta n = 1$  时相邻横模频率间隔为

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} \left\{ \frac{1}{\pi} \arccos [(1 - L/R_1)(1 - L/R_2)]^{1/2} \right\}$$

一般来说，放电管直径越大，可能出现的横模数越多，序数越大的横模衍射损耗越大，形成越困难。但不能仅从光强判断横模，应从频率，光斑形状确定。

2. 共焦球面扫描干涉仪 共焦球面扫描干涉仪是一种分辨率很高的分光仪器，将彼此频率差异甚小 (几十至几百 MHz)，用眼睛和一般光谱仪器不能分辨的，所有纵模、横模展现成频谱图来进行观测的。共焦球面扫描干涉仪是一个无源谐振腔。由两块球形凹面反射镜构成共焦腔，即两块镜的曲率半径和腔长相等， $R_1=R_2=L$ 。反射镜镀有高反射膜。两块镜中的一块是固定不变的，另一块固定在可随外加电压而变化的压电陶瓷环上。如图1所示，图中，1 为低膨胀系数制成的间隔圈，用以保持两球形凹面反射镜  $R_1$  和  $R_2$  总是处在共焦状态。2 为压电陶瓷环，其特性是若在环的内外壁上加一定数值的电压，环的长度将随之发生变化，而且长度的变化量与外加电压的幅度成线性关系，这正是扫描干涉仪被用来扫描的基本条件。由于长度的变化量很小，仅为波长数量级，它不足以改变腔的共焦状态。但是当线性关系不好时，会给测量带来一定的误差。扫描干涉仪有两个重要的性能参数，即自由光谱范围和精细常数。

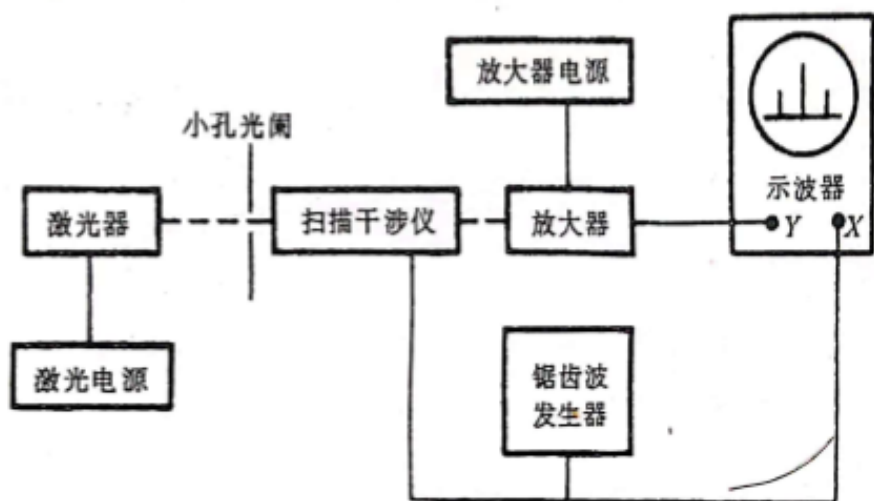


图 2. 实验装置示意图

利用干涉原理，经过简单分析，自由光谱范围就是干涉仪所能扫出的不重序的最大波长差，表达式为  $\Delta\lambda_{SR} = \lambda^2/4L$ ，其必须大于激光频率范围，才能扫出不重复的干涉序。

精细常数为自由光谱范围内能分辨的最多谱线数目，定义为

$$F = \frac{\Delta\lambda_{SR}}{\delta\lambda}$$

$\delta\lambda$  是能分辨的最小波长差，我们可以用半宽代替。

### III. 实验装置

实验装置如图2所示，有四只需要分析模式的激光器，光阑将光束进行准直作用，扫描干涉仪自由光谱范围在 1500-2000MHz，接收放大器将扫描干涉仪输出的光信号转变为电信号传输到 y 轴。锯齿波发生器电压峰值在 0 150V 内连续可调，周期用 20ms，锯齿波电压除了加在扫描干涉仪的压电陶瓷上，同时输到示波器 X 轴上作同步扫描。为便于观察，希望能移动序的中心波长在频谱图中的位置，比如使每个序中所有模能完整地展现在示波器上，这可通过增设一个直流偏置电源，用以改变对腔扫描的电压的起点，协助调节。

### IV. 实验结果及结论

在实验中，当我们增大锯齿波输出电压的幅值，示波器上干涉序增多，图像延 x 轴方向压缩。根据干涉序的周期性，数出周期为 7.1 格，我们已知干涉仪的自由光谱范围是 1800MHz，由于本实验激光器是多普勒线形，所以在多普勒线性包络内的单个周期内的一系列谱线属于同一 k 序。

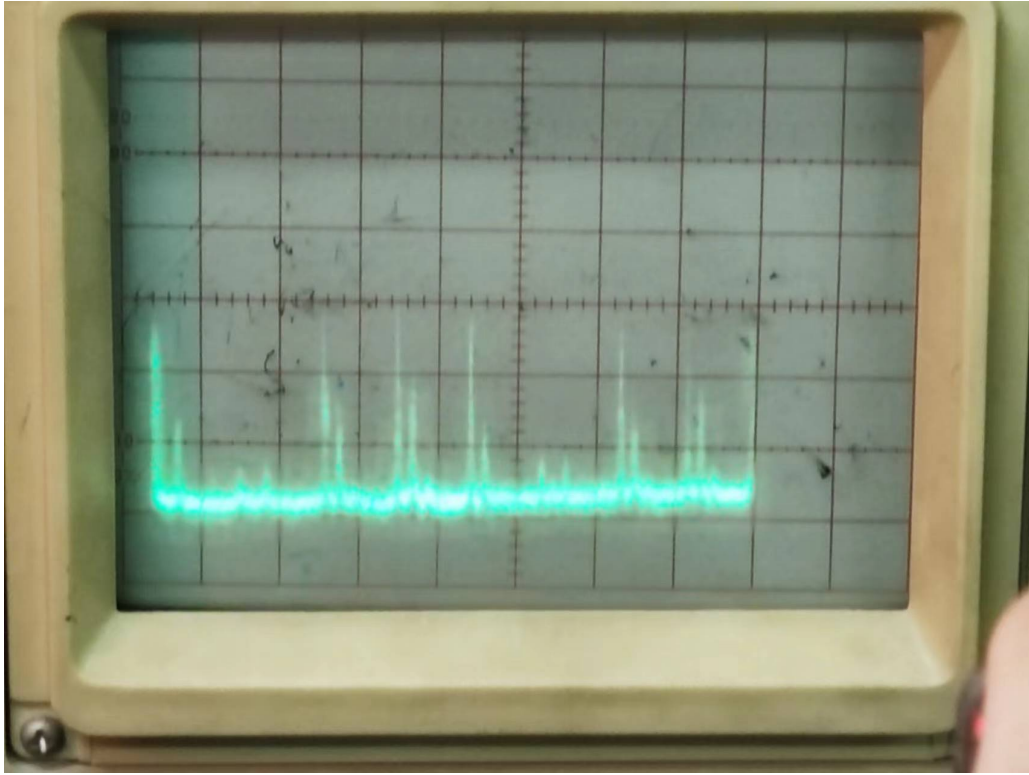


图 3. 示波器波形图

每格代表的频率间隔值为

$$1800MHz/7.1 = 253.52MHz$$

同一干涉序内有 4 个纵模，如图3所示，相距大概 1.8 格所以

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} = 1.8 * 253.52MHz = 456.3MHz$$

根据理论计算的公式

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} = \frac{c}{2\mu L} \approx \frac{c}{2L} = 439.6MHz$$

如图知同一纵模有三个横模，在示波器横向偏压为 1V 时横模间距 3.6 格，所以横模间隔为

$$3.6/10 * 253.52Hz = 91.3MHz$$

理论值为

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} \left\{ \frac{1}{\pi} \arccos [(1 - L/R_1)(1 - L/R_2)]^{1/2} \right\} = 87.3MHz$$

对应  $\Delta m + \Delta n = 0, 1, 2$ ，分别对应 00 模，01 和 10 模，11 模，判断方法是：因为只有两种可能，只能是最右边或最左边的是基横模，高阶横模向另一边延申，光强递减，因为书上说高阶横模难以存在，从图上看应该是向右侧是频率增高方向，对应高阶横模。

x 轴再增幅后，谱线的半高全宽是 0.7 格，横模间距是 7 格，经过简单计算

$$F = \frac{\Delta\lambda_{S.R}}{\delta\lambda} = 197.15$$

## V. 思考题

1. 因为首先需要找到谱线的周期性才能确定一个干涉序，从而在一个干涉序内去区分横纵模，展开相关量的测量。

2. 首先干涉仪自由频谱范围 1800MHz 相对于纵模间隔 439.6MHz 来说不是很大，可能遗失一些高阶纵模。其次很多光强较弱的模由于损耗作用无法观察到，只能测能量较大的纵模，最后示波器分辨率低，谱线图像不清晰，误差很大。

3. 本实验最高电压固定只能观察一个周期，但根据题中描述原因可能是当电压过大，压电陶瓷环长度变化量与电压的关系偏离非线性。由于谱线存在飘移，所以可以通过拍照再测量的方法提高精确度，另外在调节光路的时候一定要准直，达到能调节到的最高分辨率，还可以将 x 轴再增幅并定标，这样可以减小误差。

## VI. 结论

本实验通过使用共焦球面扫描干涉仪使我们掌握模式分析的方法。了解激光模形成与特点，分析和研究 He-Ne 激光器不同横纵模的场分布特征，纵横模个数，频率间隔，对应模序等结果，加深概念理解。我们根据观察干涉序的周期性确定干涉序的个数和单个干涉序，通过频率和高阶横模延申方向判断不同阶纵横模的位置和示波器频率增加的方向，由于单个干涉序内频率增加的方向一定是高阶横模延申的方向。

## VII. 致谢