

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

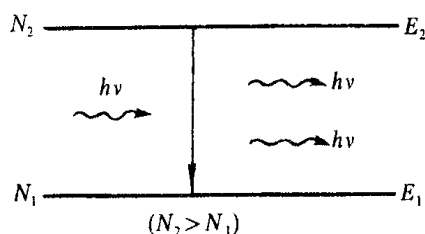


图 13.1 粒子数反转分布

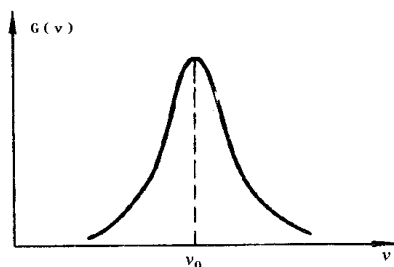


图 13.2 光的增益曲线

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

$$2\mu L = q\lambda_q \quad (13.1)$$

式中， μ 为折射率，对气体 $\mu \approx 1$ ； L 为腔长； q 为正整数。这正是光波相干的极大条件，满足此条件的光将获得极大增强。每一个 q 对应纵向一种稳定的电磁场分布，叫作一个纵模， q 称作纵模序数。 q 是一个很大的数，通常我们不需要知道它的数值，而关心的是有几个不同的 q 值，即激光器有几个不同的纵模。从 (13.1) 式中，我们还看出，这也是驻波形成的条件，腔内的纵模是以驻波形式存在的， q 值反映的恰是驻波波腹的数目，纵模的频率为

$$\nu_q = q \frac{c}{2\mu L} \quad (13.2)$$

相邻两个纵模的频率间隔

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} = \frac{c}{2\mu L} \approx \frac{c}{2L} \quad (13.3)$$

从 (13.3) 式中看出，相邻纵模频率间隔和激光器的腔长成反比，即腔越长，相邻纵模频率间隔越小，满足振荡条件的纵模个数越多；相反，腔越短，相邻纵模频率间隔越大，在同样的增益曲线范围内，纵模个数就减少。因而用缩短腔长的办法是获得单纵模运行激光器的方法之一。

光波在腔内往返振荡时，一方面有增益，使光不断增强；另一方面也存在着多种损耗，使光强减弱，如介质的吸收损耗、散射损耗、镜面的透射损耗、放电毛细管的衍射损耗等。所以，不仅要满足谐振条件，还需要增益大于各种损耗的总和，才能形成持续振荡，有激光输出。如图 13.3 所示，有五个纵模满足谐振条件，其中有两个纵模的增益小于损耗，所以，有三个纵模形成持续振荡。对于纵模的观测，由于 q 值很大，相邻纵模频率差异很小，一般的分光仪器无法分辨，必须使用精度较高的检测仪器才能观测到。

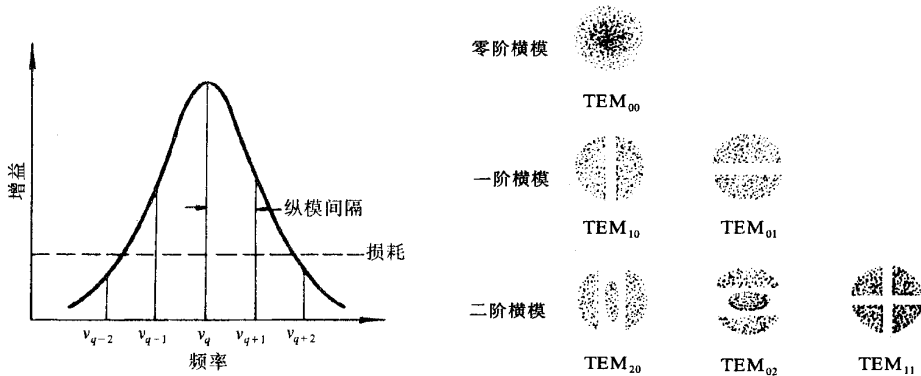


图 13.3 纵模和纵模间隔

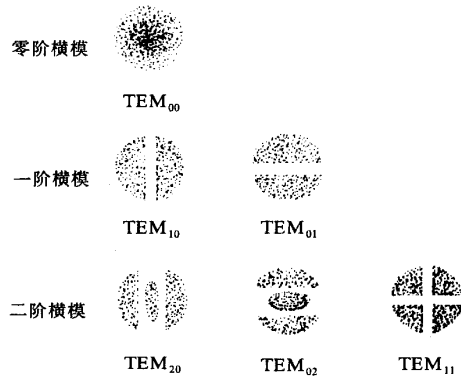


图 13.4 常见的横模光斑图

谐振腔对光多次反馈，在纵向形成不同的场分布，对横向是否也会产生影响。这是因为光每经过放电毛细管反馈一次，就相当于一次衍射，多次反复衍射，就在横向形成了一个或多个稳定的衍射光斑。每一个衍射光斑对应一种稳定的横向电磁场分布，称为一个横模。图 13.4 中，给出了几种常见的基本横模光斑图样。我们所看到的复杂的光斑则是这些基本光

斑的叠加。激光的模式用 TEM_{mnq} 来表示，其中 m 、 n 为横模的标记， q 为纵模的标记。 m 是沿 X 轴场强为零的节点数， n 是沿 Y 轴场强为零的节点数。

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，它已成为激光技术中一种重要的测量设备。本实验就是通过它将彼此频率差异甚小（几十至几百 MHz），用一般光谱仪器无法分辨的各个不同的纵模、横模展现成频谱图来进行观测的。在本实验中，它起着关键作用。

共焦球面扫描干涉仪是一个无源谐振腔，它由两块球形凹面反射镜构成共焦腔，即两块反射镜的曲率半径和腔长 l 相等（ $R'_1 = R'_2 = l$ ）。反射镜镀有高反射率膜。两块反射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 13.6 所示。

图中，①为由低膨胀系数材料制成的间隔圈，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，所以，外加电压不会改变腔的共焦状态。但是当线性关系不好时，会给测量带来一定误差。

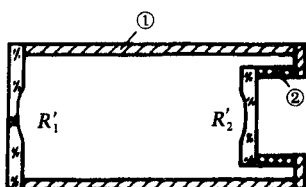


图 13.6 共焦球面扫描干涉仪内部结构示意图

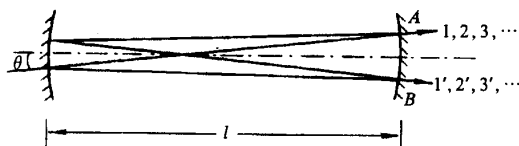


图 13.7 扫描干涉仪内部光路图

当一束激光以近光轴方向射入干涉仪后，在共焦腔中经四次反射呈 X 形路径，光程近似为 $4l$ ，见图 13.7 所示。光在腔内每走一个周期都会有一部分光从镜面透射出去。如在 A、B 两点，形成一束束透射光 1、2、3……和 1'、2'、3'……我们在压电陶瓷上加一线性电压，当外加电压使腔长变化到某一长度 l_a ，使相邻两次透射光束的光程差是入射光中模波长为 λ_a 这条谱线波长的整数倍时，即满足

$$4l_a = k\lambda_a \quad (13.6)$$

模 λ_a 将产生相干极大透射（ k 为扫描干涉仪的干涉序数，为一个正整数），而其它波长的模则不能透过。同理，外加电压又可使腔长变化到 l_b ，使模 λ_b 极大透射，而 λ_a 等其它模又不

能透过……因此，透射极大的波长值与腔长值之间有一一对应关系。只要有一定幅度的电压来改变腔长，就可以使激光器具有的所有不同波长（或频率）的模依次相干极大透过，形成扫描。

值得注意的是，若入射光的波长范围超过某一限度，外加电压虽可使腔长线性变化，但一个确定的腔长有可能使几个不同波长的模同时产生相干极大，造成重序。例如，当腔长变化到可使 λ_d 极大时， λ_a 会再次出现极大，于是有

$$4l_d = k\lambda_d = (k+1)\lambda_a \quad (13.7)$$

即 k 序中的 λ_d 和 $k+1$ 序中的 λ_a 同时满足极大条件，两个不同波长的模被同时扫出，叠加在一起。所以，扫描干涉仪本身存在一个不重序的波长范围限制，即所谓自由光谱范围，它是指扫描干涉仪所能扫出的不重序的最大波长差或频率差，用 $\Delta\lambda_{S.R.}$ 或 $\Delta\nu_{S.R.}$ 表示。假如上例中的 l_d 为刚刚重序的起点，则 $\lambda_d - \lambda_a$ 即为此干涉仪的自由光谱范围值。经推导，可得

$$\lambda_d - \lambda_a = \frac{\lambda_a \lambda_d}{4l_d} \quad (13.8)$$

由于 λ_d 与 λ_a 之间相差很小，腔长的变化仅为波长数量级，上式可近似表示为

$$\Delta\lambda_{S.R.} = \frac{\lambda^2}{4l} \quad (13.9)$$

式中 λ 为平均波长。用频率表示，则为

$$\Delta\nu_{S.R.} = \frac{c}{4l} \quad (13.10)$$

在模式分析实验中，由于我们不希望出现（13.7）式中的重序现象，故选用扫描干涉仪时，必须首先知道它的自由光谱范围 $\Delta\nu_{S.R.}$ 和待分析激光器的频率范围 $\Delta\nu$ ，并使 $\Delta\nu_{S.R.} > \Delta\nu$ 。这样，才能保证频谱图上不重序，腔长与模的波长（或频率）间是一一对应关系。

自由光谱范围还可用腔长的变化量来描述，即腔长变化量为 $\lambda/4$ 时所对应的扫描范围。因为，光在共焦腔内呈 X 型路径行进，四倍路程的光程差正好等于 λ ，干涉序数改变为 1。另外，还可以看出，当满足 $\Delta\nu_{S.R.} > \Delta\nu$ 条件后，如果外加电压足够大，使腔长最大的变化量是 $\lambda/4$ 的 i 倍，那么将会扫描出 i 个干涉序，激光器的所有模将周期性地重复出现在干涉序 k 、 $k+1$ …… $k+i$ 中。

三、实验装置

如图 13.8 所示。实验装置各组成部分说明如下：

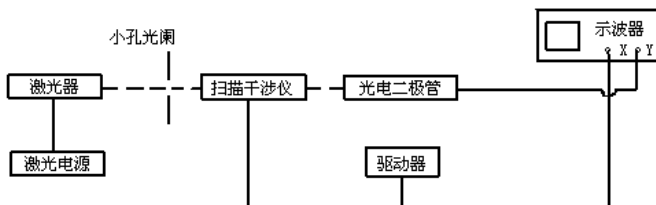


图 13.8 实验装置图

- (1) 待测 He-Ne 激光器。
- (2) 激光电源。
- (3) 小孔光阑。
- (4) 共焦球面扫描干涉仪。使激光器的各个模按波长（或频率）展开，其透射光中心波长为 632.8nm。仪器上有四个鼓轮，其中两个鼓轮用于调节腔的上下、左右位置，另外两个鼓轮用于调节腔的方位。
- (5) 驱动器。驱动器电压除了加在扫描干涉仪的压电陶瓷上，还同时输出到示波器的 X 轴作同步扫描。为了便于观察，我们希望能够移动干涉序的中心波长在频谱图中的位置，以使每个序中所有的模式能完整地展现在示波器的荧光屏上。为此，驱动器还增设了一个直流偏置电路，用以改变扫描的电压起点。
- (6) 光电二极管。将扫描干涉仪输出的光信号转变成电信号，并输入到示波器 Y 轴。
- (7) 示波器。用于观测 He-Ne 激光器的频谱图。

四、实验内容及步骤

- 1、按实验装置图连接线路。经检查无误，方可进行实验。
- 2、开启激光电源。
- 3、用直尺测量扫描干涉仪光孔的高度。调节 He-Ne 激光管的高低、仰俯，使激光束与光学平台的表面平行，且与扫描干涉仪的光孔大致等高。
- 4、使激光束通过小孔光阑。调节扫描干涉仪的上下、左右位置，使激光束正入射到扫描干涉仪中，再细调干涉仪上的四个鼓轮，使干涉仪腔镜反射回来的光点回到光阑的小孔附近（注意：不要使光点回到光阑的小孔中），且使反射光斑的中心与光阑的小孔大致重合，这时入射光束与扫描干涉仪的光轴基本平行。
- 5、开启扫描干涉仪驱动器和示波器的电源开关。调节驱动器输出电压的大小（即调节“幅度”旋钮）和频率，在光屏上可以看到激光经过扫描干涉仪后形成的光斑。（注意：如果在光屏上形成两个光斑，要在保持反射光斑的中心与光阑的小孔大致重合的条件下，调节扫描干涉仪的鼓轮，使经过扫描干涉仪后形成的两个光斑重合。）

6、降低驱动器的频率，观察光屏上的干涉条纹，调节干涉仪上的四个鼓轮，使干涉条纹最宽。

注意：调节过程中，要保持反射光斑的中心与光阑的小孔大致重合

7、将光电二极管对准扫描干涉仪输出光斑的中心，调高驱动器的频率，观察示波器上展现的频谱图。进一步细调扫描干涉仪的鼓轮及光电二极管的位置，使谱线尽量强。

8、根据干涉序个数和频谱的周性期，确定哪些模属于同一个干涉序。

9、改变驱动器的输出电压（即调节“幅度”旋钮），观察示波器上干涉序数目的变化。改变驱动器的扫描电压起点（即调节“直流偏置”旋钮），可使某一个干涉序或某几个干涉序的所有模式完整地展现在示波器的荧光屏上。

10、根据自由光谱范围的定义，确定哪两条谱线之间对应着自由光谱范围 $\Delta\nu_{S.R.}$ （本实验使

用的扫描干涉仪的自由光谱范围 $\Delta\nu_{S.R.} = 3.75\text{GHz}$ ）。测出示波器荧光屏上与 $\Delta\nu_{S.R.}$ 相对应的标尺长度，计算出二者的比值，既示波器荧光屏上 1 毫米对应的频率间隔值。

11、在同一干涉序内，根据纵模定义，测出纵模频率间隔 $\Delta\nu_{\Delta q=1}$ 。将测量值与理论值相比较（注：待测激光器的腔长 L 由实验室给出）。

12、确定示波器荧光屏上频率增加的方向，以便确定在同一纵模序数内哪个模是基横模，哪些模是高阶横模。

13、测出不同横模的频率间隔 $\Delta\nu_{\Delta m+\Delta n}$ ，并与理论值相比较，检查辨认是否正确，确定

$\Delta m + \Delta n$ 的数值。（注：谐振腔两个反射镜的曲率半径 R_1 、 R_2 由实验室给出）。

14、观察激光束在远处光屏上的光斑形状。这时看到的应是所有横模的叠加图，需结合图 1.4 中单一横模的形状加以辨认，确定出每个横模的模序，既每个横模的 m 、 n 值。

五、注意事项

1、实验过程中要注意眼睛的防护，绝对禁止用眼睛直视激光束，观察者应佩戴激光防护镜。

2、开启或关闭扫描干涉仪的驱动器时，必须先将“幅度”旋钮置于最小值（反时针方向旋转到底），以免将其损坏。

六、预习要求

根据实验要求，查阅相关资料，了解激光产生的原理，气体激光器相比其他激光器的优点，熟悉驻波原理及腔内光场的形成过程及分布特点。