

共焦型球面扫描干涉仪在 激光模式分析中的应用

康平 赵绥堂 陈天杰

(北京大学)

Application of confocal spherical sweeping interferometer in the analysis of laser modes

Kang Ping, Zhao Suitang, Chen Tianjie

(Beijing University)

A confocal spherical sweeping interferometer is used for analyzing laser frequency to discriminate the structure of transverse modes. The method can also be used for the analysis of longitudinal modes of laser beams.

近年来激光的许多应用对激光束的模式相继提出了不少要求。如全息照相,对激光束的横模结构有所要求——要求激光束为单一的基横模(习惯称为“单模”—— TEM_{000})。过去往往依靠目视方法根据光斑形状来判定激光束的横模结构,显然这种方法过于粗糙。特别当输出光束以基横模为主而迭加有较弱的高阶横模时,目视方法就不能分辨。本文介绍用共焦型球面扫描干涉仪对激光束进行频率分析的方法来鉴别横模结构。自然,这种方法也能用于激光束的纵模分析。

一、原 理

1. 高斯光束的频率特性

球面镜腔的激光器,其输出的是高斯光束。当忽略了腔内增益介质所引起的频率牵引和排斥效应后,由无源谐振腔理论得到 TEM_{mna} 模的频率为:

$$\nu_{mna} = \frac{1}{4nL} \left\{ 2q + \frac{2}{\pi} (m+n+1) \times \cos^{-1} \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

其中 L 为腔长, R_1 和 R_2 分别为两反射镜的曲率半径, q 为纵模序数, m 、 n 为横模序数。当 $m=n=0$ 时,为基横模, m 或 $n \neq 0$ 时,称为高阶横模。

不同的横模(m 、 n 不同)对应有不同的横向(垂直于谐振腔轴线方向)光强分布,即有不同的光斑图案(图1所示)。人们用目视方法或测量强度分布来分析横模结构正是利用了不同横模之间强度分布的差异。但应该注意,不同的横模所对应的振荡频率亦有差



图 1

收稿日期: 1979年2月21日。

异。 m 、 n 的取值不同，对应着不同的频率。其频率间隔为

$$\Delta\nu_{mn, m'n'} = \frac{C}{2nL} \left\{ \frac{1}{\pi} (\Delta m + \Delta n) \times \cos^{-1} \left[\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

正是利用这种差异，我们可精细地来分析激光束的横模结构。

不同的纵模（即 q 值不同）对应不同的纵向（沿腔轴线方向）光强分布，遗憾的是这种差异为肉眼所不能分辨。所以只能根据不同纵模对应有不同的频率这一点来分析激光束的纵模结构。纵模频率为：

$$\nu_q = \frac{C}{2nL} q \quad (3)$$

不同纵模间的频率差为：

$$\Delta\nu_{q, q+\Delta q} = \frac{C}{2nL} \Delta q \quad (4)$$

图 2 给出一典型 He-Ne 激光器谐振腔的频谱。

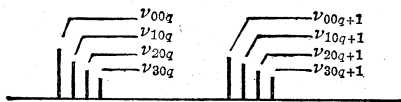


图 2

2. 共焦型球面扫描干涉仪的基本原理

共焦型球面扫描干涉仪由两块镀有高反射膜的凹面反射镜构成（图 3）。其曲率半径 R_1 、 R_2 和腔长 L 满足：

$$R_1 = R_2 = L \quad (5)$$

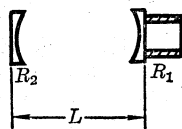


图 3

它是一种典型的无源谐振腔，所以将 (5) 式代入 (1) 式得到其模谱为：

$$\nu_{mnq} = \frac{C}{4nL} (2q + m + n + 1) \quad (6)$$

其横模间频差为：

$$\Delta\nu = \frac{C}{4nL} (\Delta m + \Delta n) \quad (7)$$

图 4 给出了共焦腔的频谱，从图中看到共焦腔的共振频率有高度的简并，即当 $(2q + m + n)$ 为同一常数的所有的模有相同的频率。并且 $m + n$ 为奇数或偶数的模分别对应两组不同的频率。

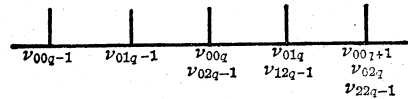


图 4

由于 R_1 和 R_2 分别镀有高反射率膜，所以注入该腔内的光束将在腔内来回多次反射。从多光束干涉角度来看，光束中只有属于该腔频谱的频率成分能够透过（不考虑损耗时透过率为 1），而其它成分将被反射。其正入射时透过极大条件为：

$$4nL = m\lambda \quad (8)$$

其中 L 为干涉仪腔长， λ 为入射波长， m 为正整数。

当在反射镜 R_1 后面的压电陶瓷上加电压时，腔长将在 L 附近作微小变动（约为波长的数量级）。该谐振腔的频谱也随之移动，当所加的电压使腔长变化 $\lambda/4$ 时，对于每一个模的频率都移动了一个频率间隔 $\Delta\nu_F$ ；频谱中的 ν_{00q} 将变到 ν_{01q} ，习惯称该电压为 $V_{\lambda/4}$ 。随着干涉仪腔长的变化，使得透过极大条件 (8) 在变化，即允许透过的频率将在一个范围内扫描，扫描范围仅允许为 $\Delta\nu_F = \nu_{01q} - \nu_{00q}$ 。称 $\Delta\nu_F$ 为自由光谱区，对上述干涉仪有：

$$\Delta\nu_F = \frac{C}{4nL} \quad (9)$$

正是利用这一特征，我们将一束光注入干涉仪，同时使压电陶瓷上的电压从零到 $V_{\lambda/4}$ 扫描，用光电接收器在干涉仪后方接收透过光束，就能得到注入光束的频谱。如扫描电压大于 $V_{\lambda/4}$ 时，可重复得到该频谱。

二、实 验

1. 装置

用共焦型球面扫描干涉仪测量 He-Ne 激光管输出的模式, 实验装置见图 5。

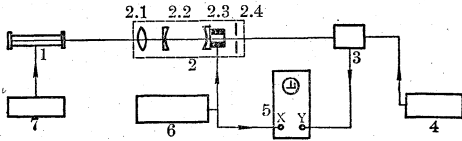


图 5

1—He-Ne 激光器 2—扫描干涉仪 (2.1—前置透镜, 2.2—共焦腔, 2.3—压电陶瓷, 2.4—光闸)。3—光电转换接收放大器 4—稳压直流电源 (晶体管稳压电源) 5—示波器 (型号: SBT-5 同步示波器) 6—信号发生器 (型号: XFD-3 型超低频信号发生器) 7—He-Ne 激光电源

所用的激光管长度分别在 160~1200 毫米之间, 结构有全内腔和全外腔两种。300 毫米以下的用 JD-1 型电源点燃, 300 毫米以上用 JD-2 型电源点燃。

激光束经前置透镜输入干涉仪。由超低频信号发生器产生锯齿波, 来控制压电陶瓷的伸缩, 以改变干涉仪谐振腔长, 使干涉仪不断的扫描。同时将锯齿波信号输入到示波器的 x 轴上, 使示波器水平扫描与干涉仪的扫描同步。干涉仪输出的光束由硅光电二极管 (2DU 型) 接收, 经光电转换放大后, 输送到示波器 y 轴上。接收器电路见图 6。其放

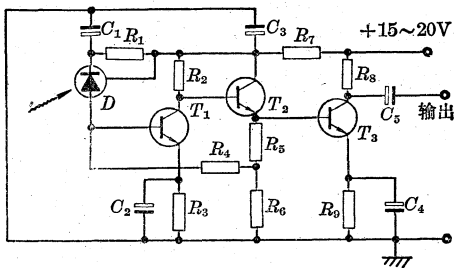


图 6

D—硅光电二极管, T_1 、 T_2 、 T_3 —3DG6 三极管, R_1 —47k Ω , R_2 —15k Ω , R_3 —2.7k Ω , R_4 —22k Ω , R_5 —3.9k Ω , R_6 —1k Ω , R_7 —56 Ω , R_8 —2k Ω , R_9 —3.7k Ω , C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 —100 μ F。

大倍数大于 2000 倍, 带宽从几十赫到 1.5 兆赫。整个接收器装在屏蔽罩内, 防止外界干扰。

在实验中, 我们用的是腔长为 18.825 毫米和 50 毫米的球面扫描干涉仪。当压电陶瓷的电压加到 150 伏时, 扫出三个序来。干涉仪参数见表 1。

表 1

腔长 (毫米)	自由光谱区 (兆赫)	镜反射率	精细常数	分辨本领
18.825	4000	99%	60~70	7×10^6
50	1500	99%	60~70	1.9×10^7

2. 方法

按照图 5 将实验电路接好, 点燃被测的激光管, 待稳定后 (大约 15~30 分钟), 打开超低频信号发生器, 调到输出为锯齿波, 其扫描周期为 20~80 毫秒, 电压为 50~80 伏。将这个信号分别输送到压电陶瓷和示波器的 x 轴上。然后调整激光管和干涉仪, 调法是: 将激光束射到干涉仪的输入端, 经过仔细调整, 使光轴达到与干涉仪近共轴, 此时便可在干涉仪的输出端用眼看到两个大小一样、距离不远的红光点, 这时我们再细调干涉仪的位置, 使两个光点基本重合, 出现一个一闪一闪的红光点, 闪速与信号发生器的扫描速度一致。将干涉仪输出的光射到接收器上, 并使接收器的工作电压在 15 伏左右, 可适当调节其电压来改变放大器的放大倍数。经光电转换放大后, 输到示波器的 y 轴上。适当选择示波器的 xy 衰减和 xy 的位移, 我们便可在示波器上直接观察到被测激光器输出的频谱。根据频谱可以分析是否有高阶横模的频率。

若有高阶横模, 可将拍摄的频谱照片用读数显微镜测量。测出纵模间隔的距离 S_z 和横模间隔的距离 S_h , 算出它们的比值 S_h/S_z 。再用公式 (2) 和 (4) 分别求出横模频差 $\Delta\nu_{m, m'}$ 和纵模频差 $\Delta\nu_a$, 算出它们的比值对

表 2

激光管型号	R_1 (毫米)	R_2 (毫米)	L (毫米)	d (毫米)	W (毫瓦)	I_L (毫安)	T_F (毫秒)	L_G (毫米)	N
HN-16	1000	∞	160	1.0	0.3	4	20	18.825	1~2
HN-23	1000	∞	210	1.25	0.85	5	40	18.825	2~3
HN-30	1000	∞	290	1.4	2~3	5	30	18.825	3
HN-40	1000	∞	420	1.5	4	8	50	18.825	4~5
HN-120	3000	∞	1200	2.5	14	15	70	50	12

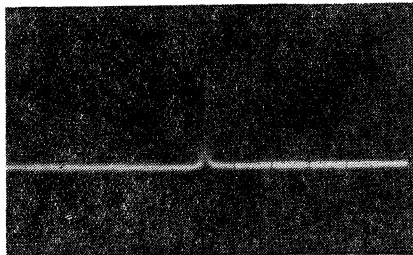
注: R_1 、 R_2 —反射镜曲率半径; L —激光管腔长; d —毛细管内径; W —激光功率; I_L —激光管工作电流; T_F —低频信号发生器扫描周期; L_G —干涉仪腔长; N —纵模个数。

照比较,就可判定是什么模。

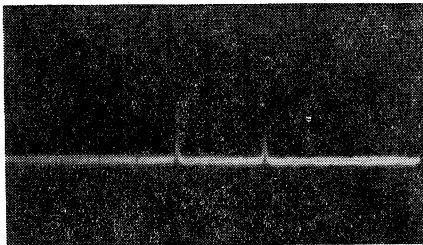
3. 结果

我们对几种不同类型的 He-Ne 激光管进行了测量,各种激光管的结构参数和测量条件见表 2。在示波器上所得到的频谱以及光斑照片分别见图 7~11。

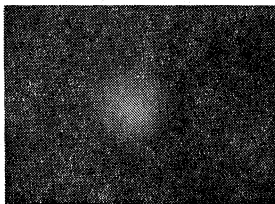
(1) 图 7(a)、(b)、(c) 分别是激光管 HN-16 输出光束的频谱和光斑。从(a)、(b)可知其纵模数为 1 或 2, 无高阶横模。



(a)



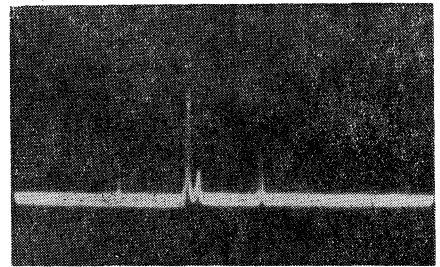
(b)



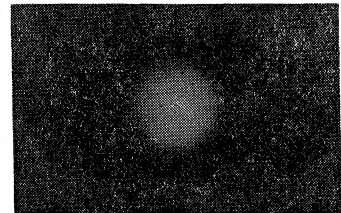
(c)

图 7

(2) 图 8(a)、(b) 分别为激光管 HN-23 输出光束的频谱和光斑。从图 8(a) 看出该管出现了三个纵模, 而中心纵模附近的小峰表示另有一个频率, 是高级横模。



(a)



(b)

图 8

我们用读数显微镜测得:

$$S_z = 10.7 \text{ 毫米} \quad S_h = 1.6 \text{ 毫米}$$

横模频率间隔与纵模频率间隔之比为:

$$\frac{S_h}{S_z} = 0.149$$

由公式(2)和(4)分别算出:

$$\Delta\nu_{00,01} = \nu_{01q} - \nu_{00q} = 107 \text{ 兆赫,}$$

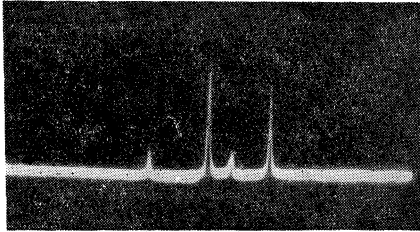
$$\Delta\nu_q = 714 \text{ 兆赫}$$

横模频差占纵模频差为:

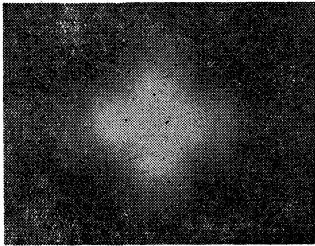
$$\frac{\Delta\nu_{00,01}}{\Delta\nu_q} \approx 0.15$$

公式计算的结果(0.15)正与测量结果(0.149)相对应,说明小峰是 TEM_{01} 模的频率。由此可知该激光输出不是纯的基横模,有 TEM_{01} 模迭加。这一点从图 8(b) 的光斑中用肉眼是无法分辨出来的。

(3) 图 9(a)、(b) 分别是激光管 HN-30 的频谱和光斑。



(a)



(b)

图 9

测量结果:

$$S_z = 9.13 \text{ 毫米}, S_h = 3.3 \text{ 毫米},$$

$$S_h/S_z \approx 0.362$$

公式计算结果:

$$\Delta\nu_{00,11} = \nu_{11q} - \nu_{00q}$$

$$= \nu_{02q} - \nu_{00q} = 186 \text{ 兆赫}$$

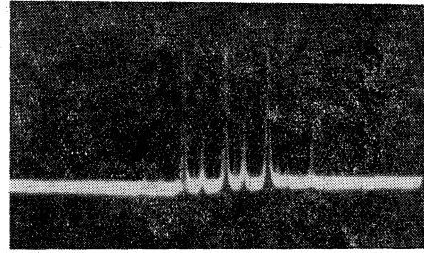
$$\Delta\nu_q = 517 \text{ 兆赫}$$

$$\Delta\nu_{00,11}/\Delta\nu_q \approx 0.36$$

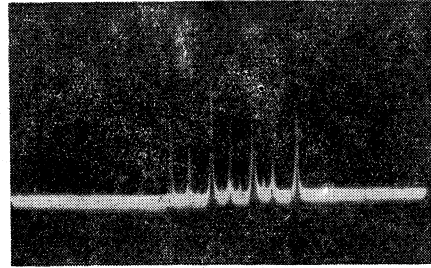
从计算与测量的结果看出,对应的频率是 ν_{11q} 或是 ν_{02q} (因为 $\nu_{11q} = \nu_{02q}$)。所以该激光输出为 TEM_{00} 和 TEM_{11} 或 TEM_{02} 迭加而成,根据光斑图 9(b) 可知应为 TEM_{00} 和 TEM_{11} 迭加而成。

(4) 图 10(a)、(b) 分别是激光管 HN-40 的频谱和光斑。

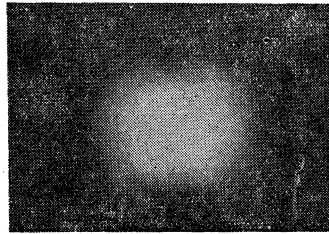
测量结果: $S_z = 6.2 \text{ 毫米}$,



(a)

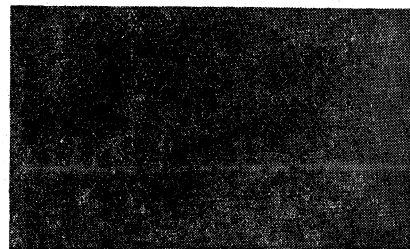


(b)

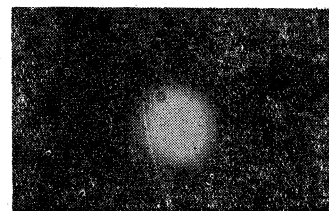


(c)

图 10



(a)



(b)

图 11

$$S_{n_1} = 1.42 \text{ 毫米} \quad S_{n_1}/S_z = 0.23$$

$$S_{n_2} = 2.75 \text{ 毫米} \quad S_{n_2}/S_z = 0.44$$

$$S_{n_3} = 4.15 \text{ 毫米} \quad S_{n_3}/S_z = 0.67$$

公式计算结果: $\Delta\nu_q = 357$ 兆赫

$$\Delta\nu_{00,01} = 80 \text{ 兆赫} \quad \Delta\nu_{00,01}/\Delta\nu_q = 0.22$$

$$\Delta\nu_{00,02} = 160 \text{ 兆赫} \quad \Delta\nu_{00,02}/\Delta\nu_q = 0.45$$

$$\Delta\nu_{00,03} = 240 \text{ 兆赫} \quad \Delta\nu_{00,03}/\Delta\nu_q = 0.67$$

从结果可看出,该激光管输出是 TEM_{00} 、 TEM_{01} 、 TEM_{02} 、 TEM_{03} 模迭加而成,这从光斑图 10(c) 用肉眼无法分辨出来。

(5) 图 11(a)、(b) 是激光管 HN-120 的频谱和光斑。得到 12 个纵模,并可清楚地看出多普勒线形的包络。

三、结 论

在具体测量中应注意选取干涉仪腔长,使其自由光谱区大于激光增益谱线的宽度。此外,实验中输入到干涉仪腔内的能量依赖于激光束与干涉仪腔的耦合系数,而该耦合系数又与高斯光束的参数、腔的参数以及激光束与腔的准直精度有关,因而必须指出,所得频谱中各模的高度并不直接反映光束中各模成分的相对强度,而且频谱中各模的相对高度可能随调节情况而异。

氩-氦激光针对经络隐性传导的初步观察

采用 He-Ne 激光对 20 例患者进行穴位照射,同时用半导体点温计对照射的穴位和同经未照射的络穴及距离较远的穴位进行了温度探测。结果被照射穴位皮温较照射前升高或降低,不被照射的穴位皮温也产生变化。认为是祖国医学针刺“得气”的另一种表现形式。因多数受试者不产生主观意识感觉而称之为“隐性传导”。给激光针、针刺治疗及针麻、激光针麻醉过程中不产生感传也收到良好效果这一临床现象,提供了探索依据。

我们用输出波长为 6328 Å、发散角约 2 毫弧度、光斑直径 2 毫米、连续输出功率为 2 毫瓦的 He-Ne 激光器,对 20 例门诊治疗的患者进行了穴位照射。疾病有肩周炎、面神经麻痹、神经性耳聋、神经衰弱症、慢性鼻炎、坐骨神经痛、胃溃疡、动脉硬化、慢性胆囊炎、烧伤、颈椎病等。

20 例受试者中,照射后较照射前皮温明显降低

温度变化情况	阳 性					阴 性	
	±	+	++	总例数	%	例数	%
照射后温度升高	2	5	1	8	40		
照射后温度下降	2	1	1	4	20		
合 计	4	6	2	12	60	8	40

注: ±—弱阳性; +—阳性; ++—强阳性。

者 4 例;温度明显升高者 8 例;温度变化在 0.5°C 之内者 8 例。具体结果见表。

在 20 例受试者中,有 2 例出现明显的循环感传,其余大部分病例没有出现意识感觉,但皮温都有不同程度的变化。

之所以会产生上述效应,我们认为,皮肤温度感受器可能参与了这一过程。6328 Å He-Ne 激光对于穴位组织是一种环境刺激的能量,当直径 2 毫米光斑作用于穴位组织时,刺激了以一种感受器为主的组织,从而引起感受器反应性功能改变,导致了温度的变化。当刺激以冷感受器为主时,冷感受器发放频率增快;当刺激以温感受器为主时,温感受器发放频率增快。

照射穴位及未照射穴位的沿经温度变化,可能是穴位温度感受器接受了激光能量之后,发放次数发生了改变,与此同时,受刺激的感受器将能量传递给临近同类感受器,沿着经络的走行路线向外扩散,形成类似同感性反射。当其超越了大脑对温度的感觉阈值时,就形成了意识感觉的冷流,温流似的感传现象;当不引起大脑感觉时,就形成所谓“隐性传导”。当然,这种温度的升降变化不会影响到体温的正常。

(山东省泰安地区人民医院)

明德玉 周淑香 郭碧华)