

# 气体激光器的低频差拍噪声

巴恩旭 吕可诚 张春平

(南开大学)

**提要:** 用光学混频技术研究了平凹腔结构气体激光器的模差拍。实验中应用了不同腔长的 He-Ne (6328 Å) 和 Ar<sup>+</sup> 激光器。根据腔长的随机变化、介质色散特性和模竞争效应解释了低频拍和连续噪声谱。

## Low-frequency beat noise for gas lasers

Ba Enxu, Lu Kecheng, Zhang Chunping

(Nankai University)

**Abstract:** The beat frequency between modes of optical resonator with concave mirrors have been studied by the photomixing technique. In the experiment He-Ne laser (6328 Å) and Ar<sup>+</sup> laser were used. Based on the random variation of cavity length, characteristics of the medium index and mode competition effect, low-frequency beat and noise continuums are explained.

关于激光噪声的研究已有许多报导。但对于激光模式与噪声的关系,尤其是较低次横模产生的低频差拍尚无细致研究,而正是这种低频噪声造成了实际应用中出现的严重干扰。有些工作者认为,差拍并不构成激光噪声<sup>[1]</sup>,因此搞清激光振荡模式与低频差拍噪声之间的关系是十分必要的。

我们用光学混频技术研究了平凹腔结构的气体激光器的模差拍,测试装置与文献[2]基本相同。由于模的正交特性,在实际测量中需将光束遮掉一半,以得到全部差拍频谱<sup>[3]</sup>。

### 一、模差拍的粗略计算

根据 Boyd 等人的理论,平凹腔结构的

模频率为:

$$\nu = \frac{C}{2L} [q + (1 + m + n)A] \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{L}{R} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中  $L$  为腔长,  $R$  为凹面镜的曲率半径。

假定不同的横模对应着相同的共振腔长,由方程(1)可求得同一横模系( $q$  相同的不同横模)中不同横模之间的差拍为:

$$\Delta\nu_{\Delta(m+n)} = \nu_0 A \Delta(m+n) \quad (3)$$

$$\nu_0 = \frac{C}{2L} \quad (4)$$

表1列出了 Ar<sup>+</sup> 激光器横模差拍的理论值和观测值,两者基本相符。

收稿日期: 1982年10月26日。

表1 Ar<sup>+</sup> 激光器低次横模差拍值

激光器参数		1# 管				2# 管			
		L=1.376 米; ν <sub>0</sub> =109 兆赫;		R=2.377 米 A=0.2753		L=1.445 米, ν <sub>0</sub> =103.8 兆赫;		R=2.442 米 A=0.2794	
差	拍	理论值 (兆赫)		观测值 (兆赫)		理论值 (兆赫)		观测值 (兆赫)	
		Δν	ν <sub>0</sub> -Δν	Δν	ν <sub>0</sub> -Δν	Δν	ν <sub>0</sub> -Δν	Δν	ν <sub>0</sub> -Δν
Δ(m+n)	1	30.0	79.0	30.2	78.1	29.0	74.8	28.8	74.6
	2	60.0	49.0	60.8	47.5	58.0	45.8	58.2	45.6

## 二、横模差拍谱的细致结构

若在上述粗略计算值附近进行仔细观测,发现差拍频谱存在细致的结构。当振荡模含有简并模时,差拍谱就更复杂。这是由于上节的计算中,假定了不同横模对应着相同的共振腔长,因此,凡是 Δ(m+n) 相等的横模之间的差拍是相等的。实际上,不同的横模对应着不同的腔长。这一点从不同横模光斑在腔镜上占有不同的几何位置来分析是很容易理解的。所以同一纵模(q 相同)中不同横模的频差应按下面(5)式计算。由(1)式:

$$\nu_{q,m,n} = \frac{C}{2L} [q + (1+m+n)A]$$

$$\nu_{q,m,n'} = \frac{C}{2(L+\varepsilon)} [q + (1+m+n')A]$$

当 Δq=0, Δ(m+n)=1 时

$$\begin{aligned} |\Delta\nu_q| &\approx \left| \frac{C}{2L} \left( A - \frac{2\varepsilon}{\lambda_q} \right) \right| \\ &\approx \left| \frac{C}{2L} \left( A - \frac{2\varepsilon}{\lambda_q} \right) \right| \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ε 为不同横模共振腔长的差值, λ<sub>q</sub> 为同一纵模序数不同横模的平均波长。因为 Δν 与 L 成反比,因此为了使差拍谱的细致结构更易于观测,实验中用了短腔 He-Ne 激光器(L=250 毫米, R=1 米的平凹腔)。表 2 列出了用球面扫描干涉仪得到的模谱和用频谱

分析仪测量模差拍的照片。实际上 ε 值很难预知,而从实验上测得差拍反算 ε 值则非常容易。由式(5)得:

$$|\varepsilon| \approx \left| \lambda \left( \frac{A}{2} - \frac{L}{C} \Delta\nu_q \right) \right| \quad (6)$$

反算出的 ε 值也列入表 2 内。对于 L 为 250 毫米、R 为 1 米的平凹腔结构的 He-Ne 激光器,ε 一般为千分之一波长。应该指出,由于激光腔长不同、腔结构不同和腔镜曲率的差别,ε 值也有所不同。由于激光腔的热变化导致了腔长的改变、腔镜的变形和激光器运转条件的变化,也会影响 ε 值。

当激光振荡模含有简并模时,差拍谱更复杂。图 1 示出了两支激光器的模花样和差拍谱。可以看到,由于第二支激光器含有 TEM<sub>01</sub><sup>\*</sup>,故差拍个数多了一倍(图 1(b))。两支激光器的其他模式相同,所以这种差拍个数的变化是简并模解除所致。在实际的激光器中,一般说来,简并模总是被解除的。原因是:第一,由于腔镜光学冷加工的局部误差、激光器制造工艺过程中的误差和运转过程中的热扰动导致了激光腔对称性破坏;其次,腔镜介质膜涂镀工艺造成双折射效应,这种因素产生的频差为几十千赫至几百千赫<sup>[4~6]</sup>;第三,模牵引和排斥效应所致。Lamb 理论已推出模牵引和排斥导致的模简并解除的频差为几十千赫<sup>[7,8]</sup>。以上三种因素,在激光的运转过程中是变化的,因此,模简并解除形成的差拍也将在一小的范围内变动。

表2 横模差拍的细致结构

模 式		差 拍 (兆 赫)			e		
光斑花样	扫描干涉仪显	100 兆赫附近 差拍谱 (0.5 兆赫/ 每大格)	理 论 值	实 验 值	$L_{q00}$	$L_{q11}$	$L_{q+1,00}$
	示的模谱		$\Delta q=1$				
	(a)	(a')	100.36	98.99	$1.1\lambda_q/1000$	$6.7\lambda_q/10000$	
				100.28			
	(b)	(b')	100.36	98.84	$1.1\lambda_q/1000$	$6.7\lambda_q/10000$	$1.3\lambda_q/1000$
				99.98			
	(c)	(c')	100.36	98.98	$1.1\lambda_q/1000$	$6.7\lambda_q/10000$	
				100.28			

注: (a)的模式为:  $TEM_{q00}+TEM_{q01}+TEM_{q11}+TEM_{q+1,00}$ ;

(b)的模式为:  $TEM_{q00}+TEM_{q01}+TEM_{q11}+TEM_{q+1,00}+TEM_{q+1,01}$ ;

(c)的模式为:  $TEM_{q00}+TEM_{q01}+TEM_{q+1,00}$ ;

$L_{q00}$ 为第  $q$  级纵模系中基模共振腔长;

$L_{q01}$ 为第  $q$  级纵模系中  $TEM_{q01}$  模共振腔长,以此类推。

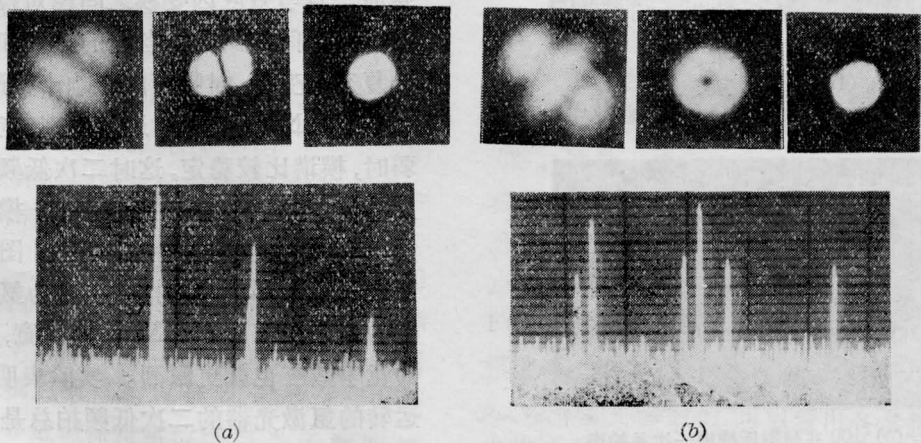


图1 差拍谱的细致结构

纵坐标: 10 分贝/每大格; 横坐标: 0.5 兆赫/每大格; 激光器的结构参数为:  
 $L=250$  毫米;  $R=1$  米; 毛细管直径为 1.15 毫米; 平凹腔 He-Ne 激光器

表3 模简并解除的实验测量

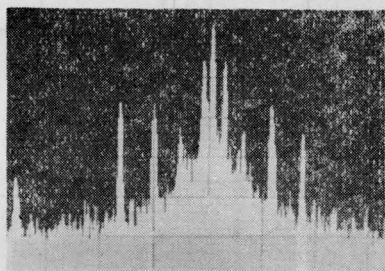
激光器参数	2763# L=278毫米, R=1米 平凹腔 He-Ne 管	3# L=298毫米, R=1.1米 平凹腔 He-Ne 管	5# L=228毫米, R=1.1米 平凹腔 He-Ne 管	2# L=1.445米, R=2.4米 平凹腔 Ar <sup>+</sup> 激光器
差拍(兆赫)	2.80	1.60	2.0	2.0
$\epsilon'$	$2.6\lambda_q/1000$	$1.6\lambda_q/1000$	$1.5\lambda_q/1000$	$9.6\lambda_q/1000$

表3列出了一些有简并模激光振荡的有关数据。一般说来,简并模解除后的差拍均在1至3兆赫。可以认为,使模简并解除的主要因素是激光腔对称性受破坏。为了分析这个问题,我们仍从(1)式出发,作一些合理的近似后可得:

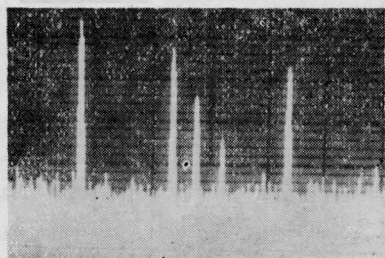
$$|\nu_{q,m,n} - \nu_{q,n,m}| \approx \frac{C}{L} \frac{\epsilon'}{\lambda_q} \quad (7)$$

式中  $\epsilon'$  为腔的不对称性引起的两简并模共振腔长的差值,实验上可测得差拍推算  $\epsilon'$  值。实验结果表明,  $\epsilon'$  值在千分之几个波长。在实际的激光器中,这样小的差值几乎总是存在的,所以,简并模的概念仅仅具有理论意义。

差拍细致结构的存在,又可产生二次差



(a) 0~2兆赫低频二次差拍谱



(b) 100兆赫附近横模一次差拍谱

图2 3746# He-Ne 激光器差拍谱

纵坐标: 10分贝/每大格; 横坐标: 0.5兆赫/每大格;  
激光器参数同图1

拍,这就在0至几兆赫范围内形成低频拍。图2示出了3746# He-Ne激光器一次差拍谱和二次差拍低频频谱。

### 三、低频连续噪声谱

模差拍值是随机变化的,实验表明其随机漂移量达几百千赫(见表4)。由于变化是连续的,使用中无法避开它的干扰。

特别应当指出的是,模竞争效应对低频连续噪声谱的影响十分严重。模竞争效应可以发生在多个纵模之间,也可以发生在多个横模之间。根据Lamb理论,强耦合竞争发生在两种情况:第一,一个模的“象孔”与另一个模的“原孔”重合。此时,模竞争固然激烈,但竞争状态不随时间变化,对低频噪声的贡献不大。第二,不同模的频差(可以是同一纵模系内不同横模间的频差,也可以是同一横模不同纵模之间的频差)与烧孔宽度相比拟时,竞争效应因受模之间相对位相的影响而成为时间的函数,各模的振幅和频率呈十分复杂的变化,对噪声的影响十分严重。观测长腔 He-Ne 激光器的运转发现,竞争效应较弱时,模谱比较稳定,这时二次低频差拍是分立的谱线。当竞争效应较强时,模谱极不稳定,二次低频差拍谱呈连续谱。图3示出了氙离子激光器低频差拍谱。因为氙离子激光器的均匀展宽比 He-Ne 激光器宽,所以前者的竞争效应也就更激烈。实验表明,多横模运转的氙激光器的二次低频拍总是连续谱。由图3可得多横模运转的长腔激光器的低频噪声比基模运转时的增高20~30分贝。

由以上分析可知,多模运转,尤其是高次

表 4 差拍频率的变化量(平凹腔结构)

激光器编号	5# He-Ne	8# He-Ne	10# He-Ne	20# He-Ne	33# He-Ne	2# Ar <sup>+</sup> 管
结构参数	L(米)	0.25	0.27	0.23	0.26	1.45
	R(米)	1.1	1.1	1.1	1.1	2.4
模式	TEM <sub>00</sub> +TEM <sub>01</sub>	TEM <sub>00</sub> +TEM <sub>01</sub> *	TEM <sub>00</sub> +TEM <sub>10</sub> +TEM <sub>11</sub>	TEM <sub>00</sub> +TEM <sub>01</sub>	TEM <sub>00</sub> +TEM <sub>01</sub> *	TEM <sub>00</sub> +TEM <sub>01</sub> *
差拍变化量(千赫)	210	220	140	210	300	300



(a) 多横模运转



(b) 基模运转

图 3 氩离子激光器低频噪声谱

横坐标:  $\nu$ , 100 千赫/每大格

纵坐标: 噪声电平, 10 分贝/每大格

横模的存在是十分有害的。它不但出现电平很高的差拍干扰, 而且这些差拍的二次差拍形成了连续低频噪声谱。目前我国生产的长

腔气体激光器绝大多数不是基模运转, 这给实际应用造成了困难。另外, 从激光应用的发展看, 虽然光声传感和光纤陀螺<sup>[9]</sup> 最终将采用小型化的固体红外二极管, 但这些技术的实验阶段通常是采用可见光的气体激光。这些装置质量的提高取决于低频噪声电平的降低。严格限制高次横模则是降低低频噪声的重要方法。

在实验工作中, 中山大学杨圣璐老师, 南开大学林美荣、吕福云、夏顺宝同志给予了热情帮助, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] H. Hodara *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1966, **QE-2**, 337.
- [2] 吕可诚, 巴恩旭等; 《激光》, 1981, **8**, No. 10, 13.
- [3] John. P. Goldsborough; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, 267.
- [4] R. Balhorn *et al.*; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 742.
- [5] R. A. J. Keilser; *Opt. Commun.*, 1977, **23**, 194.
- [6] N. Umeda *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 3, 444.
- [7] W. Culshaw, J. Kanneland; *Phys. Rev.*, 1966, **145**, No. 1, 257
- [8] R. L. Fork *et al.*; *Phys. Rev.*, 1965, **139**, 4A-6A, 1408.
- [9] J. H. Cole; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 7, 1023.