

氩离子激光的模分裂和差拍频谱特性*

吕可诚 袁树忠 吕福云 开桂云

(南开大学物理系, 天津 300071)

提要 在强激发情况下,研究了振荡模的差拍频谱特性,用模分裂理论对实验结果进行了分析。

关键词 模分裂,差拍频谱

Mode splitting of argon-ion laser and properties of beat spectrum

LÜ Kecheng, YUAN Shuzhong, LÜ Fuyun, KAI Guiyun

(Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract The complex beat spectra of oscillation modes on argon-ion laser with strongly exciting was obtained. The experimental phenomena are explained by the theory of mode splitting.

Key words mode splitting, beat spectrum

1. 引言

氩离子(Ar^+)激光的输出模特性一直是人们特别关注的问题,许多科学工作者已作了大量的研究工作^[1~4]。从研究结果看到,氩离子激光的电磁场模式与空腔理论所预期的模特性有着显著差别。同时,同一台激光器在不同的运转条件下,其输出特性也极不相同,呈现出极其复杂的变化形式。我们先前的工作^[5]已得出,在弱激发条件下,氩离子激光的实际振荡模个数远小于由空腔理论所预期的模式共存数目,最近的实验表明,在强激发情况下,氩离子激光器实际振荡频率数有可能超过空腔理论预期的数目,其振荡频率的差拍谱呈现十分复杂的变化形式,借用已有的模分裂理论对实验结果进行了分析。

2. 实验

实验装置示于图1。用常规的360型连续运转的 Ar^+ 激光器(南京电子管厂制造)腔长, (L) 为1.5 m,毛细管直径为3 mm,平凹腔结构,凹面镜的曲率半径为2.6 m,采用棱镜法选择

收稿日期:1992年7月27日;收到修改稿日期:1993年3月17日。

* 国家自然科学基金资助项目。

共振波长。

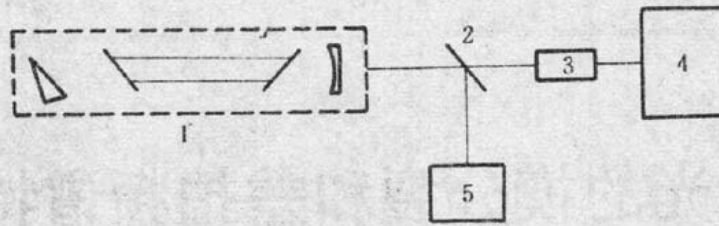


Fig. 1 Simplified diagram of the experimental setup

1—argon-ion laser; 2—splitter; 3—photomultiplier tube; 4—spectrum analyser; 5—power meter

激光器输出光束被分为两部分,一部分经光电接收器进入射频频谱分析仪(TF2370型),测量振荡模的差拍频谱;另一部分引入功率计测量输出光强度的相对值,以便估算相对激发。相对激发是指激光器的增益和损耗的比值 G/r ,显然激光器的输出强度越大就标志着相对激发越大。实验中改变增益(正比于放电电流强度)或改变损耗(调节腔镜倾角)均可改变相对激发。首先将激光器的放电电流调至 20 A,调节棱镜的偏角,使激光器输出波长为 $0.5145 \mu\text{m}$,精心调节腔镜的倾角,使激光器的输出强度由弱变强。在相对输出强度为 8, 10 和 15 时,得到的振荡模的差拍频谱分别示于图 2 (a), (b) 和 (c), 其差拍频率的数值附在图示说明中。可以看到,当相对强度为 15 时,相邻纵模差拍 100 MHz 附近有三个尖峰信号,见图 2 (c)。

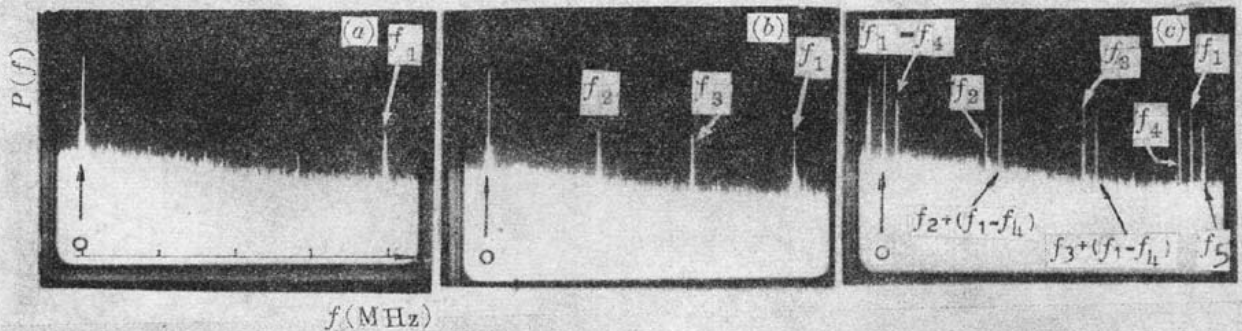


Fig. 2 The beat spectra of radiation wavelength $0.5145 \mu\text{m}$

(a) Relative intensity $I_r = 8$, $f_1 = 101.0 \text{ MHz}$; (b) $I_r = 10$, $f_2 = 36.2 \text{ MHz}$; $f_3 = 64.5 \text{ MHz}$;
(c) $I_r = 15$, $f_1 = 94.2 \text{ MHz}$; $f_5 = 107.8 \text{ MHz}$; Frequency range: 0~100 MHz (25 MHz/div)

改变棱镜的偏角,使激光器输出波长为 $0.4880 \mu\text{m}$,精心调节腔镜的倾角,使激光器输出的相对强度分别为 8, 10, 20, 25 和 30,相对应的差拍频谱示于图 3 (a), (b), (c), (d) 和 (e) 中,可以看到,相对强度由 10 增加到 20 时,差拍频谱变化为许多近似等间距的尖峰信号(图 3(c)),频率间隔约为 9.0 MHz。当相对强度增大到 25 时,差拍频谱的尖峰信号的频率突然减半(周期加倍,见图 3(d))。当相对强度为 30 时,差拍谱为一展宽谱(图 3(e))。

固定腔镜校准位置,调节放电电流可得到同样的结果。

3 理论分析

已有的理论研究已经证明,对于一平凹腔结构的激光器,其空腔振荡频率为

$$\nu = \frac{c}{2L} [q + (1/\pi)(1 + m + n) \cos^{-1} \sqrt{1 - l/R}] \quad (1)$$

相对激发适中时,氩离子激光器振荡的频率与由(1)式计算的结果基本相符。就氩离子激光器输出光的横向分布而言,往往与通常理论预期的有很大差别,其输出光斑花样呈现暗心或细环

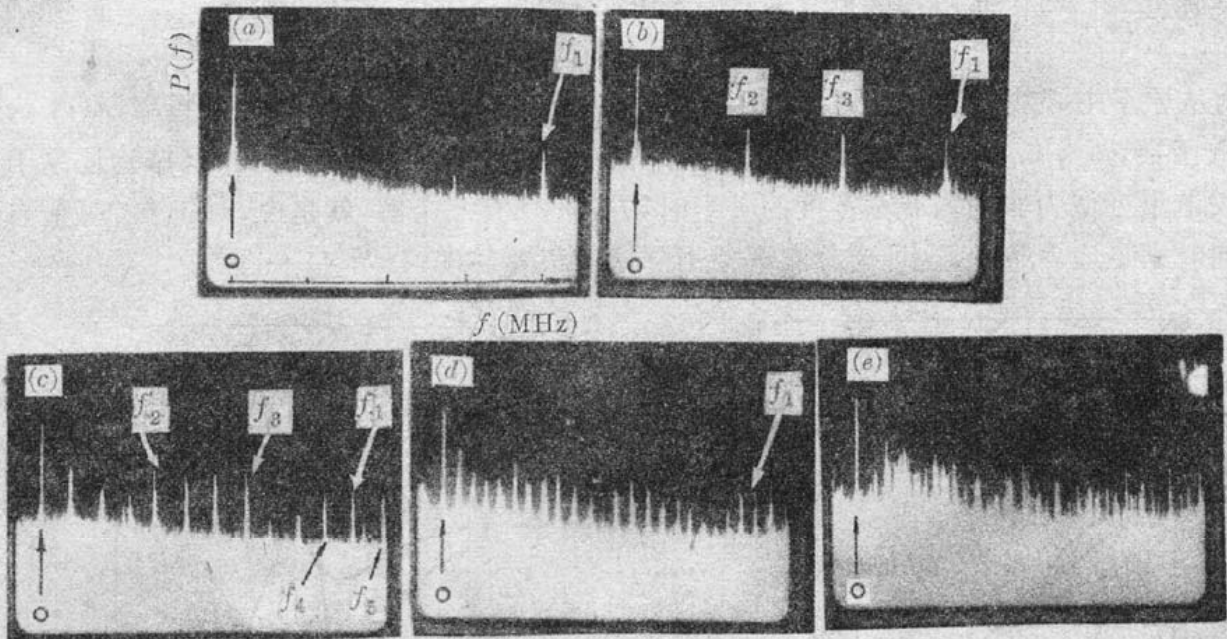


Fig. 3 The beat spectra of radiation wavelength 0.4880 μm

- (a) $I_r = 8$, $f_1 = 100.0$ MHz; (b) $I_r = 10$, $f_2 = 36.8$ MHz, $f_3 = 64.1$ MHz
 (c) $I_r = 20$, $f_4 = 91.7$ MHz, $f_5 = 110.1$ MHz; (d) $I_r = 25$, Period-doubling;
 (e) $I_r = 30$, Broad-spectrum; Frequency range: 0~100 MHz (25 MHz/div)

形花样,但这也并不一定是通常理论预期的高阶 Laguerre-Gaussian 或 Hermite-Gaussian 模^[4]。因此可借助振荡模差拍频率来检验激光器是否存在高阶横模。根据(1)式,可以计算出用于我们实验激光器相邻纵模(即 $\Delta q = 1$)的差拍为 100 MHz,而同一纵模系(q 相同)中相邻横模(即 $\Delta(m+n) = 1$)的差拍值为 36 MHz,对于 0.4880 μm 和 0.5145 μm 两种辐射,相对输出强度为 8 时,频谱仪上只出现一个尖峰信号 f_1 ,其频率数值约为 100 MHz(图 2(a) 和图 3(a))。该尖峰信号就是氩离子激光相邻纵模的差拍信号,这说明激光器是多纵模基横模振荡。相对输出为 10 时,频谱上除 f_1 外,又出现了两个尖峰信号 f_2 和 f_3 ,其值分别约为 36 MHz 和 64 MHz(图 2(b) 和图 3(b))。与理论计算值对照,显然 f_2 是相邻横模之间的差拍,而 f_3 则是 $f_1 - f_2$ 。这说明,随着相对激发的增大,低阶高次横模获得了正增益而起振,差拍频率的实验值与由(1)式计算的理论值符合得很好。

然而,随着腔镜的逐渐较准,相对激发越来越大,差拍频谱变得复杂起来,频谱上出现的新尖峰信号的频率值是不能用(1)式计算出来的。因为附着腔内光强的增大,必须要考虑激光介质的色散和增益饱和问题。符合实际激光振荡的理论应该用更复杂的半径理论或量子理论。利用熟知的模牵引和模排斥效应不能解释这些实验现象。因为按照理论分析,由于模牵引和模排斥效应引起的二次差拍只有几十赫兹的量级,而我们实验中测量的二次差拍值是 4.5~9.2 MHz。用横模简并解除也不能充分说明我们的实验现象,有关研究已表明^[6],横模简并解除的原因主要是腔长的各向异性和反射镜介质模的双折射,激光模的相互作用引起的模简并解除量仅是前者的 1/10,而实验中复杂频谱结构是调节相对激发得到的,改变放电电流和改变腔镜倾角可得到同样结果。

1970 年 L. W. Casperson 等^[7]预言,适当选择高增益介质,激光振荡可能出现模分裂。J. Bentley 等^[8]和 M. Macda 等^[9]用模分裂研究了 He, Xe, Ne 单模激光的不稳定性,笔者认为,实验中出现复杂频谱结构是模分裂所致。模分裂又分为自发模分裂和诱导模分裂。自发模分裂出现在离原子中心线较远处,由于振荡模的烧孔效应引起了色散畸变,足够的调谐和高的增益

可以导致模分裂。对于非均匀展宽介质,振荡频率的相位匹配条件为^[7]

$$\nu_q - \nu = \beta F(\nu) \quad (2)$$

式中 ν 为从原子中心线失谐的归一化振荡频率, ν_q 为第 q 模的归一化空腔振荡频率, $F(\nu)$ 为归一化色散函数, β 为 L. W. Casperson 定义的激光阈值参数^[10]。当 β 足够大时(振荡远高于阈值),且失谐量近似为非均匀展宽宽度的一半时,方程(2)有三个解,就是说,对于一个 q 值有三个频率同时满足边界条件,这种模分裂现象用图解法很容易理解(图 1)。

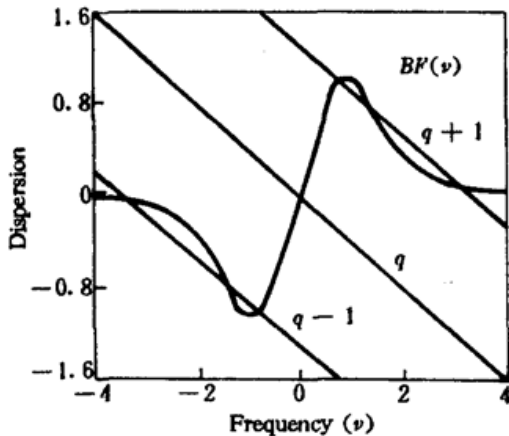


Fig. 4 Graphical solution of Eq. (2). The intersections of a mode line with the dispersion curve indicate spontaneous mode splitting

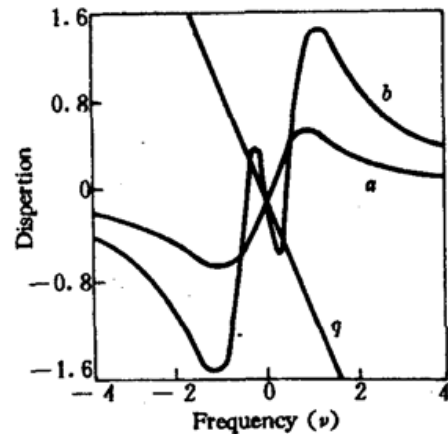


Fig. 5 Equivalent graphical solution for the induced mode splitting. Curve "a" is the dispersion curve with $I_r = 0$; Curve "b" is the dispersion curve with $I_r = 10$; The intersections of the center mode line with the dispersion curve indicate the induced mode splitting

当振荡模处于原子中心线附近时,由于增益曲线上产生烧孔而引起介质色散的畸变,该畸变是那样的严重,以至于几个新的频率同时满足边界条件,使得一个模有好几个频率同时振荡。这种模分裂的等效图解示于图 5 中^[10]。由于此类模分裂是振荡模引起的,因此称为诱导模分裂。

已有的研究已表明^[8,9],诱导模分裂是比较好实现的,用于研究的激光器不用精心设计,这是因为处于原子中心附近的模导致介质色散畸变效应是很强的。一般说来,分裂的边带频率相对于主频率(空腔理论预期的频率)是对称分布的,模分裂的频率间隔一般为几兆赫至十几兆赫。随着增益的增加频率间隔逐渐变大。

氩离子激光器是非均匀展宽激光器,增益较高,在高于阈值运转时有可能产生模分裂现象,我们实验所用的激光器处于多纵模运转,且存在低远横模,情况是复杂的,实验无法定量测量模分裂与腔调谐的关系,也无法判断究竟有几个模产生分裂。但是我们可以用模分裂理论对实验结果给予定性说明。

差拍频谱图 2 (c) 中,在原来相邻纵模差拍信号 f_1 左右对称出现了两个信号 f_4 和 f_5 ,这三个信号标志着主频率分裂成三个,它们的二次差拍值约为 6.8 MHz。因为出现这种现象的相对激发并不很高,因此可以认为这是诱导模分裂。图 2 (c) 中其他三个新的尖峰信号则是二次差拍 $f_1 \sim f_4$ 以及 $f_2 + (f_1 - f_4)$ 和 $f_3 + (f_1 - f_4)$ 。因为 0.5145 μm 辐射的相对输出不能继续调大,实验中没有得到更复杂的差拍频谱。

在图 3 所示的实验结果中,0.4880 μm 激光的相对强度为 20 时,可出现与图 2 (c) 十分类似的不稳定频谱。图 3(c) 中其它尖峰信号出现的是那样的迅速,以至无法拍摄下与图 2(c) 类似的图片。根据这种实验现象,我们还是可以判定, f_1 左右对称的信号 f_4 和 f_5 标志着主频率分

裂成三个,它们之间的差拍值约为 9.2 MHz。频谱中其他尖峰信号与 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 之间的关系列于表 1 中。这种结构是可以理解的。因为用于实验的氩离子激光器处于多模运转状态,它们的振幅和相位无规起伏、相互作用是相当复杂的。在一定条件下,可能进入高阶有序状态,其差拍频谱通过频谱间隔的三等分和四等分形成了等间距的谱图。当相对强度增加到 25 时,出现尖峰信号频率突然减半的现象(如图 3(d) 所示)。随着相对强度的增加,功率谱发展成一展宽频谱。实验中没有看到频谱的高阶分岔(如 $f/4, f/8$ 等)现象,这可能是激光多模运转的噪声及其他噪声抹掉了高阶分岔,实验中从单一尖峰信号发展成展宽谱的路径不是十分典型的倍周期分岔路径,但还是可以认为这种展宽谱是一种混沌特性。

Table 1 Frequency relationship of peaks in Fig. 3 (c)

Peak number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Frequency	0 frequency	$\frac{f_2}{4}$	$\frac{f_2}{2}$	$\frac{3f_2}{4}$	f_2	$\frac{f_3 - f_2}{3}$	$\frac{2(f_3 - f_2)}{3}$	f_3	$\frac{f_4 - f_3}{3}$	$\frac{2(f_4 - f_3)}{3}$	f_4	f_1	f_5
Relationship	mark												

参 考 文 献

- 1 Eugene Skarnick *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **43**(9), 3393(1972)
- 2 P. K. Cheo *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **6**(1), 177(1965)
- 3 J. Boscher *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **45**(1), 203(1974)
- 4 L. W. Casperson, *Optic. Quant. Electr.*, **7**(4), 317(1976)
- 5 吕可诚, *中国激光*, **13**(5), 338(1992)
- 6 张春平, 吕可诚 *et al.*, *物理学报*, **32**(6), 724(1983)
- 7 L. W. Casperson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **17**(3), 259(1970)
- 8 J. Bentley *et al.*, *Opt. Commun.*, **41**(1), 52(1982)
- 9 M. Maeda *et al.*, *Phys. Rev.*, **28**(6), 3395(1982)
- 10 L. W. Casperson, *Phys. Rev.*, **23**(1), 248(1981)