

内腔双纵模 He-Ne 激光器 偏振方向的竞争效应

吕可诚 巴恩旭 张春平
(南开大学物理系)

提 要

实验观察到与一些报导不同的内腔双纵模 He-Ne 激光复杂的偏振特性。用腔的各向异性和振荡模偏振方向的竞争效应对实验现象作了定性解释。

近年来报导了在三个或三个以上纵模振荡的激光器中, 相邻纵模的偏振方向是相互垂直还是相互平行是不确定的^[1,2]。但是, 在两个纵模振荡的激光器中, 普遍认为两个纵模的偏振方向是相互垂直的。

本文介绍了双纵模 He-Ne 激光偏振方向的复杂的实验现象, 并对所述现象给予了定性解释。其意义不仅仅在于提出了与先前一些报导不同的看法, 更重要的是为试制单一线偏振的内腔激光器提供了实验依据。

一、实验观测

实验中用球面扫描干涉仪系统将激光器的振荡频谱显示在示波器上, 在激光器和干涉仪之间放一个可改变方位的偏振器。当激光器的腔长变化时, 显示在示波器上的振荡频谱好象跨过增益线形进行传播。改变偏振器的方位, 可使模的幅度发生变化, 这就可以很容易地判断振荡模在增益线形不同位置时的偏振特性, 同时, 可以用频谱分析仪测量振荡模之间的差拍, 以便更精确地分析模结构。

表 1 用于研究的激光器的参数

Table 1 The parameters of laser for research work

激光器编号	腔结构	腔长 (mm)	介质腔类型	功率 (mW)	模式	纵模个数
1#	平凹腔	230	两个腔镜均为软膜	0.5	基模	通常两个纵模 短时间一个纵模
2#	平凹腔	230	全反镜为硬膜 输出镜为软膜	0.9	基模	通常两个纵模 短时间一个纵模
3#	平凹腔	230	两个腔镜均为硬膜	1.8	基模	通常两个纵模 短时间三个纵模

收稿日期: 1982年12月31日; 修改稿日期: 1983年4月5日

用于研究的三台激光器的参数列于表 1 中。图 1 示出了谐振腔的长度由 L_0 变至 $L_0 + (\lambda/2)$ 时振荡模由右向左(即频率由高向低)移动过程中偏振特性的一种典型变化过程。可以看到,两个纵模的幅度相差很大时,它们的偏振方向相互平行(图 1a)。当较弱的振荡模增大到某一高度时,它的偏振方向突然改变 $\pi/2$, 形成两纵模相互垂直的状态(图 1b)。当两纵模对于增益线形成中心对称时,每个纵模同时存在两个相互垂直的偏振成分,具激烈竞争(图 1c), 这时将信号输入频谱仪中,可测得低频差拍信号,其频率约为 300~600 kHz。一旦两纵模向左偏离中心位置,两模则变为相互垂直的状态,各自的偏振方向与在对称位置的另一侧正好相反(图 1d)。实验中最令人感兴趣的是,对于双纵模振荡、输出约为 1 mW 的内腔 He-Ne 激光器来说,腔镜双折射使每个纵模分裂的模间隔大于 600 kHz 时,内腔激光器即可输出单一的线偏振光。

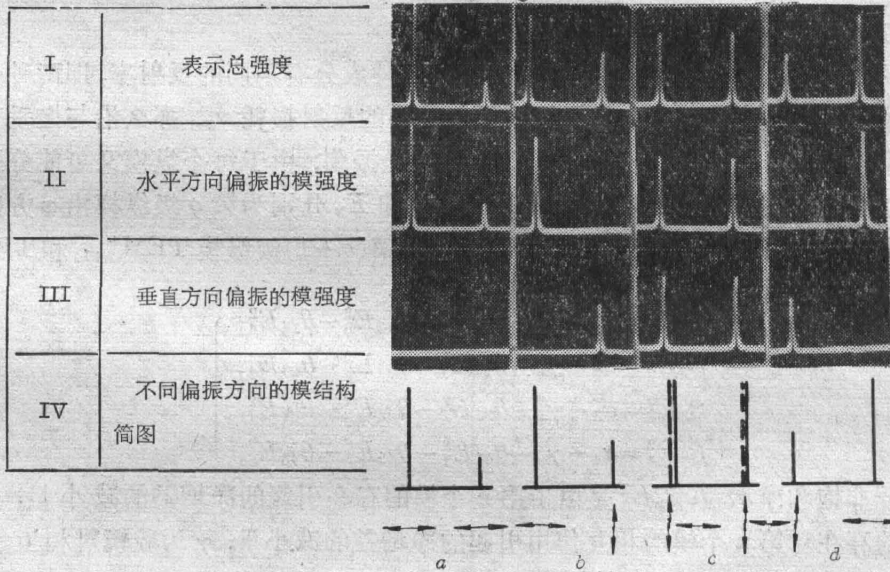


图 1 在一次腔调谐过程中 ($L_0 \rightarrow L_0 + \frac{\lambda}{2}$) 两模结构及其偏振方向

Fig. 1 Photographs of two-mode configurations and their polarization direction during one run of cavity tuning

二、理论分析

虽然有的作者也曾指出^[1,2],内腔 He-Ne 激光器中相邻纵模的偏振方向可能相互平行,但至今没有成熟的理论解释这些效应。Hasle^[3]指出,为了说明内腔激光器纵模的偏振特性,必须考虑腔的各向异性 and 模竞争效应。

要分析各向异性较强的谐振腔振荡模式的偏振特性,应该在 Lamb 理论的基础上,把腔的各向异性损耗项加在振幅和频率的微分方程^[3]中进行严格的理论推导,但是这将是非常复杂的。本文设想了一种简单的方法,虽然不够严格,然而可以较方便地定性地说明实验中复杂的偏振现象。

1. 纵模频率的分裂

当腔镜存在双折射时,光场在腔内就产生了一等效的光程差,谐振腔的共振条件,必须考虑双折射对两种不同偏振成分所带来的附加相移。设 Δ 为此附加相移,那么光场在腔内的单程总相移则应为渡越相移与附加相移 Δ 之和,由此,平凹腔基模的共振频率应为

$$\nu_{q\pm} = \frac{c}{2L} \left(q + \frac{1}{\pi} \arccos \cos \sqrt{\frac{\pi}{R} \pm \frac{\Delta}{\pi}} \right),$$

式中 +、- 号表示两个相互垂直的偏振成分,它们的频差为

$$|\Delta\nu| = |\nu_{q+} - \nu_{q-}| = \left| \frac{c\Delta}{L\pi} \right|, \quad (1)$$

这表明,由于腔的各向异性的存在,每个振荡模可能分裂为偏振方向互相垂直的两个模,其模间距与附加相移成正比。所得 (1) 式与 W. M. Doyal 等人^[4]用光学等效法则推出的结果相同。

2. 偏振方向相互垂直的两模的竞争效应

当腔镜存在双折射时,腔镜对相互垂直偏振的两种成分有不同的反射率,即两种偏振成分有不同的反射损耗。设沿 x 方向偏振的分量有较小的反射损耗 γ_x , 那么沿与之垂直的 y 方向偏振分量则有较大的反射损耗 γ_y 。对双纵模激光振荡,由于每个纵模又可能分裂为两个相互垂直的分量,就应有四个模可能振荡。设 E_1 和 E_2 分别为第 q 级纵模沿 x 方向和 y 方向偏振模 TEM_q^+ 和 TEM_q^- 的模幅, E_3 和 E_4 分别为第 $(q+1)$ 级纵模 $\text{TEM}_{(q+1)}^+$ 和 $\text{TEM}_{(q+1)}^-$ 的模幅,由 Lamb 理论^[5]:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 E_1^2 &= \alpha_1 - \gamma_x - \theta_{12} E_2^2 - \theta_{13} E_3^2 - \theta_{14} E_4^2, \\ \beta_2 E_2^2 &= \alpha_2 - \gamma_y - \theta_{21} E_1^2 - \theta_{23} E_3^2 - \theta_{24} E_4^2, \\ \beta_3 E_3^2 &= \alpha_3 - \gamma_x - \theta_{31} E_1^2 - \theta_{32} E_2^2 - \theta_{34} E_4^2, \\ \beta_4 E_4^2 &= \alpha_4 - \gamma_y - \theta_{41} E_1^2 - \theta_{42} E_2^2 - \theta_{43} E_3^2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 α_n 为单程非饱和净增益; $\beta_n E_n^2$ 是由于第 n 个模的存在引起的净增益的减小量; $\theta_{nm} E_m^2$ 是第 m 个模的存在对第 n 个模的相互作用引起的净增益的减小量; γ 为腔镜对相互垂直偏振成分的反射损耗。假定腔镜双折射较大,且双折射轴的方向是固定的, $\gamma_x < \gamma_y$ 。

模竞争效应是 θ 项引起的。这种竞争效应可以理解为由于其它模的增益饱和作用使得该模的净增益减小了,如果净增益小于零,那么该模将熄灭。以下分几种情况讨论。

(1) 两纵模之间为弱耦合的情况下,同级纵模内偏振方向的竞争效应

在两纵模之间的相互作用可忽略的情况下, $\theta_{13} \doteq \theta_{31} \doteq \theta_{41} \doteq \theta_{14} \doteq \theta_{23} \doteq \theta_{32} \doteq \theta_{24} \doteq \theta_{42} \doteq 0$ 。因为 $\Delta\nu$ 很小,所以 $E_1 \doteq E_2$, $E_3 \doteq E_4$ 。对 α_n 和 θ_{nm} 的具体表达式^[5]进行分析可知,在 $\Delta\nu$ 很小时, $\alpha_1 \doteq \alpha_2$, $\alpha_3 \doteq \alpha_4$; $\theta_{12} \doteq \theta_{21}$, $\theta_{34} \doteq \theta_{43}$, 那么由 (2) 可得每个模的净增益 α'_n 为

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_1 &= \alpha_1 - \gamma_x - \theta_{12} E_1^2, & \alpha'_2 &= \alpha_1 - \gamma_y - \theta_{12} E_1^2, \\ \alpha'_3 &= \alpha_3 - \gamma_x - \theta_{34} E_3^2, & \alpha'_4 &= \alpha_4 - \gamma_y - \theta_{34} E_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

因为 $\gamma_x < \gamma_y$, 由 (3) 式, $\alpha'_1 > \alpha'_2$, $\alpha'_3 > \alpha'_4$ 。因两偏振成分频差很小时,它们的竞争效应是非常激烈的,一般说来,总是只有优势模振荡。即 TEM_q^+ 和 TEM_{q+1}^+ 存在。总之,在不考虑两级纵模之间的相互作用时,一般说来,每个纵模总是只有一个偏振成分,其偏振方向沿着双折射轴的方向。单模运转是最简单的一个特例,这与文献 [6] 得到的结果相同,也与实验相符。

(2) 两级纵模之间的耦合不能忽略

一些研究指出^[1], 两级纵模之间偏振方向相互平行的模的耦合大于相互垂直偏振模的耦合。因此在考虑两级纵模中四个成分之间的相互作用时忽略相互垂直偏振成分之间的作用。即认为 $\theta_{14} \doteq \theta_{41} = \theta_{23} = \theta_{32} = 0$, 那么四个模的净增益 α'_n 为

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_1 &= \alpha_1 - \gamma_x - \theta_{12}E_2^2 - \theta_{13}E_3^2, & \alpha'_2 &= \alpha_2 - \gamma_y - \theta_{21}E_1^2 - \theta_{24}E_4^2, \\ \alpha'_3 &= \alpha_3 - \gamma_x - \theta_{31}E_1^2 - \theta_{34}E_4^2, & \alpha'_4 &= \alpha_4 - \gamma_y - \theta_{42}E_2^2 - \theta_{43}E_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(i) 设第 q 级纵模接近增益线形中心, 那么 E_1 和 E_2 大于 E_3 和 E_4 , 因此, α'_1 和 α'_2 主要由前三项决定。根据以上的分析, TEM_q^+ 为优势模。对第 $(q+1)$ 级纵模, α'_3 和 α'_4 分别为

$$\alpha'_3 = \alpha_3 - \gamma_x - \theta_{31}E_1^2 - \theta_{34}E_4^2, \quad \alpha'_4 = \alpha_4 - \gamma_y - \theta_{43}E_3^2. \quad (5)$$

若 $\alpha'_3 > \alpha'_4$, 则 TEM_{q+1}^+ 为优势模, 这时将出现两个纵模的偏振方向相互平行的状态。当两级纵模幅度相差较大时, 容易出现这种情况(图 1(a))。若 $\alpha'_3 < \alpha'_4$, 则 TEM_{q+1}^- 为优势模。若激光器腔长连续变化, 第 $(q+1)$ 级纵模幅度逐渐增大, 两成分的净增益由 $\alpha'_3 > \alpha'_4$ 变为 $\alpha'_3 < \alpha'_4$, 第 $(q+1)$ 级纵模的偏振方向将发生 $\pi/2$ 的跃变, 形成两级纵模偏振方向相互垂直的状态(图 1(b))。

(ii) 两级纵模相对于增益线型中心对称的情况

这时为中调谐, 根据 Lamb 理论, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$, $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E$, $\theta_{nm} = \theta_{mn}$ 。因为 θ 项与两模的间隔有关, 也与相互偏振方向有关, 所以在中调谐时, θ 值为三类值, 即

$$\left. \begin{aligned} \theta_{13} \doteq \theta_{31} \doteq \theta_{24} \doteq \theta_{42} &= \theta, \\ \theta_{14} \doteq \theta_{41} \doteq \theta_{23} \doteq \theta_{32} &= \theta', \\ \theta_{12} \doteq \theta_{21} \doteq \theta_{34} \doteq \theta_{43} &= \theta''. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因此, 四个模的净增益则为

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_1 &= \alpha - \gamma_x - E^2(\theta'' + \theta + \theta'), \\ \alpha'_2 &= \alpha - \gamma_y - E^2(\theta'' + \theta' + \theta), \\ \alpha'_3 &= \alpha - \gamma_x - E^2(\theta + \theta' + \theta''), \\ \alpha'_4 &= \alpha - \gamma_y - E^2(\theta' + \theta + \theta''). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可以看到, 由于模间相互作用所引起的四个模的净增益减小量是相等的, 只要满足 $E^2(\theta + \theta' + \theta'')$ 远大于反射损耗 γ_y , 那么, 四个模的净增益近似相等。一些研究证明, 处在对称位置时, 模之间的耦合是很强的, 以上的条件可能得到满足, 这时四个模都振荡。中调谐时模牵引和排斥量相等, 出现瞬态自锁现象, 因此这种状态很易被观测到(图 1(c))。

(iii) 假定第 q 级纵模远离中心线, 那么, E_3 和 E_4 大于 E_1 和 E_2 , 因此 (4) 式中 α'_3 和 α'_4 主要由前三项决定。这时第 $(q+1)$ 级纵模沿 x 方向偏振模 TEM_{q+1}^+ 为优势模。用上述同样的分析方法分析, 若两模由左向右偏离平衡位置, 虽然 $E_3 > E_1$, 但两者相差不大, 那么 $\alpha'_2 > \alpha'_1$, 即 TEM_q^- 为优势模。所以两模由左向右偏离平衡位置时, 两模将交换偏振方向(图 1(d))。偏振方向的突变也与模幅变化的历史情况有关, 当两模由左向右扫过平衡位置后出现了相互垂直的偏振态, 随着较弱模幅的减小, 它的竞争力随之减弱, 因此只能维持现状, 不会再发生偏振方向的反转。

(3) 反射损耗 γ_y 足够大的情况

若 γ_y 远大于模之间耦合引起的净增益的减小量, 由方程组 (2) 可知, 总是 TEM_q^+ 和

TEM_{q+1}⁺ 占优势,与振荡模在增益线形中的位置无关。在这种情况下,激光器将输出单一的线偏振光。

三、单一线偏振内腔激光器的可能性

激光器的应用总是要经过光学系统,虽然系统中可能无明显的偏振器件,但可能有或多或少起偏作用。实验表明,双纵模激光经偏振器后光强的最大起伏可能达到 50%。因此在有起偏作用的光学系统中,激光器本身较高的功率稳定性并无实际意义。另外,在激光的许多应用中,要求单一线偏振光作光源。当然半内腔或全外腔激光器可满足此要求。但是,布儒斯特窗的引入增加了腔的损耗,降低了输出功率。同时腔镜与管体分离,使用很不方便。要把它制成为方便的整体又增加了工艺过程中的困难。因此设法使内腔激光器输出单一的线偏振光是非常有意义的。

表 2 单一线偏振内腔激光器实验数据

Table 2 Experimental data of single linear polarization internal minor

激光器编号	腔结构	腔长 (mm)	输出模式		输出功率		功率稳定性	
			随机偏振	单一线偏振	随机偏振	单一线偏振	随机偏振	单一线偏振
#4	平凹	190	基模	基模	0.9	0.9	5.3%	5.8%
#5	平凹	190	基模	基模	1.1	1.2	6.5%	6.3%
#6	平凹	230	基模	基模	1.5	1.4	4.5%	4.6%
#7	平凹	230	TEM ₀₀ ⁺ TEM ₀₁	—	0.5	—	4.4%	—

部分实验结果列于表 2 中。实验表明:

(1) 只要使腔镜的双折射足够大就可使内腔基模激光器输出单一的线偏振光。所需双折射的大小随输出功率的增加而增加。对 1 mW 的激光器,由双折射引起的附加位相 Δ 大于 1.44×10^{-2} rad (相当于 $\Delta\nu$ 为 600 kHz) 即可满足要求。

(2) 平面镜比凹面镜容易得到较大的双折射量。工艺中应尽量使两腔镜的双折射轴平行。

(3) 增大腔镜双折射量不减小激光器的最大输出功率。当内腔激光器输出单一线偏振光时,不降低其功率稳定性。

(4) 增大腔镜双折射量不会改变原激光器的输出模式。具有高次横模的内腔激光器很难实现单一线偏振振荡。

应该说明的是,要使单一线偏振内腔 He-Ne 激光器成为实用的激光器,还需在制造工艺上深入研究。

姚玉兰、李宝珍同志协助了实验工作,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] E. K. Hasle et al.; *Opt Commun.*, 1979, **31**, No. 2 (Nov), 206.

- [2] P. N. Punalbekar *et al.*; *Opt. Commun.*, 1982, **41**, No. 3 (1 Apr), 191.
- [3] H. De Lang, G. Bouwhuis; *Phys. Lett.*, 1965, **19**, No. 6 (Dec), 482.
- [4] W. M. Doyle *et al.*; *J. O. S. A.*, 1965, **55**, No. 10 (Oct), 1221.
- [5] W. E. Lamb Jr.; *Phys. Rev.*, 1964, **134**, No. 6A (15 Jun), 1429.
- [6] R. A. J. Keijsers; *Opt. Commun.*, 1977, **23**, No. 2 (Nov), 194.

Competition effect of polarization in two-mode internal mirror He-Ne lasers

J. U. KECHENG BA ENXU AND ZHANG CHUNPIN

(Physics Department, Nankai University)

(Received 31 December 1982, revised 5 April 1983)

Abstract

Contrary to the earlier reports, the complicate polarization properties of two-mode internal mirror He-Ne lasers have been observed. The phenomena is explained by the anisotropy of the cavity and competition effect of the polarization direction.