

## 双纵模稳频氦氖激光器的光谱与频率复现性分析

张辉, 沈乃微

中国科学院物理研究所, 北京 100080

**摘要** 对双纵模稳频氦氖激光器的光谱及其频率复现性进行了理论估计, 进行了 633 nm 碘稳定氦氖激光器的拍频实验, 实验采用内腔激光器, 并采用双纵模稳频的方法, 通过观测激光器的两个偏振态互相垂直的相邻纵模的输出, 并使二者稳定到功率相等的参考点处, 获得激光稳定输出。实验通过观察双纵模稳定激光的模式输出, 分析了影响激光频率复现性与频率稳定度的因素, 测量了稳定激光的功率和频率稳定度。通过拍频测量, 对激光器的频率复现性进行了分析, 复现性用频差可以达到  $(1\sim 2)\times 10^{-8}$  量级。通过实验表明, 双纵模稳频氦氖激光器的频率复现性完全符合用于长度精密测量的稳频激光器的要求, 激光器可以很稳定地工作, 稳定度用阿伦偏差表示可以达到  $10^{-10}$  量级, 可以作为实用的稳频激光标准。

**主题词** 双纵模; 氦氖激光器

**中图分类号:** O443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2005)07-1009-04

### 引言

采用全内腔商品氦氖激光器作为实用的稳频激光标准, 是近年来的一个发展趋势<sup>[1-5]</sup>。当激光频率调谐到距中心偏离约 500 MHz 时, 激光出现双纵模振荡, 其相邻纵模输出的偏振方向相互垂直。激光输出后经偏振分光器可将两束不同偏振的激光束分离, 分别由性能相同的光电接收器检测, 转换成电压信号。在内腔激光器的玻璃外壳上绕以细金属丝, 通电后可使激光管加热, 激光管受温度变化而改变腔长。当通过金属丝加热使激光频率调谐时, 一束平行偏振光的功率增强, 另一束垂直偏振光的功率相应减弱。用两束激光的功率相等作为参考点, 来控制激光的腔长, 使腔长保持在双纵模功率相等的状态。

由于激光增益线中心是氦原子跃迁的中心频率, 可作为稳定频率的参考。上述两束激光的频率位于中心频率的对称两侧, 其频率也是相对恒定的。以上述腔长 140 mm 的全内腔氦氖激光器为例, 其纵模间隔为 1 070 MHz, 则两个纵模的频率与中心频率的频差可以保持在 535 MHz 的恒定位置。选用其中任何一束激光的输出, 均可达到频率稳定的结果。

由于上述双纵模氦氖激光器的输出功率可达 1 mW 左右, 因此选用任一束偏振激光的输出功率可达到 0.5 mW。若需增大稳频激光的输出功率, 可选用腔长 210 mm 内腔商品激光器。其输出总功率可大于 2.5 mW, 即每束稳频激光的输出功率约为 1.2 mW, 这时的纵模间隔约为 710 MHz。

通过偏振分束器输出的激光束, 其偏振方向是固定的,

即水平或垂直偏振的某一方向。但实现上述稳频时, 这一固定偏振激光的频率或高于中心频率, 或低于中心频率, 这是在实现稳频时无法预计的。因此在使用这种稳频激光器时, 应通过与碘稳定氦氖激光的拍频或其他方法确定其频率位置, 或使用其不同锁定状态时的平均值。因为两束激光稳频后频率的平均值就是激光的中心频率, 它是一个很好的频率参考。

### 1 双纵模稳频氦氖激光器的光谱与频率复现性的理论估计

上述 140 mm 的短腔激光器, 当激光双纵模处于增益线中心频率两侧对称位置时, 可以获得水平或垂直偏振的单模输出的光谱, 每个纵模的输出功率为 0.5 mW, 而在增益线中心频率处为单纵模输出的光谱, 输出功率为 1 mW。为了估算两个纵模的功率差与频率复现性的关系。假设在中心频率至两者对称位置的范围内, 激光功率与频率的变化曲线呈近似的线性关系, 约为  $500 \mu\text{W} \cdot (535 \text{ MHz})^{-1}$ , 即约  $1 \mu\text{W} \cdot (\text{MHz})^{-1}$  的量级。考虑到功率-频率曲线的非线性, 在功率稳定点的曲线斜率较大, 约可达  $2 \mu\text{W} \cdot (\text{MHz})^{-1}$  的量级。如要求相对频率复现性优于  $1 \times 10^{-8}$  的量级(相当于绝对频率的变化小于  $\pm 5 \text{ MHz}$ ), 功率变化应小于  $10 \mu\text{W}$ , 相当于激光总功率的 2% 的量级。如此类推, 若将功率变化保持小于  $\pm 0.2\%$  的范围内, 有可能使频率复现性达到  $1 \times 10^{-9}$  的量级。

美国 JILA 的 Hall 等人<sup>[6]</sup>采用这种方法研制的稳频氦氖激光器,经过多年的长期测量表明,在 1 个月内的短期频率复现性可达  $1 \times 10^{-9}$ 。稳定频率的年漂移量约为  $(2 \sim 3) \text{MHz}$  量级,相当于  $(4 \sim 6) \times 10^{-9}$ 。在标定其频率值后的半年至 1 年内,用线性内插的方法,可使其频率或波长的准确度保持在  $1 \times 10^{-9}$  以内。

我们在近年内也研制了这种稳频激光器,并进行了与 633 nm 碘稳定氦氖激光器的拍频实验,实验中采用的内腔激光器的腔长分别为 140 和 210 mm,单模输出功率分别达 0.5 和 1 mW。在 5 个月以上的测量表明,当两个纵模的功率差保持在 1% 以内,单频输出的频率复现性约为  $(1 \sim 2) \times 10^{-8}$  量级。上述实验和方法是在 633 nm 氦氖激光器上实现

的,原因是它在制作上比较方便,又使用品质很好的商品激光器。原则上,上述方法也能在其他波长的氦氖激光器上应用,例如 612 或 543 nm 氦氖激光器。由于它们的激光增益低于 633 nm 氦氖激光器,因此激光的单频输出功率略低,但频率稳定性和频率复现性均能达到相同的量级。

## 2 激光频率稳定的实施方案

双纵模激光器频率稳定的原理是:将两个相邻纵模通过偏振分光镜后的输出用光电接收器接收后,使两者稳定到功率相等的参考点处,则其相应的频率就可得到稳定。实施功率稳定的原理图如图 1 所示。

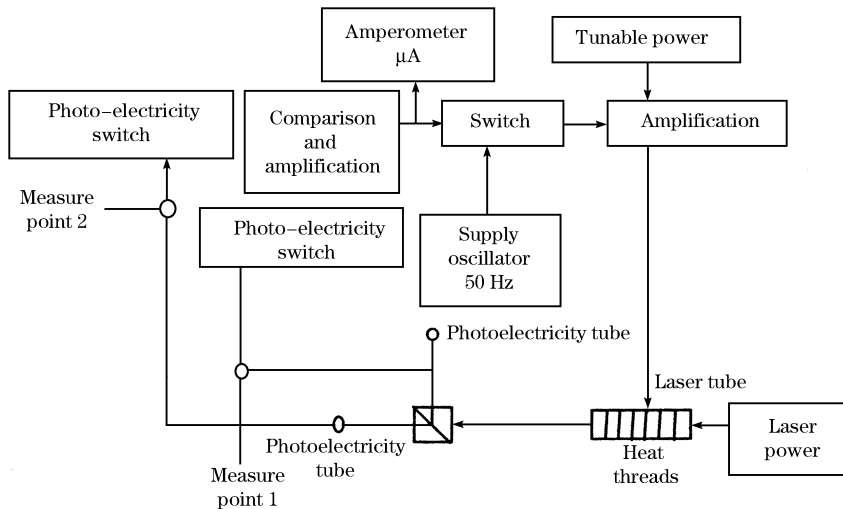


Fig. 1 The skeleton diagram for the laser frequency stabilization circuit

为了实现图 1 所示的稳定原理,在技术和工艺上有以下严格的要求:

A 商品型内腔激光器的严格要求;

激光器的管壳应具有很好的平直度,在加热膨胀过程中,产生横向畸变极小,相邻两纵模的偏振度很高,当平行偏振的功率为 100%,垂直偏振的功率接近于零,反之亦然。

B 热丝的加热不应使激光器产生横向畸变;

C 激光器偏振分光及两个光电接收器的一致性很好;

D 电路控制的精度很高。

## 3 双纵模稳定激光的实验观测

实验装置的配备如下。

(1)在激光器前设置一偏振分光棱镜,激光器通过棱镜后分成偏振面相互垂直的两束线偏振光;

(2)将激光器置于开环状态,在激光器加热丝加热的过程中,用功率计测量两束激光的输出功率的变化;若变化不明显,可将棱镜绕光束适当旋转,然后重复观测激光功率的变化,直至两束光的明暗变化反差很大,这时的观测结果应为:一束光的输出功率达到最大时,另一束光的输出功率达到最小(接近为零),反之亦然。

(3)在棱镜的位置确定后,激光器加热 20~30 min 后,将激光器的开环开关向上。

(4)将激光器置于开环状态重新加热,几次扫描周期后(这时的加热电压不变),然后重新锁定,此时指针应稳定在移向正方的某一位置。如果减小加热电压,则指针恢复到上述位置。实验记录在不同加热电压时的锁定指针的位置,可得出每束激光功率漂移及两者比值随加热电压的变化。由此可得激光功率随加热温度的变化,即在不同温度下锁定时的激光功率稳定参考点,这个参考点可通过拍频测量得到其频率参考值。

(5)在激光器置于锁定状态下,调整加热电压,表头指针随电压的减小而正向移动,这时的激光功率及两束激光功率比值均将发生变化。激光腔长在小于  $\lambda/2$  范围内变化时,相应的激光输出功率会产生变化,同时激光频率也产生相应的变化。功率-频率的变化关系可通过功率与拍频同步测量时获得,其中实验室的环境温度的变化也会影响测量结果。

由上述实验观测可以得到以下结论。

(1)激光器输出有两个确定的独立偏振态;

(2)每个偏振态激光束的输出功率随腔长作周期性变化,即腔长每伸长  $\lambda/2$ ,功率产生一次周期变化;

(3)激光输出功率与温度有关,并同时产生激光的频率

变化;

(4) 两束偏振光输出功率的比值与频率有单值关系, 在激光器处于热平衡状态时, 通过功率稳定的技术可以实现激光的频率稳定。

## 4 稳定激光的功率和频率稳定度测量

采用光电型功率计(其零点漂移应小于  $1 \mu\text{W}$ ) 测量每束偏振光的功率变化, 如果要进行长期观测, 可将功率计的输出口输入到微机中, 进行记录和计算其长期功率稳定度。

为了测定激光器在频率稳定后的频率变化, 必须建立一套拍频测量装置<sup>[7]</sup>, 用 633 nm 碘稳定 He-Ne 激光器来检测它们之间的差频变化。

按照国际惯例, 频率标准的频率稳定度按阿伦偏差计算, 其公式如下

$$\sigma_y(2, \tau) = \left[ \frac{1}{Nf^2} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta f_{2i} - \Delta f_{2i-1}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中  $f$  为被测激光频率值,  $\Delta f$  为用拍频方法测量的差频值。

## 5 频率复现性分析

频率复现性是指激光频率在不同时刻复现的频率范围。例如在测量的 1 天、1 周或 1 个月内, 通过拍频测量得到的频率平均值的变化范围。对于双纵模稳频氦氖激光而言, 通常频率复现性比频率稳定度要低 1~2 个量级。

实验中测量的阿伦偏差约为  $5 \times 10^{-10}$  量级, 而其频率复现性约为  $(1 \sim 2) \times 10^{-8}$  量级。

用于长度精密测量的稳频激光器, 对频率复现性要求为优于  $3 \times 10^{-8}$ , 因此, 双纵模稳频激光器完全符合这个要求。

频率稳定度和频率复现性是标志激光频率稳定的两个主要技术指标。频率稳定度反映激光在频率稳定时的短期起伏的程度, 频率复现性反映激光在频率稳定时的长期变化。在此基础上, 可以通过相对或绝对测量得到激光的频率或真空波长值。

频率稳定度和频率复现性的优劣与下列因素有关:

(1) 环境条件: 温度稳定的状况, 隔振的措施及周围的干扰情况等;

(2) 激光器的性能: 激光电源的噪声、激光光束的品质、激光管和隔离器的性能等;

(3) 电子伺服系统的控制性能: 控制的精度及保持的状态等;

(4) 操作和测量的技术。

通过对以下 3 个主要参数的控制, 我们可以将商品型氦

氖激光器的频率复现性达到  $\pm 1 \times 10^{-8}$  量级:

(1) 严格控制垂直偏振和水平偏振两个相邻纵模的功率比, 即可控制激光锁定在某个腔的稳定频率处;

(2) 控制激光热丝加热的温度, 通过测量热丝电阻值, 可精确得到它的温度值(精度可优于  $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), 温度每变化  $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 激光变化一个纵模, 精密控制热丝温度, 可以使激光频率锁定到固定的纵模数  $q$  上;

(3) 严格控制激光电源的电流值, 可以控制激光的增益。

**Table 1 The result of the experiment for the frequency stabilization degree and the frequency variety**

日期	取样时间 /s	平均阿伦偏差/ $10^{-10}$	平均值 /MHz	标准偏差 /MHz
2002-12-16	1	4~5	60.5	0.2~0.3
2003-01-06	1	5.2	61.20	0.2
2004-12-16				
2005-01-16	1	4~5	60.50	0.2~0.3

表 1 列出了我们研制的双纵模稳定激光器与 633 nm 碘稳定激光器的拍频测量结果。由此表可见, 用阿伦偏差表示的频率稳定度达  $10^{-10}$  量级, 用频差表示的频率复现性可达  $(1 \sim 2) \times 10^{-8}$  量级。

## 6 实验结论

通过以上介绍的测量结果, 我们已获得了频率复现性达到  $\pm 1 \times 10^{-8}$  的结果。这是经过几年研究的综合成果, 是在选用优质内腔商品型激光器、改善激光电源、分光系统和稳频电路等技术和工艺的基础上的结果。

上述成果是在恒温隔振的环境条件下, 并选择每台激光器的最佳锁定参考点, 将激光功率控制在  $\pm 0.05\%$  的范围内, 使激光频率复现性达到了  $\pm 1 \times 10^{-8}$  量级的要求, 通过与 633 nm 碘稳定激光的拍频测量, 可以长期监测它的频率变化。

这种稳频激光器的优点是:

(1) 采用商品型内型激光器, 简易可行;

(2) 采用容易制作的激光电源和稳频器, 使整个装置小型化, 便于搬运和配用;

(3) 频率稳定度和复现性达到了用于精密测量范畴的技术指标, 可以作为精密长度测量和精密波长测量的激光二级频标。与兰姆凹陷稳频激光器相比, 具有无调制和频率复现性高的优点。

## 参 考 文 献

- [1] Balhorn H, Kunzmann R, Lebowsky. *Appl. Opt.*, 1972, 11: 742.
- [2] Bennett S J, Ward R E, Wilson D C. *Appl. Opt.*, 1973, 12: 1406.
- [3] Sasaki A, Hayashi T. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1982, 21: 1455.
- [4] Yoshino T. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1980, 19: 2181.
- [5] Araki T, Nakajima Y, Suzuki N. *Appl. Opt.*, 1989, 28: 1525.
- [6] Yoon T H, Ye J, Hall J L, et al. *Appl. Phys. B*, 2001, 72: 221.
- [7] Shuko Yokoyama, Tsutomu Araki, Norihito Suzuki. *Appl. Opt.*, 1994, 33(3):358.

## Studies on the Spectrum and Frequency Repetition of Double-Mode He-Ne Laser with Frequency Stabilization

ZHANG Hui, SHEN Nai-zheng

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** Theoretical analysis of spectrum and frequency repetition of the double-mode frequency stabilization He-Ne laser has been done, and the beat frequency experiment using 632 nm  $I_2$  frequency stabilization He-Ne laser has been carried out. The authors used the intercavity laser, and the double mode frequency stabilization to get the laser stabilized output through adjusting the two neighbor vertically polarized modes to the equal power reference point. Through the experiment, the authors analyzed the factors which affect the laser frequency repetition and stabilization, and measured the stabilized laser power and the frequency stabilization. The beat frequency experiment has shown that the frequency repetition can reach  $(1-2) \times 10^{-8}$  by frequency difference, and the laser stabilization can reach  $10^{-10}$  by Allan variances. The experiments show that the stabilized laser can work well and can be used as frequency reference point.

**Keywords** Double-mode; He-Ne laser

(Received Jan. 8, 2005; accepted Mar. 26, 2005)