

一种新的激光稳频技术

吴义芳

(北京大学无线电电子学系)

在精密光学测量中,目前广泛使用的是633nm He-Ne 兰姆凹陷稳频或塞曼双频稳频激光器。它们是以激光工作物质本身谱线作参考,用其增益曲线通过检测光强获得误差信号来实现稳频的。稳频激光器的稳频性能用频率稳定性和频率再现性量度。频率稳定性一般用频率起伏量 $\Delta\nu$ 的相对值 $\Delta\nu/\nu_0$ 来表示, ν_0 是稳频参考频率, $\Delta\nu$ 最好用阿仑方差进行处理^[1]。因为 ν_0 会随激光管参数、稳频器工作参数变化,因此 ν_0 本身稳定与否便是衡量稳频激光器稳频性能的又一重要指标,本文将同一支激光管在使用期间 ν_0 的相对变化量 $\Delta\nu_0/\nu_0$ 定义为频率再现性。目前广泛使用的这两类稳频激光器的频率稳定性为 10^{-9} — 10^{-10} 量级,频率再现性仅为 1×10^{-7} ,即使在一天使用时间内也很难保持频率再现性在 1×10^{-8} 以内。由于再现性差,这两类稳频激光器往往不能满足某些精密测量的要求。本文将介绍一种通过检测频率获得误差信号的拍频稳频技术,采用这种稳频技术获得的频率稳定性达 10^{-10} — 10^{-11} 量级,半年时间内的频率再现性达 10^{-9} 量级^[2-5]。这种技术不但能满足精密光学测量的要求,还会在相干光通信技术中得到广泛应用。

一、塞曼激光拍频调谐特性

任何一种激光稳频器都要有一个稳定的参考频率 ν_0 和一个鉴频系统,一旦受控激光器的出射频率 ν 偏离 ν_0 时,鉴频系统能给出误差信号,继而使受控激光器频率作自动调整,直到 $\nu = \nu_0$ 。大家熟悉的兰姆凹陷稳频、塞曼激光双频稳频和碘饱和吸收稳频中的鉴频系统都是通过检测功率来获得误差信号的。本文给出的

物理

新的拍频稳频技术却是通过检测频率来获得误差信号的。为了便于讨论,我们先将塞曼激光拍频调谐特性^[4,6,7]概述如下:

1. 按照所加的磁场方向是垂直还是平行于激光管轴线可将塞曼激光分成横向塞曼激光和纵向塞曼激光。横向塞曼激光器出射频差为几十至几百 kHz 且彼此正交的两种线偏振光;纵向塞曼激光器出射频差为几百至几千 kHz 的左、右旋圆偏振光。

2. 对 He-Ne 激光满足 $J = 1 \rightarrow 2$ 的跃迁谱线说来,由频率牵引和频率推移效应给出的横向塞曼激光拍频调谐理论曲线^[8]如图1所

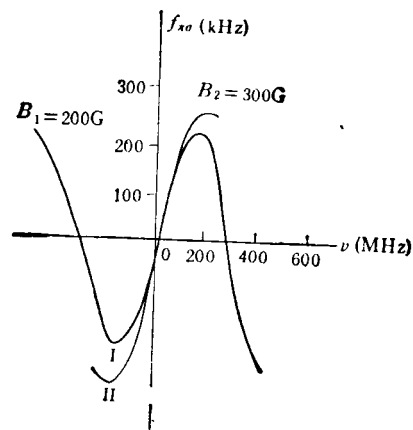


图1 横向塞曼激光拍频调谐曲线

示。从图1可以看出,拍频调谐曲线的形状随磁场变化,当磁场增加时,由有三个过零点的曲线 I 变成只有一个过零点的曲线 II,文献[2]称曲线 II 为 S 形曲线,S 形曲线的过零点刚好在腔中心调谐处。若激光器膜片为软膜片,在实验上因为不能测量负频率,故和曲线 II 相应的实测拍频曲线呈 V 形。

3. 纵向塞曼激光的拍频调谐曲线如图2所示。磁场较小时,拍频曲线是开口向上的抛物线

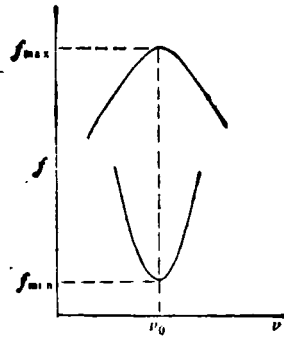


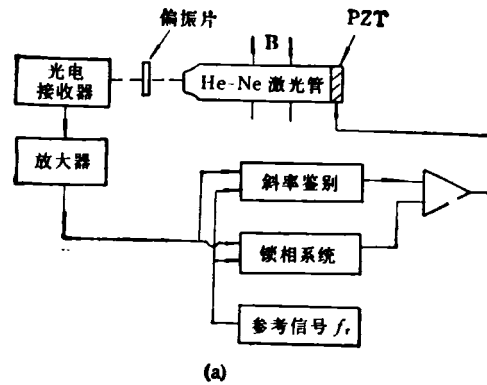
图2 纵向塞曼激光拍频调谐曲线

线,磁场值较大时是开口向下的抛物线,拍频极小值 f_{\min} 或极大值 f_{\max} 所在处的光频恰在腔中心调谐处。 f_{\min} (或 f_{\max}) 的数值和拍频曲线的二次斜率会随磁场和激光器工作参数变化,但有意思的是 f_{\min} (或 f_{\max}) 所在处的光频始终和零磁场原子谱线的中心频率对应。因此,在拍频稳频技术中,若选 f_{\min} 对应的光频率为稳频参考频率,其频率再现性一定会比较高。

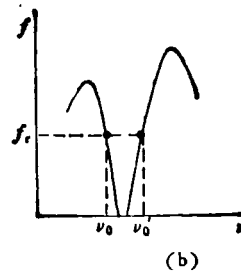
二、横向塞曼稳频激光器 (STZL)

图3示出的是一种带有锁相系统的横向塞曼稳频激光器 (STZL) 的方框图和原理图。激光器的拍频调谐曲线可以是S形曲线也可以是V形曲线,现以图3(b)所示的V形拍频调谐曲线为例说明其稳频原理,这时与一确定拍频值 f_r 对应的光频率可能有两个,但是他们对应的拍频曲线的斜率符号相反,如果能鉴别出拍频曲线斜率的正负,则和某一拍频值对应的光频率只有一个,这个频率将作为稳定频率的参考点。

首先选择一参考频率 f_r ,用斜率鉴别装置选择斜率的正或负(例如选择负斜率),于是在图3(b)的拍频曲线中和 f_r 相对应的光频率为 ν_0 。如果稳激光器的出射频率 ν 不等于 ν_0 ,拍频 f 和 f_r 的差值 Δf 将不为零;当 $\Delta f = 0$ 时, $f = f_r$, $\nu = \nu_0$, Δf 可作为误差信号,经过频率-电压变换和放大后推动执行元件 PZT 调节腔长直至激光频率稳定在 ν_0 附近。这种稳频方法的关键是通过稳定拍频而稳定光频。稳频时因



(a)



(b)

图3 (a) 带有锁相系统的 STZL 方框图;
(b) STZL 稳频原理图

为一无调制二又采用了锁相技术,所以用这种方法获得的 STZL 的频率稳定度高达 2×10^{-11} (取样时间 1s),同一支管子使用半年的频率再现性达 5×10^{-9} [4]。

N. Umeda 等人 [2] 利用腔镜双折射效应使拍频调谐曲线呈完整 S 形。他们利用 S 形曲线采用锁频技术并用风扇为执行元件获得频率稳定度为 3×10^{-10} (取样时间 0.1—100 s) 的稳频激光。这是用控温方法调节腔长的,优点是激光管材料可用普通玻璃,而且取样时间较长时(例如 100s)也能获得较高的频率稳定度,缺点是对外界的快速干扰调节能力较差。

三、纵向塞曼稳频激光器 (SLZL)

根据对参考频率 ν_0 的不同选择,可有两种稳频方法。

方法一:选择与 f_{\min} (或 f_{\max}) 对应的光频率 ν_0 为稳频参考频率(见图1),为了能检测频率必须对激光频率加一调制,即要用一矩形方

波调制激光腔长, 因此激光频率 ν 和拍频频率 f 都将随调制信号而变化. 令 f_+ , f_- 分别表示正负两半调制周期内的拍频频率, 不难看出仅在正负两半周期内的腔频频率对称于 ν_0 时, f_+ 和 f_- 的差值 Δf 才等于零, 否则 Δf 不等于零. 于是, 可用 Δf 作为反映光频 ν 偏离 ν_0 的误差信号. 将此信号经频率-电压变换和放大后, 反锁到激光管的 PZT 上 (如文献[5]) 或反锁到缠绕在激光管的热丝线圈上 (如文献[3]), 控制腔长变化, 直至 $\nu = \nu_0$. 采用这种方法稳频的频率稳定度为 2×10^{-10} (取样时间 1—10s), 频率再现性为 2×10^{-9} (两个月).

方法二: 纵向塞曼激光拍频调谐曲线是如图 2 所示的抛物线, 抛物线的两支曲线斜率符号相反, 因此图 3 给出的用于横向塞曼激光稳频的伺服系统也可用于纵向塞曼激光稳频. 稳频参考频率 ν_0 和横向塞曼激光稳频一样是选择和某一拍频 f_r 对应的光频率. 与方法一比较, 它的突出优点是激光无调制, 因此频率稳定度也高达 2×10^{-11} (取样时间 1s), 但频率再现性稍差, 为 1×10^{-8} (1月).

四、频率稳定性和频率再现性的讨论

由上述可知, 采用拍频稳频技术稳频其稳频性能优于功率稳频技术稳频, 各项指标可提高一至二个数量级. 下面讨论稳频性能提高的原因.

频率稳定度的提高从原理上说是由于拍频调谐曲线即鉴频曲线的斜率较大, 以致有一小的误差信号便可获得大的调整能力. 当然伺服电路的性能也会影响频率稳定度, 无调制时的频率稳定度就比有调制时高.

频率再现性的提高主要是因为这种稳频技术所用的稳频参考频率 ν_0 比较稳定, 并且 ν_0 对激光管参数和稳频器工作参数的变化不敏感. 如前所述, 用检测功率方法稳频时, 其鉴频曲线是增益曲线, 增益曲线的形状、位置容易随激光管充气压、分压比、放电电流等参数变化, 因此兰姆凹陷点 (采用检测功率方法稳频的频率参

考点) 的频移较大. 拍频稳频技术用的鉴频曲线是拍频调谐曲线, 理论分析表明^[7,8], 那些直接影响增益曲线位置、形状的因素只是通过频率牵引和推移效应间接影响拍频调谐曲线, 这正是拍频稳频激光器频率再现性高的原因.

在上面介绍的几种拍频稳频技术中, 为什么又以选择和 f_{\min} 对应的光频率为参考频率的纵向塞曼稳频激光的频率再现性最高呢? 由图 4 给出不同磁场对应的纵向塞曼激光拍频调

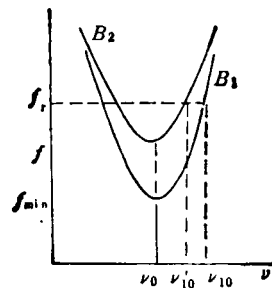


图 4 SLZL 的参考频率随磁场变化示意图

谐曲线可看出, 当磁场值变化时, 虽然 f_{\min} 的数值和曲线的二次斜率都发生变化, 但和 f_{\min} 对应的光频值 ν_0 却不变, 因此和 f_{\min} 对应的 ν_0 是个很稳定的频率参考点. 如果选任一固定的 f_r 对应的光频率为稳频参考频率, 在用伺服环路锁定拍频 $f = f_r$ 后, 如果磁场发生了变化 (例如由 B_1 变成 B_2), 由图 5 看出拍频曲线将发生移动, 虽然 f 仍等于 f_r , 但稳频参考频率已从 ν_{10} 变成 ν'_{10} 了. 随着稳频参考频率的移动, 频率再现性自然要降低. 但是值得指出的是, 由于方法二无调制, 故在一些实际应用中这种稳频方法可能是首先选用的方法.

五、两台激光器的偏频锁定

前面几节介绍的是一台激光器独立运转时的频率稳定, 下面介绍如何运用拍频稳频技术同时实现两台激光器的频率稳定并保持两者光频频差恒定. 这种稳频技术因为两台稳频激光器之间有着固定频差而又称为偏频锁定技术. 图 5 是偏频锁定系统原理方框图. 设 STZL₁ 的

