

633nm 激光波长标准装置

宋金城¹ 郝昕宇² 杨 墨³

(1. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076;
3. 北华航天工业学院, 廊坊 065000)

摘 要 介绍了几种常见的激光稳频技术, 分析了基于饱和蒸汽压的碘稳定 633nm He-Ne 激光系统。激光器的腔长为 260 mm, 输出功率为 0.8 mW, 激光调谐范围能够覆盖从 a 到 n 的 14 个吸收峰。通过实验, 其频率的相对标准不确定度优于 2.5×10^{-11} , 1 000 s 的频率稳定度优于 6×10^{-12} 。

关键词 激光器 稳频技术 饱和吸收 标准装置

633 nm Laser Wave-Length Standard Equipment

SONG Jin-cheng¹ HAO Xin-yu² YANG Mo³

(1. Beijing Aerospace Institute for Metrology Technology, Beijing 100076; 2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076; 3. North China Institute of Aerospace Engineering, LangFang 065000)

Abstract Some common techniques of frequency stabilization for laser are introduced and the He-Ne stabilized Laser at 633 nm with an saturated iodine vapor cell is analyzed. The length of the laser cavity is 260 mm and the output power is about 0.8 mW. The range of the laser frequency is over 14 components from a to n . The relative standard uncertainty of the laser frequency is 2.5×10^{-11} and the frequency stability at 1 000s is 6×10^{-12} .

Key words Laser Technique of frequency stabilization Saturation absorb Standard equipment

1 引 言

目前, 激光波长作为基本测尺已经越来越多的应用到各种参量的精密测量领域, 如: 位移、平面度、粗糙度、振动、重力加速度等参量的测量。在无线电领域, 石英晶体的频率稳定度技术指标直接影响到计时的准确性, 与之类似, 激光波长的正确与否与激光频率直接相关。为了达到精密测量的目的, 必须使波长的变化不超过某确定值, 从而也就引出了激光器的稳频技术。

2 激光稳频技术概述

引起激光频率变化的原因很多, 除了加宽机制的影响之外, 主要是环境对激光装置的影响, 主要环境因素有:

a) 环境温度的影响: 设激光谐振腔体材料的线膨胀系数为 α_t , 温度偏离标准温度 Δt 时腔长变化量为 $\Delta t \cdot \alpha_t$;

b) 振动的影响: 激光器安装在机械底座上, 当外界振动从机械底座传导至激光器底座时, 由于机

械耦合而引起感应腔长变化。一般,通过实验可得到振动对腔长变化的影响;

c) 大气的影 响:大气中温度、湿度、压力等因素的变化都会引起折射率的变化,这种关系可以由埃德伦公式给出,其误差可以达到 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 。

2.1 兰姆凹陷稳频技术

兰姆凹陷稳频激光以激光功率曲线的兰姆凹陷中心所对应的频率 ν_0 作为控制系统的参考频率。其调制信号对应的光强输出波形如图 1 所示。

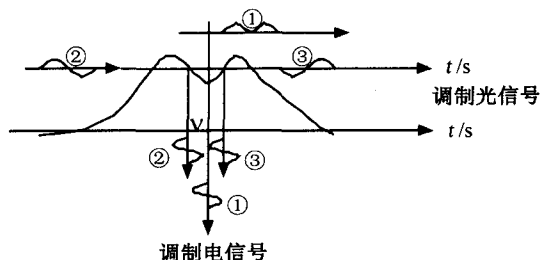


图 1 兰姆凹陷稳频调制电信号与调制光信号波形图

激光的输出功率为

$$I = F(\nu) + K \sin \omega t$$

式中: ν ——激光频率; $F(\nu)$ ——功率曲线; ω ——调制频率; K ——调制幅度。

通常,与兰姆凹陷的宽度相比 K 是很小的,经过适当处理,得

$$I(\nu) = F(\nu) - KF'(\nu) \sin(\omega t)$$

式中: $KF'(\nu) \sin(\omega t)$ ——代表因光频调制产生的附加项。

当激光频率 $\nu = \nu_0$ 时,输出光强按图 1①变化,它的基频为 $2\omega_0$,不能通过选频放大器,整流器无输出,对应的激光谐振腔长度不做调整,此时,激光器工作在期望状态;当激光频率 $\nu > \nu_0$ 时,输出光强按图 1②变化,其基频为 ω_0 ,且与调制电信号同向;当激光频率 $\nu < \nu_0$ 时,输出光强按图 1③变化,基频为 ω_0 ,但相位与调制电信号反相。对于激光频率偏离参考频率的情况,整流器输出控制电压信号,驱动压电陶瓷作相应变化,使谐振腔腔长作相应调整,达到稳定在参考频率点 ν_0 的目的。

2.2 塞曼效应稳频技术

原子或分子的能级在外磁场作用下会分裂成多个能级的现象称为塞曼效应。在 He-Ne 激光器加上外磁场后,其谱线会产生分裂,形成与原谱线对称的左旋和右旋偏振光,理论状态下这两种偏振光光强相等,而其强度和等于原谱线强度。当激光频率偏

离理想状态时,两偏振光会出现光强差,以此光强差为控制信号,通过光电转换、选频放大、检波和直流放大等电路得到相应的控制电压信号,驱动压电陶瓷伸长缩短,使谐振腔腔长作相应调整,达到稳频的目的。

2.3 干涉腔法稳频技术

这种方法采用极低线膨胀系数材料制造谐振腔的腔体,并利用谐振腔的高品质因数 Q 的特点,即:

$Q = \frac{\nu_0}{\Delta\nu}$,所以,谐振腔的透射峰很窄,而且很稳定,可以用它稳定激光频率。

2.4 饱和吸收法稳频技术

饱和吸收法稳频是在激光器腔内或腔外增设一吸收池,在池内充进吸收中心频率与激光跃迁中心频率重合的介质,此时,激光器输出光的频谱如图 2 所示,此频谱与兰姆凹陷相反,因此,又称为反兰姆凹陷。由于反兰姆凹陷的宽度比兰姆凹陷的宽度窄,所以中心频率两侧曲线的斜率比兰姆凹陷曲线的斜率大,这样就可以减小搜索信号幅度以提高频率的稳定性;同时,由于吸收线中心频率极为稳定,所以使饱和吸收法获得了很高的长期频率稳定度。因此,国际米定义咨询委员会早在 1973 年就推荐分别用甲烷和碘饱和蒸汽吸收法稳定的 He-Ne 激光器发射的 $3.39 \mu\text{m}$ 和 $0.6328 \mu\text{m}$ 激光波长作为长度计量的基准。

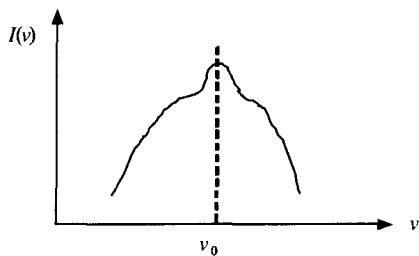
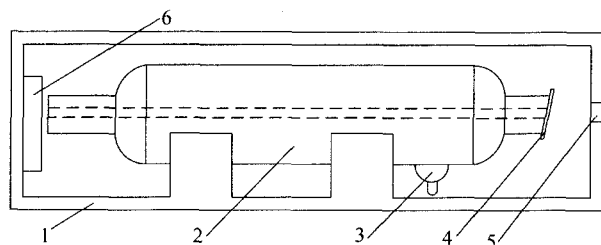


图 2 饱和吸收法输出光功率谱图

3 $^{127}\text{I}_2$ 饱和吸收 He-Ne 激光器

由 $^{127}\text{I}_2$ 饱和吸收稳定的 He-Ne 激光器结构原理图如图 3 所示,主体结构由半内腔结构的 He-Ne 激光增益管、石英玻璃间隔器、 $^{127}\text{I}_2$ 分子吸收室、带压电陶瓷的谐振腔镜及其相应的调节机构组成。激光器腔长为 260 mm ,吸收室经过特殊工艺处理,吸收室内充以饱和蒸汽压的 $^{127}\text{I}_2$ 分子蒸汽,激光输出功率为 0.8 mW 。



1 - 激光器底座; 2 - 激光谐振腔; 3 - 碘室; 4 - 布儒斯特窗;
5 - 激光出光孔; 6 - 腔长控制单元

图3 碘稳频 He-Ne 激光器结构示意图

$^{127}\text{I}_2$ 在 Ne 的 633 nm 线的多普勒宽度中具有 11-5 带 R(127) 支的超精细结构吸收线 21 条, 把碘的低气压吸收室放在 He-Ne 激光器的谐振腔内, 它与强驻波光场相互作用, 会产生饱和吸收共振, 改变谐振腔的频率, 在激光输出功率曲线上, 会出现与吸收线中心相对应的反兰姆凹陷, 直接检测反兰姆凹陷是很困难的, 常用的方法是, 利用相敏检波电路检测其微分信号。由于倾斜背景的影响, 一次微分电压零点发生了偏移, 不宜作为鉴别信号, 二次微分电压吸收峰中心轴对称, 不能用作鉴别信号, 三次微分信号代替一次微分信号, 能有效的消除倾斜背景的影响, 可以保证激光频率的高稳定性, 其吸收峰曲线及微分示意图如图 4 所示。

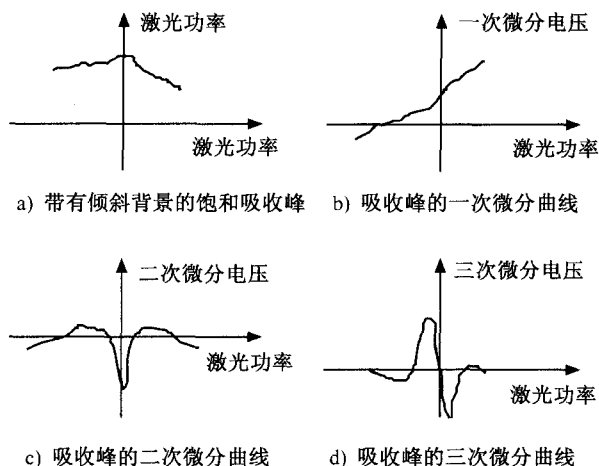


图4 吸收峰及微分曲线示意图

伺服系统主要由相敏检波和频率信号发生器等部分组成, 其伺服原理框图如图 5 所示。可在激光频率的增益范围内搜寻并识别所需要频率的吸收峰, 在一个饱和吸收峰的区域, 当激光频率扫过吸收峰的任意一侧时, 让系统启动闭环控制功能, 将 3f 带通滤波器输出信号进行处理, 通过 3f 相敏检波器

检出误差信号, 给腔长控制单元, 控制压电陶瓷伸缩调节激光谐振腔腔长, 使激光辐射频率锁定到位于吸收峰顶端的频率上。

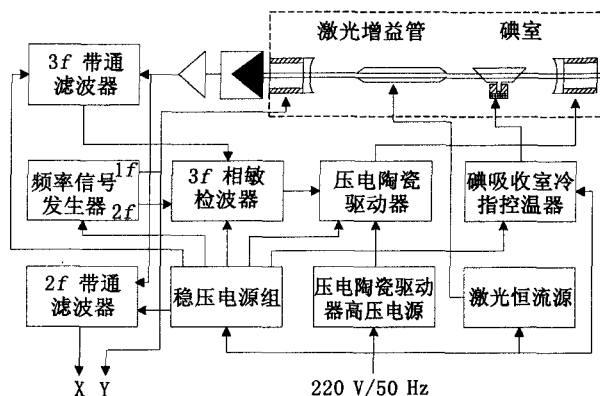


图5 633 nm 碘分子吸收 He-Ne 激光稳频原理图

图 6 所示为扫描激光频率时, 得到的饱和吸收峰的三次微分曲线。频率从左到右依次降低。在 633 nm 波长附近, 共有可作为频率参考标准的 $^{127}\text{I}_2$ 分子 11-5 带 R(127) 支的饱和吸收峰 21 个, 本系统能够覆盖其中的 14 个 (a ~ n)。

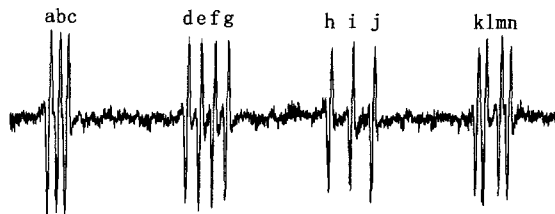


图6 饱和吸收峰的三次微分曲线图

4 拍频测量实验及数据处理

为了验证激光波长标准装置的稳频准确度, 对装置进行拍频测量实验, 比对激光采用中国计量科学研究院的激光波长副基准。对 d, e, f, g 四个饱和吸收峰进行平均频差测量实验, 结果如表 1 所示,

表1 吸收峰 f 与 d, e, g 之间的频率间隔值
及其与 CIPM 推荐值的比较 kHz

吸收峰	CIPM 推荐值	实测值	差值
$ f(f) - f(d) $	26 224	26 222	-2
$ f(f) - f(e) $	13 363	13 363	0
$ f(f) - f(g) $	13 198	13 196	-2

(下转第 13 页)

表 1 测量结果 mm

测量次数	A 边长度	B 边长度	C 边长度	D 边长度	中心弯曲度 $\times 10^{-2}$	边弯曲度 $\times 10^{-2}$	翘曲度 $\times 10^{-2}$
1	299.439	299.856	299.592	299.656	-0.202	0.402	-0.155
2	299.368	299.835	299.561	299.634	-0.184	0.390	-0.148
3	299.399	299.897	299.568	299.611	-0.200	0.401	-0.159

参考文献

[1] 邢希东等. 建筑装饰材料尺寸偏差的计算机视觉检测系统[J]. 山东陶瓷. 2002,25(4).

[2] 贾超广等. 高速摄影测量系统中双相机同步技术的实现[J]. 测绘科学技术学报. 2009,26.

[3] P. Cerveri, N. A. Borghese, A. Pedotti. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control point of unknown coordinates [J]. Journal of Biomechanics. 1998,31.

[4] HARTLEY R I. In defense of the eight-point algorithm [J]. IEEE PAMI. 1997,19(6).

[5] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京科学出版社, 2002.

[6] 贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理研究方法研究[J]. 北京航空航天大学学报. 2003, 2009 (7).

[7] 胡斌等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. 计算机工程与应用. 2002,11.

[8] STEGER. C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1998,20(2).

[9] 贾云得. 机器视觉. 科学出版社, 2002.

[10] 卢卫君, 方丽菁. Hessian 矩阵的若干应用. 桂林工学院学报. 2007.

[11] 陈厚道等. 一种基于极线约束的激光条纹匹配算法. 激光技术. 2003,27(6).

(上接第 8 页)

测量结果表明,以 CIPM 的推荐值为参照,相对于饱和吸收峰 f 而言,在饱和吸收峰 d 和 g 均存在 2 kHz 的频率偏移量,与推荐值相符的范围在 4.2×10^{-12} 之内;饱和吸收峰 e 相对于推荐值的频率偏移量为零。由此证明,对上述四个饱和吸收峰而言,其频率间隔与 CIPM 的推荐值能够很好地符合。频率稳定度的测量结果为: 2×10^{-11} (1 s), 5×10^{-12} (10 s), 4×10^{-12} (100 s), 6×10^{-12} (1 000 s); 平均偏差 1.2×10^{-11} 。其频差随时间变化曲线如图 7 所示。

5 结束语

633 nm 碘稳定氦氛激光器是将激光频率稳定在碘饱和吸收谱线的超精细分量上,每个碘吸收分量的谱线宽度约为 4 MHz。在实现频率稳定时,可以将激光频率锁定在碘谱线宽度的几千分之一以内,比对频率的变化量约为 5 kHz,即约为 1×10^{-11} 量级。在规范规定的运转条件下,由于物理原因产生的各种频移可控制在 10 kHz 范围内,因此其复现性可达 $\pm 2.5 \times 10^{-11}$ 。

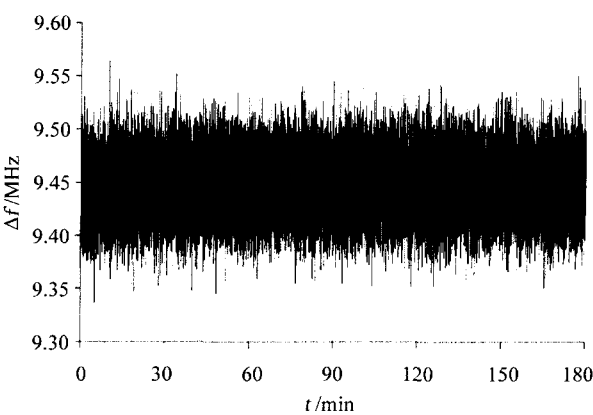


图 7 两台激光锁定后,频差随时间变化曲线图
(0.1 s 采样时间)

参考文献

[1] 刘敬海, 徐荣甫. 激光器件与技术. 北京理工大学出版社, 1995.

[2] 朱若谷. 激光应用技术. 国防工业出版社, 2006.