



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 353—2006

633nm 稳频激光器

633nm Frequency Stabilized Lasers

2006-03-08 发布

2006-09-08 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

633nm 稳频激光器检定规程

Verification Regulation of
633nm Frequency Stabilized Lasers

JJG 353—2006
代替 JJG 353—1994

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2006 年 3 月 8 日批准，并自 2006 年 9 月 8 日起施行。

归 口 单 位：全国几何量长度计量技术委员会

起 草 单 位：中国计量科学研究院

本规程委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 被检 633nm 稳频激光器的稳频原理概述	(2)
4 计量性能要求	(2)
4.1 被检 633nm 稳频激光器的平均频率值和真空波长值	(2)
4.2 被检 633nm 稳频激光波长的相对扩展不确定度	(2)
4.3 相对频率稳定度	(3)
5 通用技术要求	(3)
5.1 标志	(3)
5.2 技术资料	(3)
5.3 结构和外观	(3)
5.4 功能键	(3)
6 计量器具控制	(3)
6.1 检定条件	(3)
6.2 检定项目	(4)
6.3 检定方法	(4)
6.4 检定结果的处理	(7)
6.5 检定周期	(7)
附录 A 检定原始记录格式	(8)
附录 B 检定证书(内页)格式	(9)
附录 C 检定结果通知书(内页)格式	(10)
附录 D 各种稳频激光器的简介	(11)
附录 E 不同干涉仪光源的波长相对扩展不确定度	(12)
附录 F 兰姆凹陷激光器的相对深度	(13)

633nm 稳频激光器检定规程

米是国际单位制 (SI) 中的基本长度单位。1983 年 10 月第 17 届国际计量大会 (CGPM) 通过了现行的米定义, 即“米是光于真空中, 在 $1/299792458$ 秒的时间间隔内传播的程长”。同时废除了原有米定义。现行米定义有三种复现方法:

—— $l = c \cdot t$, 即先测量平面电磁波在真空中距离 l 上传播时所需的时间 t , 然后由 $c \cdot t$ 可求出被测长度 l ;

—— $\lambda = \frac{c}{f}$, 即测量平面电磁波的频率 f , 然后由 $\frac{c}{f}$ 求出真空波长 λ , 将 λ 作为长度标准;

——直接引用国际计量委员会推荐的 12 条激光辐射谱线 (详见引用文献) 所对应的真空波长值或频率值, 并按给定的不确定度使用。

本规程采用上述的第三种方法, 并选择稳定在碘分子饱和吸收谱线上的 633nm He-Ne 激光波长作为测量标准。

1992 年国际计量大会规定 633nm 激光波长基准的相对标准不确定度为 2.5×10^{-11} 。

长度计量中作为各级基标准的激光干涉仪, 都是依据其光源的发射波长来计算被测长度值的。作为干涉仪光源的各种稳频激光器, 其输出激光波长 (频率) 特性的稳定可靠是保证干涉仪正常运转的基本工作条件。

1 范围

本规程适用于不同类型的稳频 633nm 激光器的首次检定和后续检定。适用于各种稳频 633nm 激光器输出波长的真空波长 (频率) 值的量值溯源和不同取样时间间隔的频率稳定度的测量。

经检定合格的 633nm 稳频激光器能够作为基标准装置的干涉仪光源用于国家级、省 (部) 级和企业、事业单位的各种检定、校准装置的干涉测量系统中。

2 引用文献

本规程引用下列文献:

Documents Concerning the New Definition of the Meter, Metrologia, 19 (1984) 163.
(关于新米定义的文件, 计量, 19 卷 (1984) 163 页。)

Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992), Metrologia, 30 (1994) 523.
(米定义的实现方法 (1992), 计量, 30 卷 (1994) 523 页。)

Practical Realization of the Definition of the Metre (1997), Metrologia, 36 (1997) 211.

(米定义的实现方法 (1997), 计量, 36 卷 (1997) 211 页。)

3 被检 633nm 稳频激光器的稳频原理概述

在自由运转时,一台普通的 He-Ne 激光器,其输出激光的真空波长(频率)可能在整个增益范围(约 1500MHz)内变化,其相对不确定度在 10^{-6} 量级。为满足干涉测量的需要,通常需要采取一定的技术措施对激光器进行控制,以达到稳定激光频率(或波长)的目的。采用不同的方法对激光器输出的激光(激光器输出的激光以下简称激光)进行频率控制,得到的结果也有一定的差异。通常被检定的稳频激光器有:实用型 633nm 碘分子饱和吸收稳频激光器、双纵模稳频激光器、兰姆凹陷稳频激光器和塞曼效应稳频激光器等,其简介见附录 D。

633nm 碘分子饱和吸收稳频激光器可用于诸如一等量块干涉仪、激光绝对重力仪等对测量不确定度要求较高的干涉测量系统中。其他 633nm 稳频激光器作为波长标准主要用于各种不同的干涉测量系统中。这些干涉测量系统,根据不同情况,有的用作国内各级政府计量部门的相关计量标准装置,有的用作企、事业单位的相关工作计量装置。

4 计量性能要求

稳频激光器输出的激光波长(激光器输出的激光波长以下简称激光波长)的相对标准不确定度是衡量稳频激光器计量性能的最主要的技术指标。在不同用途的测量装置中,对 633nm 稳频激光波长的相对标准不确定度范围的要求差异是很大的。

4.1 被检 633nm 稳频激光器的平均频率值和真空波长值

被检 633nm 稳频激光器的平均频率值应在 $(473610551.9 \sim 473614014.6)$ MHz 之间,

被检 633nm 稳频激光器的真空波长值应在 $(632.9889926 \sim 632.9936206)$ nm 之间。

4.2 被检 633nm 稳频激光波长的相对扩展不确定度

633nm 稳频激光器用作工作基准器具干涉仪光源、计量标准器具干涉仪光源、工作计量器具干涉仪光源时,其波长的相对扩展不确定度差异是很大的。实际应用时,633nm 稳频激光波长的相对扩展不确定度通常取包含因子 $k=2$ 。基于不同原理稳频的激光器,对其激光波长的相对扩展不确定度的要求如表 1 所示。

表 1 不同稳频方法的激光波长相对扩展不确定度

名 称	相对扩展不确定度
碘饱和吸收稳频激光器	$\leq 5 \times 10^{-10}$
双纵模稳频激光器	$\leq 7 \times 10^{-8}$
塞曼效应稳频激光器	$\leq 7 \times 10^{-8}$
兰姆凹陷稳频激光器	$\leq 7 \times 10^{-8}$
其他稳频方法的稳频激光器	$\leq 7 \times 10^{-8}$

4.3 相对频率稳定度

不同稳频方法的激光器，不同取样时间其输出激光的频率稳定度要求见表 2。

表 2 不同稳频方法的激光器不同取样时间输出激光的频率稳定度

	0.1s	1s	10s	100s	1000s
碘饱和吸收稳频激光器	$\leq 5 \times 10^{-10}$	$\leq 1 \times 10^{-10}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$
双纵模稳频激光器	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$
塞曼效应稳频激光器	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$
兰姆凹陷稳频激光器	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$
其他稳频方法的稳频激光器	$\leq 3 \times 10^{-8}$	$\leq 3 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$

5 通用技术要求

5.1 标志

被检 633nm 稳频激光器应具有标明其名称、型号、生产厂家和出厂编号等标志的标牌。

5.2 技术资料

被检 633nm 稳频激光器应附有生产厂家提供的产品合格证、计量性能的技术说明书和有关附件。复检激光器应附有上一次的检定证书。

5.3 结构和外观

被检 633nm 稳频激光器的结构应具有一定的整体性，其操作应简便可靠。外观不能有影响工作性能的损伤。

5.4 功能键

被检 633nm 稳频激光器的各种开关、按键等标志清楚。开关、按键等应接触良好并工作正常。

6 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定和后续检定。

首次检定在常规检定的基础上增加一项复现性测量。

具体测量方法为第一次测量完成后，被检仪器需冷却不少于 12h，再进行第二次测量。根据两次不同时间的测量结果，给出检定结果的相对扩展不确定度。

后续检定应根据当前测量结果，并考虑当前测量结果与上周期测量结果的重复性，给出检定结果的相对扩展不确定度。

6.1 检定条件

6.1.1 环境条件

实验室环境温度应在 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ 范围内，检定时的温度波动应小于 0.5°C ，相对湿度 $\leq 65\% \text{RH}$ 。

被检的稳频激光器在检定实验室内平衡温度的时间不得少于 12h。

6.1.2 检定设备

检定设备为 633nm He-Ne 碘稳频国家长度基准、碘稳频国家长度副基准装置和碘稳频长度实用标准。

作为国家长度基标准装置的碘稳频 633nm He-Ne 激光器, 检定开始前需预热 3h 以上, 以保证连续锁定时间。

作为拍频系统组成部分的前置放大器、频率计数器、频谱分析仪的响应带宽应不小于 1GHz。

6.2 检定项目

检定项目见表 3。

表 3 检定项目表

序号	检定项目	检定类别	
		首次检定	后续检定
1	外观	+	+
2	平均真空波长(频率)值	+	+
3	不同取样时间的相对频率稳定度的测量	+	+
4	不同时间的复现性测量	+	-
5	当前结果与前一次检定结果比较	-	+

注：“+”表示应检定项目，“-”表示非检定项目。

6.3 检定方法

6.3.1 633nm 稳频激光的平均真空波长(频率)值

拍频测量方法。

6.3.1.1 拍频系统的组成

当参考激光和被检 633nm 稳频激光的频率(或波长)相近、两束光波前重合且彼此间光的振动方向的投影不为零时, 即形成拍频。两者之频率差为拍的频率。用这一方法对激光频率(或波长)进行的测量, 即是拍频测量。其中, 参考激光器的辐射频率(或波长)应为已知。

测量光路如图 1 所示, 启动被检稳频激光器电源及控制系统电源, 根据仪器的要求进行预热。将 633nm He-Ne 碘稳频基标准激光器作为参考激光器。调整被检稳频激光器与参考激光器的输出光束, 使两束激光完全重合, 经波前重合后的两束激光产生频差信号 Δf 。根据频差信号, 在被推荐的碘分子饱和吸收峰中, 选择合适(避免零频差)的分量, 作为参考激光的锁定频率。光信号进入带有宽带放大器的快速响应探测器得到相应的拍频信号, 该信号进入频谱分析仪和带有标准接口功能的频率计数器, 计算机通过接口采集并处理数据。频率计数器的取样时间为 0.1s, 连续进行 3h 测量, 计算机计

算 3h 内测量数据的算术平均值,求得平均频差 Δf 。最后,根据公式计算出 3h 内的被检 633nm 稳频激光的平均真空波长(频率)值。

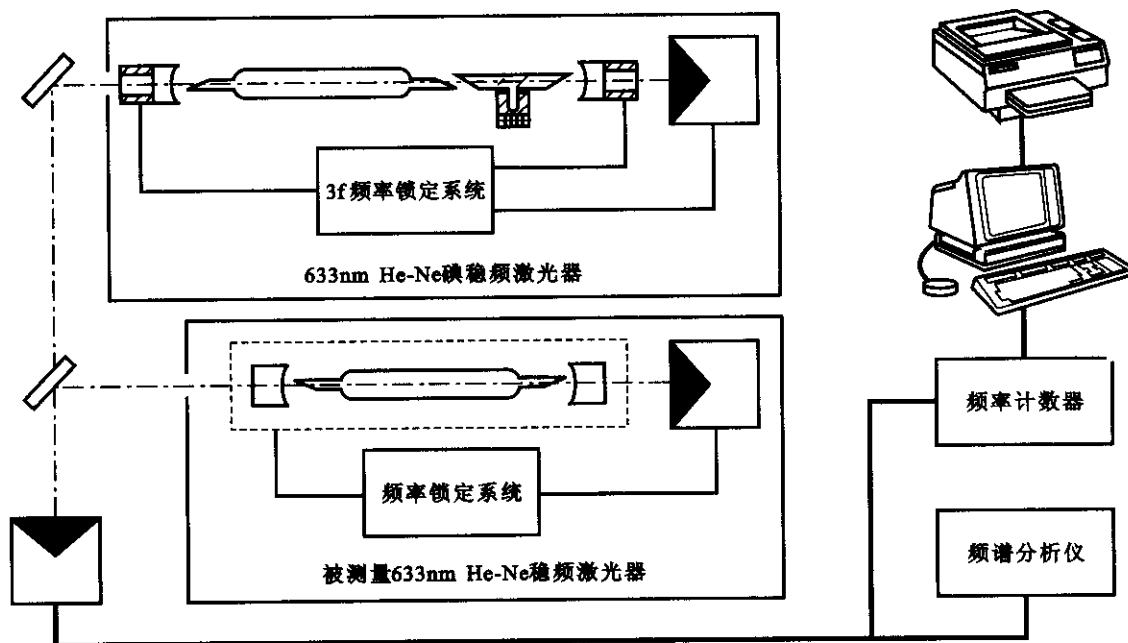


图1 测量光路图

6.3.1.2 实用型 633nm 碘分子饱和吸收稳频激光器

测量光路如图1所示,实用型 633nm 碘分子饱和吸收稳频激光器需预热 2h 左右,调节压电陶瓷驱动电压,将被检激光锁定于待测碘稳频吸收峰上。将 633nm He - Ne 碘稳频基标准激光器作为参考激光器。调整被检碘稳频激光器与参考激光器的输出光束,使两束激光完全重合后,经波前重合后的两束激光产生频差信号 Δf 。测量过程同 6.3.1.1。

6.3.1.3 其他 633nm 稳频激光器

测量光路如图1所示,633nm 稳频激光器按说明书要求的预热时间预热并锁定。调整测量步骤同 6.3.1.1。

6.3.1.4 被检 633nm 稳频激光的平均频率值和真空波长值计算

被检 633nm 稳频激光在测量时间内的平均频率和平均真空波长值表述分别为

$$f_x = f_s + \Delta \bar{f} \quad (1)$$

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} \quad (2)$$

式中: f_x ——被检 633nm 稳频激光的平均频率值;

λ_x ——被检 633nm 稳频激光的平均真空波长值;

c ——真空中的光速值;

$\Delta \bar{f}$ ——测量时间内被检 633nm 稳频激光与参考激光的平均频差;

f_s ——碘分子吸收峰的跃迁频率所对应的频率值,碘分子吸收峰可以为国际计量委员会推荐的 21 个中的任意一个。

6.3.2 被检 633nm 稳频激光的平均频率值的相对扩展不确定度的计算

被检 633nm 稳频激光的平均频率值的不确定度主要有三部分，分别是测量方法引入的不确定度、测量仪器引入的不确定度和被检激光的波长复现性引入的不确定度。被检 633nm 稳频激光的平均频率值的相对标准不确定度的计算由 (2) 式得：

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} \approx \lambda_s - \frac{\Delta f}{c} \lambda_s^2 \quad (3)$$

$$u_c^2(\lambda_x) = \left(1 - 2\lambda_s \cdot \frac{\Delta f}{c}\right)^2 \cdot u^2(\lambda_s) + \left(\frac{\lambda_s^2}{c}\right)^2 \cdot u^2(\Delta f) \quad (4)$$

式中： $u_c(\lambda_x)$ ——被检 633nm 稳频激光的真空波长值的标准不确定度；

$u(\lambda_s)$ ——参考激光的真空波长值的标准不确定度；

$u(\Delta f)$ ——测量平均频差的标准不确定度。

在 (4) 式中，对于第一项，参考激光波长的相对标准不确定度是 2.5×10^{-11} ，则参考激光波长的标准不确定度 $u(\lambda_s) = \lambda_s \cdot 2.5 \times 10^{-11}$ ；对于第二项，被检 633nm 稳频激光波长的检测方法，与参考激光波长的自校准方法原理相同，故由测量方法引入的标准不确定度可以忽略；其二，频率计数器的最大误差值为 1Hz，相对低频而言，其测量不确定度为 10^{-11} 量级，由其引入误差可以忽略；其三，被检 633nm 稳频激光波长的相对变化范围，根据不同的稳频原理，在 10^{-11} 量级之间；因此，最终的结果是，与被检激光波长自身的相对变化相比较，由前两项因素引入的不确定度可以忽略。综上所述，被检 633nm 稳频激光波长的标准不确定度为

$$u_c(\lambda_x) = \frac{\lambda_s^2}{c} u(\Delta f) \quad (5)$$

实验中，将 (5) 式看作测量时间 t 内的平均频率，由此得出被检 633nm 稳频激光波长的相对标准不确定度

$$u_{cr}(\lambda_x) = \frac{u_c(\lambda_x)}{\lambda_x} \quad (6)$$

对于首次检定其重复性测量结果应满足表 1 和表 2 的要求。对于后续检定应考虑被检激光前一年的检定结果，给出对应的被检 633nm 稳频激光波长的相对扩展不确定度，该不确定度也应该满足表 1 和表 2 的要求。

6.3.3 不同取样时间的激光相对频率稳定度的测量

被检 633nm 稳频激光相对频率稳定度的测量是和激光真空波长（频率）的测量同步完成的，取样时间分别取 0.1s、1s、10s、100s 和 1000s。不同取样时间的相对频率稳定度 σ 用阿伦方差评估：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)f^2} \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2} \quad (7)$$

式中： σ ——相对频率稳定度；

N ——总测量次数；

f ——被检激光在测量时间内的平均频率；

Δf_i ——一定取样时间内，被检激光与参考激光第 i 次测量时的平均频差。

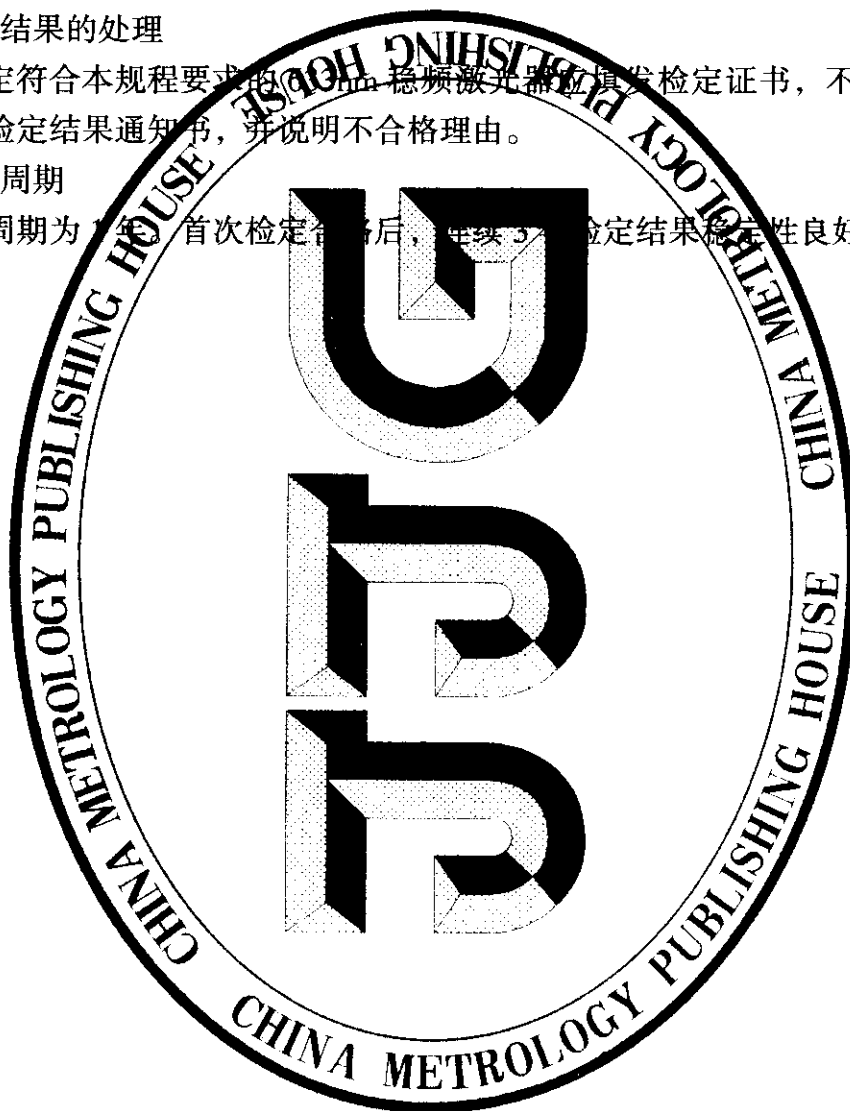
将采集到的激光频率值（取样时间为 0.1s），依采集的先后顺序以每 10 个为一组，求出每组的算术平均值，作为取样时间为 1s 的激光平均频率值。依此类推，如果将每组中的数据依次设定为 100 个、1000 个、10000 个就可以分别得到取样时间为 10s、100s 和 1000s 的平均频率值。根据（8）式，可计算出不同取样时间的激光相对频率稳定度。

6.4 检定结果的处理

经检定符合本规程要求的 0.01μm 稳频激光器应填发检定证书，不符合本规程要求的应填发检定结果通知书，并说明不合格理由。

6.5 检定周期

检定周期为 1 年。首次检定合格后，连续 3 次检定结果稳定性良好的检定周期可延至 2 年。



附录 A

检定原始记录格式

证书编号：

送 检 单 位		联 系 人	
地 址 / 邮 编		电 话	
样 品 信 息	样 品 名 称	规 格 型 号	
	生 产 厂 家	仪 器 编 号	
	出 厂 日 期	送 检 日 期	
	外 观 检 查		
检 定 条 件	基 标 准 名 称		
	基 标 准 编 号	不 确 定 度	
	检 定 依 据	环 境 湿 度	RH%
	基 标 准 证 书 编 号	环 境 温 度	℃
测 量 结 果	结 果 文 件 名	选 择 分 量	
	检 定 地 点		
	1. 测量时间 (小时) 内的平均真空波长值 (频率): $\lambda_x =$ $f_x =$		
	2. 前一年检定结果 (对于首次检定不同日期的另一次测量): $\lambda'_x =$		
	3. 相对扩展不确定度:		
	4. 相对频率稳定度: 0.1s: 1s: 10s: 100s: 1000s:		
备 注			
检 定 日 期	年 月 日	有 效 日 期	年 月 日

检定员：

核验员：

附录 B

检定证书（内页）格式

证书编号：

检 定 结 果

1. 测量时间（ 小时）内的平均真空波长（频率）值：

 $\lambda =$ nm ($f =$ MHz)

2. 测量时间（ 小时）内的频率稳定度：

0.1 秒取样时间：

1 秒取样时间：

10 秒取样时间：

100 秒取样时间：

1000 秒取样时间：

3. 平均真空波长扩展不确定度： $U(\lambda) =$ ($k = 2$)

检定员：

核验员：

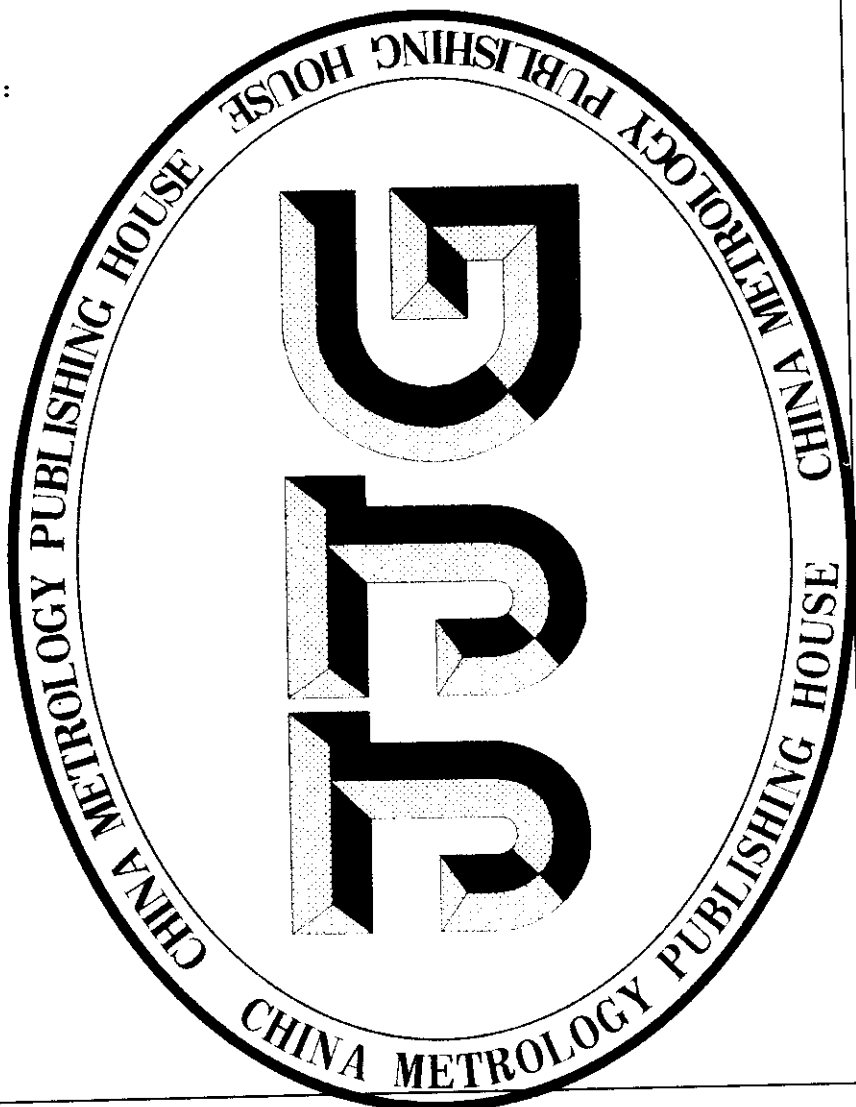
附录 C

检定结果通知书（内页）格式

证书编号：

检 定 结 果

不合格理由：



检定员：

核验员：

附录 D

各种稳频激光器的简介

D.1 碘分子饱和吸收稳频激光器

D.1.1 原理:

以 $^{127}\text{I}_2$ 分子饱和吸收谱线的 11-5 带 R (127) 支的超精细结构分量为光频参考标准, 利用三次谐波锁定技术实现激光频率 (或波长) 的控制。

D.1.2 构成:

碘分子饱和吸收稳频激光器主要是由 633nm He-Ne 激光器、碘分子饱和吸收室和频率控制系统组成。

D.2 双纵模稳频激光器

D.2.1 原理:

通过电子系统控制相邻纵模间的功率差, 使激光的两纵模处于平衡状态, 实现控制激光频率 (或波长) 稳定的目的。

D.2.2 构造:

双纵模稳频激光器, 主要是由 633nm He-Ne 双纵模激光器和控制系统两部分构成。

D.3 兰姆凹陷稳频激光器

D.3.1 原理:

以激光输出功率曲线上的兰姆凹陷中心作为光频参考标准, 利用一次谐波锁定技术实现激光频率 (或波长) 的稳定。

D.3.2 构造:

兰姆凹陷稳频激光器主要由 633nm He-Ne 兰姆凹陷激光器和控制系统组成。

D.4 塞曼效应稳频激光器

D.4.1 原理:

以输出激光谱线的中心作为光频参考标准, 利用纵向塞曼效应产生的左旋光和右旋光的功率平衡技术实现激光频率 (或波长) 的稳定。

D.4.2 构造:

塞曼效应稳频激光器主要由 633nm 塞曼效应 He-Ne 激光器和频率控制系统组成。

D.5 其他方法稳频的激光器

随着科学技术的发展, 对不同用途的稳频激光器提出了不同的要求, 并出现了一些新的稳频方法, 但不管用什么方法稳频, 都应使波长不确定度达到相应的水平, 以满足系统对测量不确定度指标的要求。

附录 E

不同干涉仪光源的波长相对扩展不确定度

当稳频激光器作为下列工作基准装置和计量标准装置的光源时,波长的相对扩展不确定度应满足下列要求。

E.1 用于工作基准的激光干涉仪光源

E.1.1 激光干涉比长仪

激光波长的相对扩展不确定度: $U(\lambda) = 7 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-9}$ ($k=2$)

E.1.2 量块长度测量仪

激光波长的相对扩展不确定度: $U(\lambda) = 7 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-10}$ ($k=2$)

E.1.3 洛氏硬度国家基准

激光波长的相对扩展不确定度: $U(\lambda) = 7 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-9}$ ($k=2$)

E.1.4 国家振动基准

激光波长的相对扩展不确定度: $U(\lambda) = 7 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-9}$ ($k=2$)

E.1.5 激光小角度测量仪

激光波长的相对扩展不确定度: $U(\lambda) = 7 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-9}$ ($k=2$)

E.1.6 圆锥量规测量仪

激光波长的相对扩展不确定度: $U(\lambda) = 7 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-9}$ ($k=2$)

E.2 用于计量标准器具的激光干涉仪光源

激光波长的相对扩展不确定度根据要求: $\leq 3.5 \times 10^{-7}$ ($k=2$)

E.3 用于工作计量器具的激光干涉仪光源

激光波长的相对扩展不确定度根据要求: $\leq 3.5 \times 10^{-7}$ ($k=2$)

附录 F

兰姆凹陷激光器的相对深度

对使用兰姆凹陷稳频激光器的用户, 兰姆凹陷深度相对幅度的大小对激光器的稳频效果有直接影响, 正常工作状态下兰姆凹陷深度应 $\geq 8\%$ 。

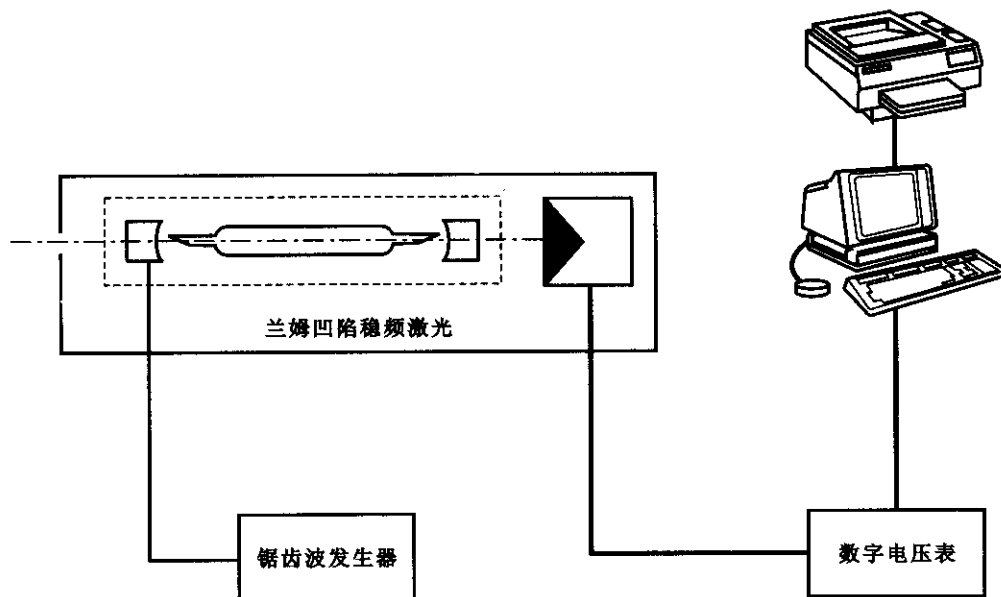


图 F.1 兰姆凹陷激光器的相对深度测量

采用图 F.1 所示测量装置, 控制系统的直流放大器输出接口接示波器或计算机 488 接口, 启动激光器电源及控制系统电源, 待预热半个小时后, 调节压电陶瓷驱动电压, 观察示波器, 读出凹陷点输出功率 $V_{\min}$ 及两个极大值点输出功率 $V_{\max1}$ 和 $V_{\max2}$, 按公式(F.2)计算出兰姆凹陷点的相对深度 h :

$$V_{\max} = \frac{V_{\max1} + V_{\max2}}{2} \quad (\text{F.1})$$

$$h = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100\% \quad (\text{F.2})$$

式中: $V_{\min}$ ——兰姆凹陷最低点电压值;
 $V_{\max1}$ ——兰姆凹陷左边最大电压值;
 $V_{\max2}$ ——兰姆凹陷右边最大电压值。