

## 633 nm 激光波长基准/副基准比对

钱 进<sup>1</sup>, 刘秀英<sup>1</sup>, 黄晓荣<sup>2</sup>, 张志权<sup>3</sup>, 石春英<sup>1</sup>, 谭慧萍<sup>1</sup>,  
辛 鸣<sup>2</sup>, 王捍平<sup>1</sup>, 蔡 山<sup>1</sup>, 刘忠有<sup>1</sup>, 张小平<sup>1</sup>

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100013; 2. 中国测试技术研究院, 四川 成都 610021;  
3. 长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 对中国计量科学研究院、中国计量测试技术研究院和长城计量测试技术研究所的 633 nm<sup>127</sup>I<sub>2</sub> 饱和吸收稳定激光波长基准、副基准进行了比对, 这是首次进行的国内长度基准的比对。比对实验的内容包括频率稳定度测量、频差测量和相关的位移参数测量等。给出了以国际计量局 BIPM C1 为参考的比对结果。

**关键词:** 计量学; 波长基准; 稳定激光器; 复现米定义; 不确定度

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2008)4A-0127-04

## Comparison Between the <sup>127</sup>I<sub>2</sub> Stabilized He - Ne Lasers Wavelength Standards at 633 nm

QIAN Jin<sup>1</sup>, LIU Xiu-ying<sup>1</sup>, HUANG Xiao-rong<sup>2</sup>,  
ZHANG Zhi-quan<sup>3</sup>, SHI Chun-ying<sup>1</sup>, TAN Hui-ping<sup>1</sup>, XIN Ming<sup>2</sup>,  
WANG Han-ping<sup>1</sup>, CAI Shan<sup>1</sup>, LIU Zhong-you<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ping<sup>1</sup>

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China; 2. National Institute of Measurement & Testing Technology, Chengdu, Sichuan 610021, China; 3. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** A comparison between NIM, NIMTT and CIMM He - Ne lasers stabilized to saturated absorption lines of <sup>127</sup>I<sub>2</sub> at  $\lambda = 633$  nm was carried out, which is the first internal comparison of the wavelength standards. The measurement includes frequency stability, frequency difference and sensitivity coefficients. The results relative to the BIPM C1 are given.

**Key words:** Metrology; Wavelength Standard; Stabilized Laser; Meter definition realization; Uncertainty

### 1 引 言

1983年, 国际计量委员会(CIPM)推荐将频率稳定的激光辐射波长作为复现米定义的标准<sup>[1]</sup>。此后, 根据国际上各实验室的研究和测量结果, 1992年 CIPM 重新规定了稳定激光系统的运行条件和主要技术参数, 并给出了对应的频率值、波长值及其不确定度指标<sup>[2]</sup>。在此基础上, 2001年, CIPM 向世界

各国推荐了现行的技术参数和运行条件<sup>[3]</sup>。

在 CIPM 推荐的复现米定义的若干标准谱线中, 碘稳定的 633 nm 激光波长标准是目前世界上实用性强、影响面和应用面广的长度基准。目前我国现行有效的 633 nm 国家长度基准和副基准装置分布在三个院所。其中, 基准装置保存在中国计量科学研究院(NIM), 副基准装置分别保存在中国测试技术研究院(NIMTT)和长城计量测试技术研究所(CIMM)。NIM 于 2006 年首次在国内组织了 633

收稿日期: 2008-05-23; 修回日期: 2008-06-04

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局 2005 年计量标准国内比对项目(JBZBD0501)。

作者简介: 钱进(1957-), 男, 安徽颍上人, 中国计量科学研究院研究员, 主要从事激光波长基准的研究。qianjin@nim.ac.cn

nm<sup>127</sup>I<sub>2</sub> 稳定激光波长基准、副基准的比对工作。

共有四套装置参加了比对实验。其中 NIM 两套, NIMTT 和 CIMM 各一套。由于装置技术条件和实验室环境条件的限制, 比对实验在 NIM 和 NIMTT 分 3 次进行。

## 2 实验条件

在此次实验中, 参加比对的所有基准装置均采

用 3 次谐波(以下简称 3f)锁定技术, 激光频率稳定到<sup>127</sup>I<sub>2</sub> 分子吸收谱线的 11-5 带 R(127) 的超精细结构吸收分量上。按照要求, 有关参数和运行条件应与 CIPM 所推荐的条件相一致。

实际情况是, 由于比对实验中基准装置(以下简称激光系统)建立的年代和研制的单位不同, 它们在不同技术参数和组成的细节方面存在较大差异, 因此, 其中的一些技术参数与推荐条件有一定出入。表 1 中列出了这些激光系统的主要工作参数。

表 1 激光系统的主要工作参数

院所	激光系统	腔长/mm	腔镜曲率半径及透射率				碘室		调制频率/kHz
			/mm	(%)	/mm	(%)	长度/mm	气压/Pa	
NIM	D1	300	500	0.5	1000*	1.3*	100	400	1.04
NIM	C4	260	600	1.1	∞*	1.8*	90	400	1.04
CIMM	No.02	230	600	0.4	∞*	1.2*	90	400	1.04
NIMTT	NIMTT-1	365	—	—	—	—	110	—	0.406

\* 为碘室一侧的反射镜的参数

## 3 测量原理和方法

测量实验的原理和装置如图 1 所示。参考激光分别为 D1 和 C4, 其辐射激光的频率值由国际比对确定。实验中将参考激光和被测激光的频率之差确定后即可得到被测激光的频率值。

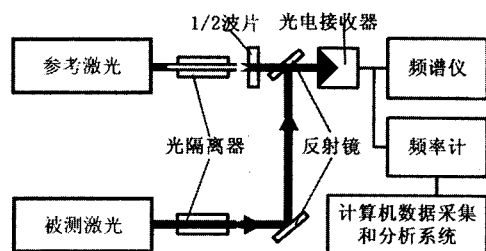


图 1 拍频测量原理

对<sup>127</sup>I<sub>2</sub> 分子吸收谱线的 11-5 带 R(127) 的超精细结构分量, CIPM 共推荐了 20 条谱线, 其中常用的是 d、e、f、g、h、i、j 7 个分量, 此次比对只涉及其中的前 4 个分量。为了得到每两个激光系统之间的平均频差值 and 它的变化情况, 实验采取 4 阶矩阵测量的方式进行。

### 4.3 实验安排

比对实验时间共计为 15 天, 先后在 NIM 和 NIMTT 完成。D1 与 C4 和 No.02 的比对在 NIM 进行, C4 和 NIMTT-1 的比对在 NIMTT 进行。分别以 D1 和 C4 作为参考激光, No.02 和 NIMTT-1 作为被测激光。比对过程中, 除了对相关激光系统的频率稳定度和平均频差进行测量外, 还对影响光频绝对值的功率位移和调制位移参数进行了测量实验。其中每两个激光系统之间的平均频差测量每天完成 2 组, 上、下午各进行一次。

作为参考激光的 D1, 其光频的绝对值源于 BIPM 组织的国际比对<sup>[4]</sup>。

## 5 比对结果

### 5.1 频率稳定度

稳定激光的频率稳定度用阿伦方差进行评估。

根据拍频测量的实验数据, 分别选取采样时间

## 4 实验内容

### 4.1 频率稳定度测量

参照图 1 所示测量原理, 对激光系统进行了频率稳定度的测量实验。每次频率稳定度测量时间需要 3 h 以上, 测量结果分别用不同取样时间的阿伦方差表示。

### 4.2 频差测量

为 0.1 s、1 s、10 s、100 s 和 1 000 s,得到的不同采样时间的频率稳定度测量结果见表 2。

表 2 不同采样时间的频率稳定度测量结果

激光系统	D1/C4	D1/No.02	C4/NIMTT-1
0.1 s	$2.7 \times 10^{-11}$	$3.3 \times 10^{-11}$	$2.2 \times 10^{-10}$
1 s	$7.7 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-11}$	$4.2 \times 10^{-11}$
10 s	$2.4 \times 10^{-12}$	$3.4 \times 10^{-12}$	$1.2 \times 10^{-11}$
100 s	$7.8 \times 10^{-13}$	$1.1 \times 10^{-12}$	$4.9 \times 10^{-12}$
1 000 s	$2.5 \times 10^{-13}$	$3.6 \times 10^{-13}$	$2.5 \times 10^{-12}$

5.2 位移参数测量

对于一个碘稳定的 He-Ne 激光系统而言,激光频率的调制宽度、碘室的冷指温度以及腔内单程功率的改变都会引起输出激光频率的变化。这 3 个参数分别被称为调制位移参数、温度位移参数(比未对此参数进行测量实验)和功率位移参数。位移参数的测量实验就是为了确定这些参数而设置的。

位移参数的测量原理及基本过程与平均频差测量类似。不同的是,在测量过程中需要通过相关参数的改变,得到被测激光的频率变化。将二者的变化量进行比较,就可确定该位移参数。

以调制位移参数测量为例,按图 1 所示原理调整光路,其中:激光系统 A 作为参考激光,激光系统 B 作为被测激光。前者的各项参数固定不变,依次选择后者的调制宽度为 4 MHz、5 MHz、6 MHz、7 MHz 和 8 MHz。按照与上述频差测量完全相同的方法和步骤,得到对应于不同调制宽度的平均频差。将频差的变化量与调制宽度的变化量进行比较,最终得到被测激光系统的调制位移参数。测量结果见表 3。

表 3 激光系统位移参数

位移参数	激光系统			
	D1	C4	No.02	NIMTT-1
温度位移(kHz/K)	-11.39	—	—	—
调制位移(kHz/MHz)	-8.55	-8.89	-7.4	—
功率位移(kHz/ $\mu$ W)	-0.20	-0.15	-0.10	—

因为 NIMTT-1 的调制信号宽度和冷指温度均不可调并且输出激光功率只有 15  $\mu$ W,故未对其进行上述位移参数的测量。

5.3 激光系统间的平均频差及其标准偏差

为了考察激光系统的光频复现性,频差测量实验连续进行 5 天。由于 NIMTT-1 的激光输出功率偏小,系统锁定困难,实验中其调制信号宽度设定为

10 MHz 左右。并且,由于该激光系统的碘室冷指的控温环节采用被动控温的方式,温度变化范围较大,不符合国际推荐条件的要求。除此之外,其他激光系统的运行条件均符合国际推荐条件的要求。测量结果见表 4。表 4 中所列激光系统之间的平均频差( $f_A - f_B$ )及其标准偏差结果由 10 组实验数据的平均值得到。

表 4 平均频差及其标准偏差 /kHz

$f_A - f_B$	D1 (A)	NIMTT-1 (A)
C4(B)	-7.4 $\sigma = 1.7$	11.3 $\sigma = 4.6$
No.02(B)	-4.8 $\sigma = 1.6$	—

根据 D1 与国际计量局的飞秒光梳装置 BIPMC1 得到绝对频率比推荐值低 8.9 kHz 的频差关系<sup>[4]</sup>,得出各个激光系统与国际计量局推荐值的频差值结果见表 5。

表 5 各激光系统频差的比对结果 /kHz

激光系统	D1	C4	No.02	NIMTT-1
$\Delta f$	-8.9	-1.5	-4.1	+9.8
$\sigma$	1.9	1.7	1.6	4.6

注: $\Delta f$  = 测量结果 - 推荐值

6 结 论

15 天内共进行了 30 次平均频差的测量实验。图 2 是根据平均频差测量的原始数据绘制的折线图,纵坐标为激光系统输出激光频率与国际推荐频率值的差值。D1 输出激光的频率值直接溯源于国际计量局。

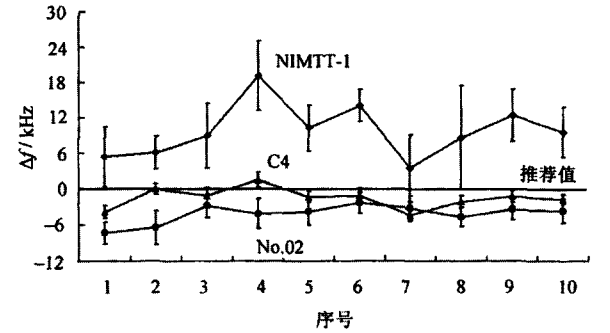


图 2 各激光系统输出频率的测量结果

图 2 显示,在参加比对的激光系统中,C4 和 No.02,其输出激光频率的变化范围在  $2.5 \times 10^{-11}$  之

间;由于激光系统 NIMTT-1 的测量结果的发散性较大,部分结果超出了该变化范围。综合上述情况可以得出如下结论:参加比对的激光系统的不确定度 $\leq 5.0 \times 10^{-11}$ 。

[参 考 文 献]

- [1] CCDM, CGPM. Documents Concerning the New Definition of the Meter [J], *Metrologia*, 1984, 19(4): 163 ~ 178.
- [2] Quinn T J. Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992)[J]. *Metrologia*, 1994, 30(5): 523 ~ 541.
- [3] Quinn T J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) [J]. *Metrologia*, 2003, 40(2): 103 ~ 133.
- [4] Robertsson L, Zucco M, Ma L-S, *et al.* Results from the CII-2004 campaign at the BIPM of the BIPM.L-K11 ongoing key comparison[J]. *Metrologia*, 2005, 42.