

# 多重游标标准具

陈红兵 高军毅 龚知本

(中国科学院安徽光机所, 合肥 230031)

**提要** 提出了用多重游标标准具 VET (Vernier Etalon) 测量连续可调谐激光器输出波长的原理, 并用自行设计的两个 VET 和一台小型的光栅单色仪组成的波长计测量了 CR899-21 型激光器 800 nm 处的输出波长, 波长测量精度优于  $1 \times 10^{-6}$ 。在此基础上, 设计了一种由三重游标标准具构成的新型激光波长计。

**关键词** 游标标准具, 多重游标标准具, 波长计

## 1 引言

随着可调谐激光技术的发展, 激光波长的测量和控制变得越来越重要。目前, 激光波长的高精度测量主要采用干涉法, 即利用经典的 Michelson<sup>[1]</sup> 干涉仪, Farbry-Perot 标准具<sup>[2]</sup>, Fizeau 干涉仪<sup>[3]</sup> 测量激光波长。Farbry-Perot 标准具测量, 具有精度高、可靠性好等特点, 而且它在光谱测量中可提供一个必须的标度, 所以不少人在发展这种技术。

实用的静态 Farbry-Perot 波长计通常由几个厚度成比例变化的标准具组成。最薄的标准具决定仪器的自由光谱范围, 最厚的一个则给定仪器的测量精度。为了决定最薄的标准具的级, 从而确定绝对的波长值, 这种波长计常常需要一个简单的单色仪提供粗测波长。

如果激光器能够连续扫描(例如环行腔染料、钛宝石激光器), 可令其激光波长扫描几个标准具自由光谱范围, 得到在时间轴上展开的干涉条纹, 从而决定激光波长。由于激光器的单次扫描范围的限制, 标准具的自由光谱范围不可能做得太宽, 故不能采取上面方法组成波长计。为解决此问题, G. Willams<sup>[4]</sup> 等发展了一种组合标准具, 即游标标准具 VET (Vernier Etalon) (图 2)。它由两个低精细度, 长度差约 5%, 自由光谱范围约 6.8 GHz 的标准具组合而成。VET 总自由光谱范围(级宽 order spacing)约为  $5 \text{ cm}^{-1}$ 。同一般的静态的 F-P 波长计一样, 它采用了一基于石英晶体旋光色散性质而制成的单色仪 OAM 来决定 VET 的级。

由于使用单色仪, G. Willams 的激光波长计有如下缺点: 1) 不是全静态波长计, 其测量精度受 OAM 电机振动影响; 2) 结构复杂, 调节步骤较复杂; 3) 由于 OAM 的影响, 测量波段限制在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。

本文讨论了用多重游标标准具测量连续波可调谐激光波长的测量原理, 并用两个自行设计的 VET 和一台小型光栅单色仪组合而成的波长计测量了 CR899-21 激光器 800 nm 处的输出波长, 其测量精度优于  $1 \times 10^{-6}$ 。在此基础上, 提出了一种简单、紧凑的三重游标标准具波长

计。它不需要单色仪提供波长测量的初值可望克服 G. Williams 波长计的缺点。

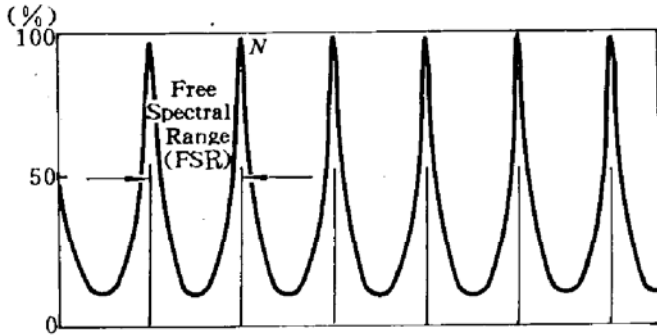


Fig. 1 Typical etalon transmission curve

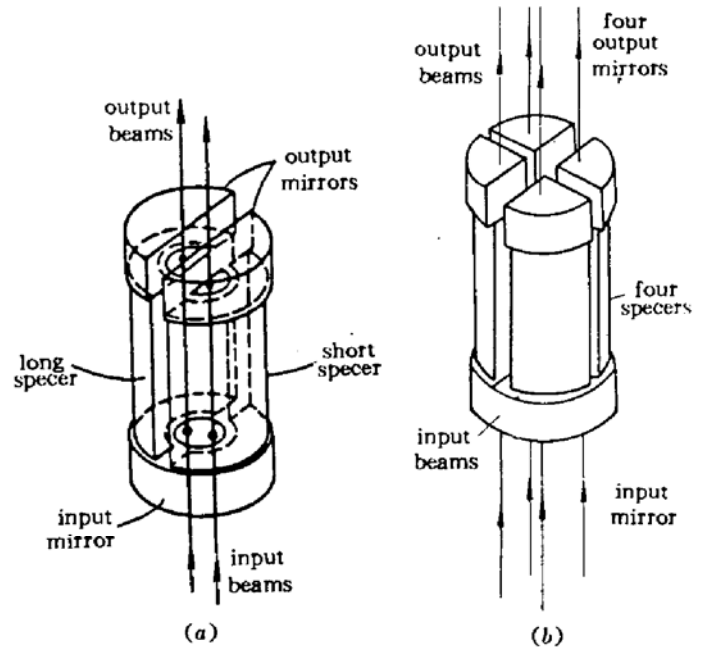


Fig. 2 The construction of VET and triple VETs

## 2 多重游标标准具测量原理

一台主动稳频的 CW 激光器通常可以连续扫描 30 GHz 或 60 GHz, 其线宽小于 1 MHz。据此可确定单重 VET 的结构和参数。

考虑激光束通过单个标准具的情况: 透过光强是激光频率的函数(图 1), 两透射峰间距即标准具的自由光谱范围, 每一峰代表一个标准具的不同的级。如果激光能连续扫描, 则可能让其在输出光频附近扫描, 得到几个标准具的干涉峰, 从而确立输出光频和最近的标准具峰的距离  $\Delta\nu$  (假设激光器扫描又返回)。如果知道标准具峰的级次  $N$ , 激光频率即可完全确定:

$$\nu_{\text{laser}} = N_{\text{etalon}} \times \text{FSR} + \Delta\nu \quad (1)$$

实际测量中,  $\Delta\nu$  的测量误差可优于标准具的一个自由光谱范围 (FSR) 的 1%。可先假设波长测量的重复精度为  $\pm 50$  MHz, 意味着一个标准具的 FSR 小于 10 GHz。

首先考虑单个 VET, 它实际上是一对 FSR 有较小差别的平行标准具。激光扫过一定宽度, 由测量电路得到两标准具的透过曲线 ( $\text{VET}_1, \text{VET}_2$ ), 量出两峰的间距  $D$ 。从  $D$ , 单色仪提供的波长粗测值  $\nu^*$ , 以及相应的两标准具的  $\text{FSR}_1, \text{FSR}_2$  (均精确定标), 可以由标准具方程导出精确的  $N_{\text{etalon}}$ 。

考虑到测量误差, 为导出精确的  $N_{\text{etalon}}$ , 下列假设必须成立:

1)  $D$  的测量误差必须小于  $\text{FSR}_1, \text{FSR}_2$  的差值的一半

$$D_{\text{error}} < (\text{FSR}_1 - \text{FSR}_2)/2 \quad (2)$$

2)  $\nu^*$  的测量误差必须满足下式

$$\nu_{\text{error}}^* < \text{FSR}_1 \cdot \text{FSR}_2 / 2(\text{FSR}_1 - \text{FSR}_2) \quad (3)$$

$\text{FSR}_1 \cdot \text{FSR}_2 / (\text{FSR}_1 - \text{FSR}_2)$  定义为单个 VET 的级宽。它描述了 VET 的一个基本特性。

现在令 VET 的级宽增加一个量级, 即令 FSR 之差小一个量级而 FSR 基本不变。此时 (3) 式不再成立, 得不到精确的  $N_{\text{etalon}}$ , 其最大误差为

$$\Delta n = \text{INT}[2 \cdot D_{\text{error}} / (\text{FSR}_1 - \text{FSR}_2)] \quad (4)$$

这导致激光频率测量值的一个大的偏差

$$\text{frequency error} = \Delta n \cdot \text{FSR} \quad (5)$$

多重 VET 的设计正是依赖于(2), (3)和(5)式。首先,我们可设计出单重 VET,让它能从测量到的峰值间距  $D$ 、相应的  $\nu^*$ 、 $\text{FSR}_1$  和  $\text{FSR}_2$  导出精确的  $N_{\text{etalon}}$ 。然后设计下一重 VET,其级宽增大一个量级,但此时波长测量值会引入一个大的误差,让最大差值正好使得第一个 VET 得出一个精确的  $N_{\text{etalon}}$  值。重复上述步骤,直到 VET 的级宽达到一个满意的值。如果第一级 VET 取  $\text{FSR}_1 = 6.78 \text{ GHz}$ ,  $\text{FSR}_2 = 6.75 \text{ GHz}$ ,则两重 VET 的级宽可达  $1500 \text{ GHz}$ 。三重 VET 的级宽可达  $15000 \text{ GHz}$ 。能大大降低 VET 波长测量时所需初值的精度。

### 3 实验及其结果

我们针对实验室拥有的 CR899-29 型掺钛宝石激光器(能在  $30 \text{ GHz}$  内作重复扫描,输出激光线宽优于  $500 \text{ kHz}$ ),设计了两套游标标准具。第一套 VET 的两标准具常数分别为  $6.79 \text{ GHz}$ ,  $6.50 \text{ GHz}$ ,VET 的级宽约  $150 \text{ GHz}$ ;第二套 VET 的两标准具常数分别为  $6.78 \text{ GHz}$ ,  $6.75 \text{ GHz}$ ,VET 的级宽约  $1500 \text{ GHz}$ 。VET 的 C 型支架由微晶玻璃制成,以保证标准具有好的热稳定性(微晶玻璃的热膨胀系数  $< 2 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ )。标准具的工作镜面镀反射率为  $70\%$  的金属铝膜,标准具精细度约为  $7$ 。

图 3 为由两组 VET、一台小型单色仪及其信号处理系统组成的波长测量装置图。由分束镜  $\text{BS}_1, \text{BS}_2$  分出的四路光经两组 VET,被四个光探测器  $D_1, D_2, D_3, D_4$  接收,所得到的信号经前置放大器放大,送到  $12$  位 A/D 转换器转换为数字信号,最后由计算机结合单色仪的读数,得出波长测量值。 $D_5$  探测器监测激光功率。

图 4 为  $12445 \text{ cm}^{-1}$  附近两组标准具的透过曲线。表 1 列出了用我们的波长测量系统测量 CR899-29 型激光器输出波长的实验结果。第一列为 CR899-29 型激光波长计读数,第二列为我们的波长测量结果和其比较的差值。CR899-29 型激光器波长计重复测量精度优于  $1 \times 10^{-7}$ ,我们的测量结果和其比较,最大相对误差不超过  $1 \times 10^{-6}$ 。

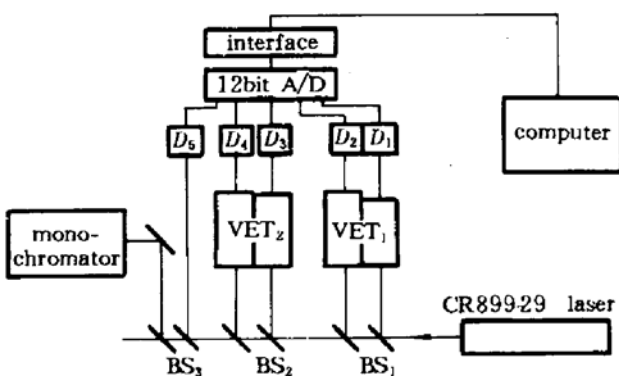


Fig. 3 Schematic diagram of VETs' experiment

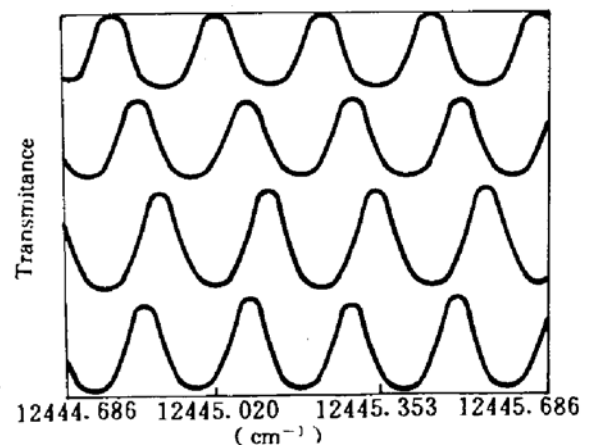


Fig. 4 Transmittance of four etalons in two VETs around  $12445 \text{ cm}^{-1}$

Table 1 The VETs' experiment results

Wavelength (nm)	795.123	800.101	805.721	807.898	810.175
Error (ppm)	-0.26	0.26	0.25	0.20	-0.09

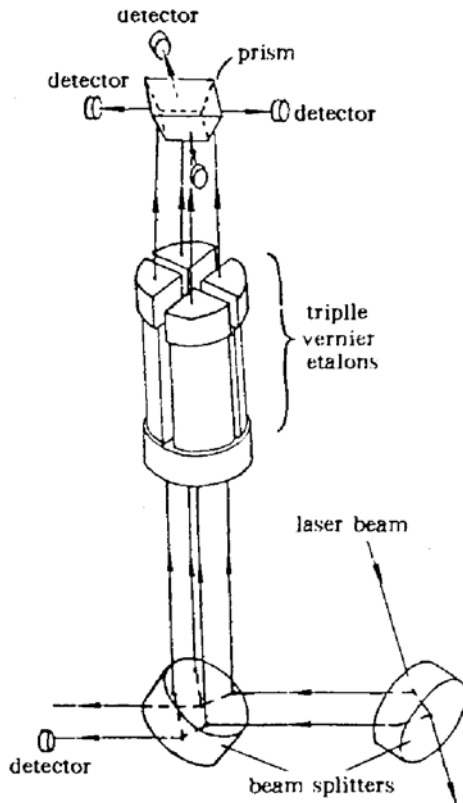


Fig. 5 Optical schematic of triple VETs wavemeter

## 4 一种新型波长计的设计

根据上面的讨论和实验结果,我们进而提出一种实用的三重游标标准具。因三重游标标准具的级宽达  $15000 \text{ GHz}$  ( $500 \text{ cm}^{-1}$ ),对于一般的窄带可调谐激光器,可根据激光器运行波段,腔内调谐元件的状态,在此精度上知道输出波长,可不需要单色仪为其提供初值,从而可直接由三重游标标准具构成激光波长计,其结构简单、紧凑,可克服 G. Williams 波长计的缺点。

一个三重 VET 可设计成和单个 VET 一样紧凑。图 2(b) 是我们设计的三重 VET 的光学结构图。三重 VET 由四个标准具组合而成,标准具长度分别为  $23.00 \text{ mm}$ ,  $22.90 \text{ mm}$ ,  $22.00 \text{ mm}$  和  $21.99 \text{ mm}$ 。四个标准具的支架一端光学胶合在同一圆形工作镜面上。另外一个端面光胶  $1/4$  圆镜。整个三重 VET 呈圆柱形。三重 VET 的其他技术

要求和单重 VET 相同。

图 5 是由三重 VET 构成的波长计的结构图。第一分束镜分出一对平行的激光束导入波长计。第二块分束镜将光再分出四束进入三重游标标准具,透射光经棱镜反射到四个探测器上。光信号由四个光二极管接收。从第二分束镜透射的一路经光二极管接收用作功率归一。多重 VET 的透射光信号经功率归一后送到一个 8 位 A/D,转换为数字信号,经接口由计算机接收,由计算机实时得出波长的读数。

## 参 考 文 献

- 1 F. V. Kowalski et al. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**: 965
- 2 L. S. Lee et al. *Opt. Lett.*, 1981, **6**: 610
- 3 J. J. Snyder. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1978, **8**: 595
- 4 W. P. Proffitt, G. H. Williams etc. "Scannable Laser with Intergral Wavemeter". U. S. Pat. 4, 864, 578 issued Sept. 5, 1989. Official gazette of the United States Patent Office and Trademark Office

## Multiple Vernier Etalons

Chen Hongbing Gao Junyi Gong Zhiben

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031)

**Abstract** The principle of measuring the wavelength of continuous wave tunable laser by using multiple vernier etalons is proposed. A wavemeter was constructed by two VETs and a simple grating monochromator and its accuracy is proved to be better than  $1 \times 10^{-6}$  by the experiment. Based on these, a novel compact wavemeter constructed by a triple VET was designed.

**Key words** vernier etalon, multiple VETs, wavemeter