

# 红外波段双线 He-Ne 激光两级合成波长组成方案的实验验证

邓罗根

(北京理工大学光学工程系, 北京 100081)

**提要** 利用红外拍波干涉仪验证了用于无导轨大长度测量的 3.39  $\mu\text{m}$  波段双线 He-Ne 激光两级合成波长组成方案。介绍了验证该合成波长组成方案的红外拍波干涉仪的工作原理, 给出并分析了所取得的部分实验结果。

**关键词** 大长度干涉计量, 合成波长, 红外拍波干涉仪, 红外双线 He-Ne 激光

## Experimental verification of two-level synthetic wavelength component scheme of infrared band dual-line He-Ne laser

*Deng Luogen*

(Dept. of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** The two-level synthetic wavelength component scheme of 3.39  $\mu\text{m}$  band dual-line He-Ne laser for large length interferometry without carriage guideway is tested and verified by using infrared beatwave interferometer. The principle of the infrared beatwave interferometer used in the experiment is presented. The experimental data are given and analyzed. This work provides experimental basis for the large length measurement scheme employing 3.39  $\mu\text{m}$  dual-line He-Ne laser.

**Key words** large length interferometry, synthetic wavelength, infrared beatwave interferometer, infrared dual-line He-Ne laser

## 1 引言

在高精度大长度测量方面, 国内外均开展了以多波长小数重合法<sup>[1]</sup>为基础的激光无导轨干涉测长(亦称绝对距离干涉计量)的研究工作。

1976年, C. R. Tilford 总结出一套利用多波长干涉条纹尾数测量值决定长度的分析步

骤<sup>[2]</sup>,提出了合成波长的概念。二十多年来,激光无导轨干涉测量大长度的工作不断深入,演变出了各种实用技术,但其基本原理仍然是小数重合法。

无导轨干涉测长的逐级精化原理是多波长小数重合法的发展,该原理利用多级合成波长(例如  $\lambda_s^{(p)} > \lambda_s^{(p-1)} > \dots > \lambda_s^{(1)} > \lambda^{(0)}$ ) 测量同一长度,以上一级的测量结果作为下一级的粗测,借此克服测量的非单值性,一级一级地逐次逼近长度真值,直至满足精度要求为止<sup>[3,4]</sup>。在如何构成多级合成波长问题上,各国研究者做了大量的尝试,使用过多波长 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[5~7]</sup>、Zeeman 分裂 He-Ne 激光器、双波长 He-Xe 激光器<sup>[3,8]</sup>、变波长激光器<sup>[9]</sup>和组合多波长激光器<sup>[3]</sup>等,取得了不少经验,但激光无导轨大长度干涉测量问题仍然没有得到很好的解决。文献[4]提出

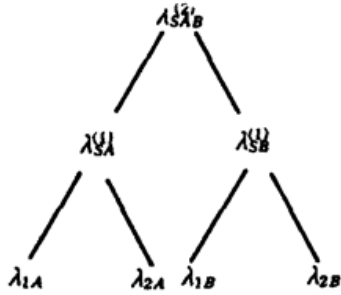


Fig. 1 Synthetic wavelength pyramid obtained by using 3.39 μm band dual-line He-Ne laser

出了一种以 3.39 μm 波段双线 He-Ne 激光为基础的两级合成波大长度绝对测量新方案。该方案利用激光器两个等功率稳频工作点的切换,获得两个相近但不相等的拍波。根据合成波长组成原理,由这两个不同的(拍波)合成波长可以组合出高一级的合成波长,其值约等于激光腔长的两倍。图 1 是利用 3.39 μm 波段双线 He-Ne 激光的双等光强工作点的切换组合成的合成波长金字塔。第一级合成波长  $\lambda_{SA}^{(1)}$ 、 $\lambda_{SB}^{(1)}$  是实际的拍波,约等于 11.5 mm。第二级合成波长  $\lambda_{SAB}^{(2)}$  由理论计算所得,约等于  $2 L_c \cdot n$ ,其中  $L_c$  是腔长, $n$  是折射率。作者在稳频工作<sup>[10]</sup>完成之后,利用红外拍波干涉仪测量两个一级合成波长,验证了 3.

39 μm 波段双线 He-Ne 激光两级合成波长组成方案。本文首先介绍用来验证该方案的红外拍波干涉仪原理,然后给出并分析有关的实验结果。

## 2 红外拍波干涉仪合成波长测量原理

作者利用拍波干涉仪对 3.39 μm 双线 He-Ne 激光两级合成波长组成方案进行了实验。

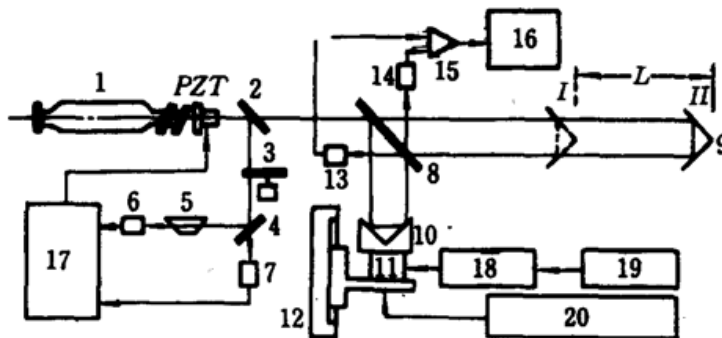


Fig. 2 3.39 μm band two wavelength infrared beatwave interferometer

- 1—two wavelength He-Ne laser; 2,4,8—visible/infrared common beam splitter; 3—chopper; 5—CH<sub>4</sub> cell;
- 6,7,13,14,15—detectors & preamps; 9,10—target/reference mirrors; 11—piezoelectric transducer;
- 12—displacement mechanism; 16—oscilloscope; 17—stable system; 18—PZT drive;
- 19—signal generator; 20—position measuring device

图 2 是该仪器的原理简图。图中 He-Ne 激光器同时输出波长为  $\lambda_1 = 3.3922 \mu\text{m}$  和  $\lambda_2 = 3.3912 \mu\text{m}$  的双波长激光,经分光镜 2 分出一部分用于稳频。透射光经分光镜 8 分成两部分,一部分射向测量镜 9,另一部分射向参考镜 10。经测量镜 9 和参考镜 10 反射的光在分光镜 8 上相汇合,干涉信号由两个 InAs 红外探测器接收。透射信号和反射信号经差动放大后由示波器显示波形。可以证明:当  $3.39 \mu\text{m}$  波段双线 He-Ne 激光处于双波长等功率输出时,探测器输出的光电流与反射镜位置之间有如下关系:

$$i(x(t)) = D \cdot C + 2I \cos[x(t)2\pi/\lambda_s] \cos[x(t)4\pi/\lambda] \quad (1)$$

式中  $2I$  是光电流的交流振幅,与双谱线的总功率成正比; $x = l_1 - l_2$  为干涉仪参考臂与测量臂之差; $\lambda_s = \lambda_1\lambda_2/|\lambda_1 - \lambda_2|$ ,  $\lambda = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ 。式(1)代表的空间拍波波形如图 3(a)所示。

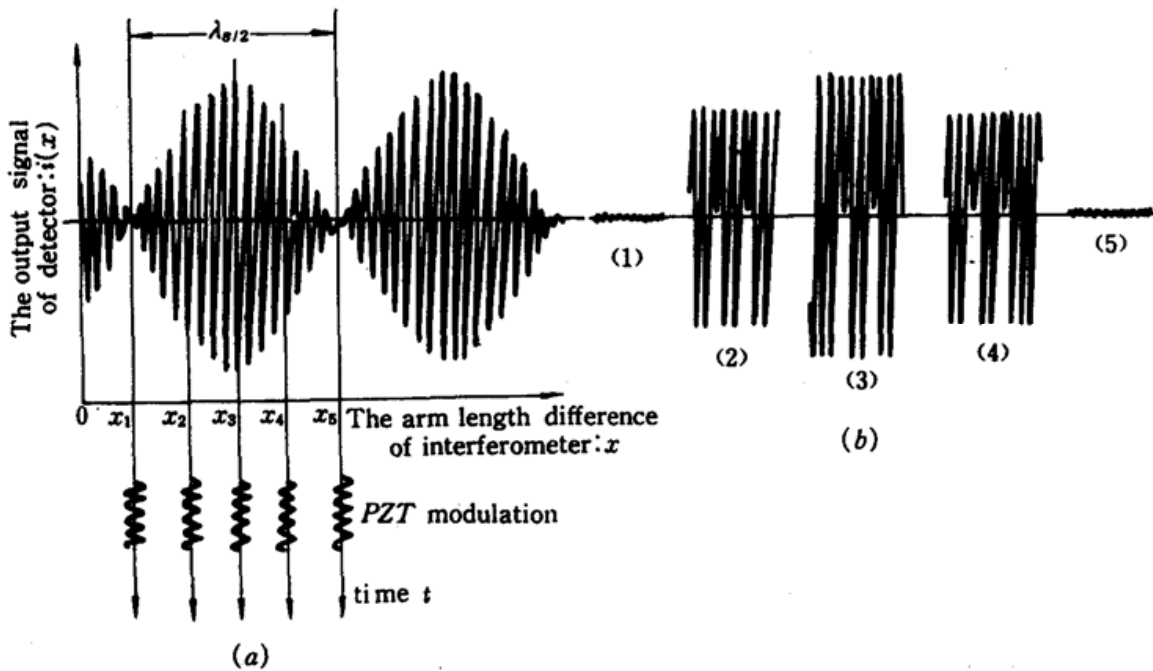


Fig. 3 Principle of the signal generation of the beatwave interferometer. The zero amplitude signal (1) repeat to appear on the screen of oscilloscope each time the arm length difference of interferometer changes a half synthetic wavelength. Signal (1)、(2)、(3)、(4) and (5) correspond to arm length difference  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  and  $x_5$ , respectively

在等功率稳频的情况下,移动参考镜 10,在示波器上会观察到信号幅度的拍波涨落,用 PZT 微幅调制参考镜 10,可以观察到一定参考镜位置下拍波幅度的大小。图 3(b)中信号(1)、(2)、(3)、(4)和(5)分别与反射镜位置  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  和  $x_5$  对应。参考镜每移动半个合成波长  $\lambda_s/2$ ,信号幅度重复一次零值。据此可测出两个一级合成波长  $\lambda_{sA}^{(1)}$  和  $\lambda_{sB}^{(1)}$  的长度。PZT 的调制幅度尽量小,以免增加对零误差。当激光器输出的双波长功率不等时,拍波零点消失,严重时将观察不到参考镜移动过程中的信号幅度变化。这就是拍波干涉测长要求对激光光源实现等功率稳频的原因。

### 3 合成波长组成方案的实验验证

由上节介绍的拍波干涉仪原理可知,当测量镜 9 固定时,参考镜每移动半个合成波长,零

信号(1)(即拍波零点)重复出现一次。利用光栅位置测量仪测出相邻两次零信号过程中参考镜的移动距离,即可给出半合成波长  $\lambda_c/2$  的长度。表 1 是激光工作在不同等光强稳频工作点上所测得的半合成波长数据。按肖维勒准则剔除粗大误差后得

$$\lambda_{SA}^{(1)} = 11.351 \pm 0.011 \text{ mm}$$

$$\lambda_{SB}^{(1)} = 11.224 \pm 0.013 \text{ mm}$$

计算得

$$\lambda_{SAB}^{(2)} = \lambda_{SA}^{(1)} \cdot \lambda_{SB}^{(1)} / |\lambda_{SA}^{(1)} - \lambda_{SB}^{(1)}| \approx 1003.2 \text{ mm}$$

Table 1 Data of half synthetic wavelength measured by infrared beatwave interferometer (units : mm)

Measurement sequence	$\lambda_{SA}^{(1)}/2$	$\lambda_{SB}^{(1)}/2$	Measurement sequence	$\lambda_{SA}^{(1)}/2$	$\lambda_{SB}^{(1)}/2$
1	5.683	5.601	13	5.686	5.617
2	5.660	5.615	14	5.672	5.606
3	5.661	5.601	15	5.673	5.592
4	5.681	5.612	16	5.689	5.604
5	5.672	5.613	17	5.677	5.606
6	5.678	5.619	18	5.685	5.617
7	(5.643)	5.615	19	5.675	5.627
8	5.673	5.613	20	5.671	5.623
9	5.683	5.624		$n = 19$	$n = 20$
10	5.675	5.613	After rejecting rough errors data	$\overline{\lambda_{SA}^{(1)}/2} = 5.6753$	$\overline{\lambda_{SB}^{(1)}/2} = 5.6120$
11	5.672	5.628		$\sigma_{n-1} = 0.0080$	$\sigma_{n-1} = 0.0101$
12	5.665	5.595		$3\sigma_{n-1}/\sqrt{n} = 0.0055$	$3\sigma_{n-1}/\sqrt{n} = 0.0068$

由于激光器腔长  $L_c \approx 500 \text{ mm}$ ,因此  $\lambda_{SAB}^{(2)}$  的测量值与理论值  $2L_c \cdot n$  十分吻合。本实验工作为  $3.39 \mu\text{m}$  波段双线 He-Ne 激光两级合成波大长度绝对测量方案提供了实验依据,表明我们对拍波干涉仪原理的分析是正确的。

### 参 考 文 献

- 1 M. 波恩, E. 沃耳夫著, 杨葭荪等译, 光学原理, 科学出版社, 1978, 379
- 2 C. R. Tilford, *Appl. Opt.*, **16**(7), 1857(1977)
- 3 H. Matsumoto *et al.*, *Ann. CIRP* 31, 401(1982)
- 4 邹大挺 *et al.*, *中国激光*, **19**(1), 31(1992)
- 5 G. L. Bourdet *et al.*, *Appl. Opt.*, **18**(2), 225(1979)
- 6 C. W. Gillard *et al.*, *Opt. Eng.*, **22**(3), 348(1983)
- 7 H. Matsumoto, *Appl. Opt.*, **23**(7), 973(1984)
- 8 H. Matsumoto, *Appl. Opt.*, **20**(2), 231(1981)
- 9 F. Bien *et al.*, *Appl. Opt.*, **20**, 400(1981)
- 10 邓罗根, *中国激光*, **18**(8), 569(1991)