

文章编号: 1001-5078(2004)04-0251-03

# 双频激光干涉仪技术现状与发展

所睿, 范志军, 李岩, 张书练

(清华大学精密仪器与机械学系, 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 文章概述了国内外双频激光干涉仪产品的现状, 介绍了近年来双频激光干涉仪向高分辨率、高精度、高测速等几个方向的发展趋势。

**关键词:** 双频激光干涉仪; 外差干涉; 高分辨率; 高精度; 高测速

**中图分类号:**           **文献标识码:** A

## Dual-frequency Laser Interferometer Present State and Development

SUO Rui, FAN Zhi-jun, LI Yan, ZHANG Shu-lian

(Department of Precision Instruments and Mechanology, State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The present state of the dual-frequency laser interferometer in the world is introduced in brief. The trends of development to high resolution, high accuracy, high measurement speed etc. are given.

**Key words:** dual-frequency laser interferometer; heterodyne interferometer; high resolution; high accuracy; high measurement speed.

### 1 引言

双频激光干涉仪是激光在计量领域中最成功的应用之一, 是工业中最具权威的长度测量仪器。它可用于精密机床、大规模集成电路加工设备等的在线在位测量、误差修正和控制。双频激光干涉仪采用外差干涉测量原理<sup>[1]</sup>, 克服了普通单频干涉仪测量信号直流漂移的问题, 具有信号噪声小、抗环境干扰、允许光源多通道复用等诸多优点, 使得干涉测长技术能真正用于实际生产。

### 2 国内外产品现状

目前干涉仪产品大多为双频激光干涉仪。产生双频激光的方法主要是利用塞曼效应和声光调制。塞曼效应受频差闭锁现象影响, 产生的双频频差一般较小, 通常最大频差不超过 4MHz。声光调制方法得到的频差通常较大, 一些产品双频激光频差达到 20MHz 以上。声光调制方法的频率稳定性也非常好, 可以利用锁相放大器处理信号; 缺点是稳频、调制、合光等环节使得光学结构复杂, 调整困难, 成本也偏高。

目前国外生产激光干涉仪的公司有美国的 Agilent(前身为 HP)、ZYGO、英国的 Renishaw 等公司。其产品各具特点, 售价也都很昂贵。

Agilent(HP)公司的双频激光干涉仪采用自制

的塞曼双频激光器作光源<sup>[2]</sup>, 仪器的光学系统如图 1 所示。

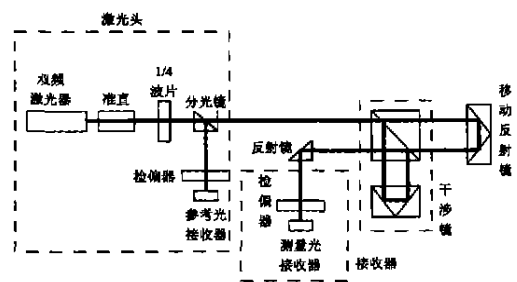


图 1 Agilent 公司干涉仪主要光路结构

其中 5519B 的主要参数如下:

激光源: 最大频差: 4MHz

真空波长精度(寿命范围内):  $\pm 0.1$  ppm

真空波长稳定性(1 小时): 0.002ppm

最高测速: 1000mm/s

数据处理电路单元: 在 1000mm/s 测速时测量分辨率可达 1.24nm, 测量范围  $\pm 21.2$ m

Agilent 公司的双频激光干涉仪可以多通道同

作者简介: 所睿(1979-), 男, 满族, 清华大学精密仪器与机械学系硕士研究生, 从事双频激光干涉测量技术研究。

收稿日期: 2003-12-15

时测量。为适应多通道测量的要求,其部分产品不再采用以前产品将激光头、接收器、电源集成在一起的结构(如 HP5528A),而将各个功能模块分离,在每一通道光路上分别布置光电接收器。

Renishaw 公司的 ML10gold 干涉仪实际上是单频偏振干涉的方案<sup>[3,4]</sup>。利用双纵模稳频,然后去掉一个纵模,在光学设计上保证准确的相位差,通过高精度测相和高速 A/D 转换技术,实现高速和高分辨率测量。其主要光学系统如图 2 所示。

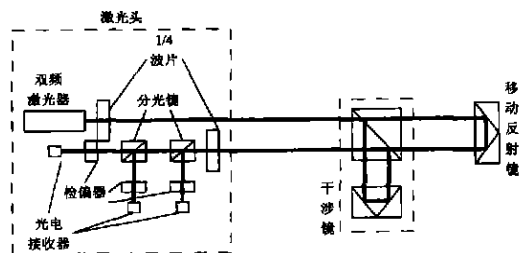


图 1 Renishaw 公司干涉仪主要光路结构

主要参数如下:

激光光源: 频率精度(长时间):  $\pm 0.05\text{ppm}$

频率稳定性(1 小时):  $0.02\text{ppm}$

最高测速:  $1000\text{mm/s}$

数据处理电路板: 在  $1000\text{mm/s}$  测速时测量分辨率可达  $1.24\text{nm}$ , 测量范围  $80\text{m}$

由于是单频激光器, Renishaw 公司的产品不能多路分光使用,同时对多轴测量就需要多个激光头,增加成本。

ZYGO 公司的部分产品(如 7712)利用声光调制法获得双频<sup>[5]</sup>, 频差可达  $20\text{MHz}$ 。用于高速测量。其主要参数如下:

激光光源: 最大频差:  $20\text{MHz}$ (声光调制提供)

真空波长精度(寿命范围内):  $\pm 0.1\text{ppm}$

真空波长稳定性(1 小时):  $0.5\text{ppb}$

最高测速:  $5.1\text{m/s}$

数据处理电路板: 在  $5.1\text{m/s}$  测速时测量分辨率可达  $0.31\text{nm}$

另有部分产品(如 7705)利用塞曼效应产生双频,最大频差  $3.65\text{MHz}$ 。其主要参数为:

双频激光: 最大频差:  $3.65\text{MHz}$ (塞曼效应)

真空波长精度(寿命范围内):  $\pm 0.2\text{ppm}$

真空波长稳定性(1 小时)  $0.01\text{ppm}$

最高测速:  $500\text{mm/s}$

数据处理电路板: 在  $500\text{mm/s}$  测速时测量分辨

率可达  $1.24\text{nm}$

ZYGO 公司的产品也可实现多通道测量,一个系统最多可供 4 路分光复用。该公司的干涉镜可装附光纤耦合器,将各路测量光耦合入光纤,传递到数据处理电路各个通道分别接收转换。

我国对干涉仪产品早已重视。从七十年代,清华大学、计量院、机械部成都工具研究所等科研部门就已开始研制双频激光干涉仪样机,至今已经有二、三十年历史。成都工具研究所有商品化仪器出售。

表 1 目前国内处干涉仪产品技术指标对比

		Agilent	Renishaw	ZYGO	成都工具所
激光头	单/双频	双频	单频	双频	双频
	产生双频方法	塞曼效应	/	声光调制	塞曼效应
	最大频差(MHz)	4	/	20	3.65
	最高测速(mm/s)	1000	1000	5100	500
数据电路板	最高测速下分辨率(nm)	1.24	1.24	0.31	1.24
	最高测速下测量范围(m)	40	80	40	40

### 3 双频激光干涉仪的发展

双频激光干涉仪已成为精密测量中广泛应用的仪器,国内外许多公司都有商品化仪器出售。但也往往使人们产生了错觉,以为激光干涉仪已经完全满足制造业的需求,不必再研究了。其实,近年来,随着科学技术的发展,人们对测量工具也提出了更高的要求。为迎合新的测量要求,双频激光干涉仪也相应向高分辨率、高精度、高测速等几个方向发展。

#### 3.1 高分辨率

仅依靠光学系统,普通干涉仪的只能达到半波长的分辨率,即  $0.1\mu\text{m}$  量级,目前的干涉仪产品通过电子细分的方法提高测量分辨率。国外 Agilent、ZYGO 等公司的产品可实现 2048 细分,最大分辨率达到  $0.15\text{nm}$ 。清华大学精仪系殷纯永教授的研究小组研制的 SJD5 型双频激光干涉仪可实现 640 细分,分辨率  $0.49\text{nm}$ <sup>[6]</sup>。

当然,通过增大电子细分数实现高分辨率,细分数越大,出现的相对误差也就越大,而目前还没有很好的仪器作为纳米量级测量的基准。现在的纳米量级测量大多的是将原子力显微镜、X 射线干涉仪等仪器与光学干涉仪结合使用,如英国国家物理实验室将光学干涉仪和 X 射线干涉仪结合,形成新的测量仪器,其测量范围是  $1\text{mm}$ ,最小测量步长是  $0.192\text{nm}$ 。

#### 3.2 高精度与纳微米精密测量溯源

在要求纳米精度的条件下,出现大量科学与技

术问题有待解决, 诸如: 非线性误差<sup>[9]</sup> (对半个波长分割的不均匀性)、空气折射率影响、温度压力效应、环境振动影响等问题。非线性误差对于纳米溯源的影响十分严重, 因为它发生在半个波长的位移内, 即在非常短的量程内也照样存在。双频干涉仪首先被发现具有非线性误差。很长时期以来, 单频干涉仪生产厂家号称没有非线性误差, 经德国联邦物理技术研究院 (PTB) 严格测试分析发现单频干涉仪也有非线性误差, 而且在 10nm 量级或者更大。和商业双频干涉仪在同一数量级。他们的研究表明, 可由“李萨如”圆的椭圆化程度判断非线性误差, 从而用专门的电路加以校正。修正后可以达到 2nm。

BIPM 纳米工作组已将激光干涉仪、高精度位移传感器等列入国际计划, 纳米精密测量技术的溯源成为迫切需要解决的课题。

### 3.3 高测速<sup>[7]</sup>

制造业的发展迫切需要解决高速加工过程中运动目标的精密测量和定位, 许多精密机床的运动速度已达几 m/s, 而从精度等方面考虑, 只有激光干涉技术更适合解决以上问题。

对双频激光干涉仪, 高测速就要求双频激光的频差要大。利用塞曼效应产生双频最大只能达到 4MHz 频差, 最高测量速度仅为 1m/s。一些高测速的干涉仪利用声光效应得到双频, 频差可达 20MHz, 最高测速 5.1m/s。

最近我们成功地克服了塞曼双频激光器的频差闭锁现象, 研究出国内外计量领域多年期盼的中频差 (3~40MHz 频差可控输出) He-Ne 激光器<sup>[8]</sup>, 并获得专利。以这种激光器作为光源的双频激光干涉仪将实现 4m/s 的测量速度, 其优势在于测量速度快, 且稳频系统和信号处理电路相对简单可以实现, 不增加太多造价。

### 3.4 光源多通道复用

制造业中, 机床测量常常需要同时测量工作台 x 轴、y 轴的位移以及回转角度等参数。为降低成本, 希望几个通道测量共用一个激光头。对双频激光干涉仪, 如需 n 通道共用一个激光头, 只要在激光输出光路上放置 n-1 个中性分束器 (对偏振态不敏感), 将光源分成 n 束光, 控制分束器的透反比, 使 n 束光功率尽量相等。再以每束光构建各自的偏振分光干涉仪, 并相应放置 n+1 个光电接收器, 分别接收 n 个通道的测量光和 1 束参考光。用 n 个独立的信号处理系统和同一个计算机系统, 完成信号处理。这就形成了一个单光束 n 通道复用的干涉系统 (如图 3)。实际应用中, 受光功率等因素限制, n 一般不超过 3, 但已可以解决实际应用中的大量三维测量问题。

国外 Agilent、ZYGO 等公司的双频激光干涉仪

产品均可进行多通道复用测量, 部分产品最多可实现 4 通道复用。成都工具所的部分产品也已实现多通道复用。

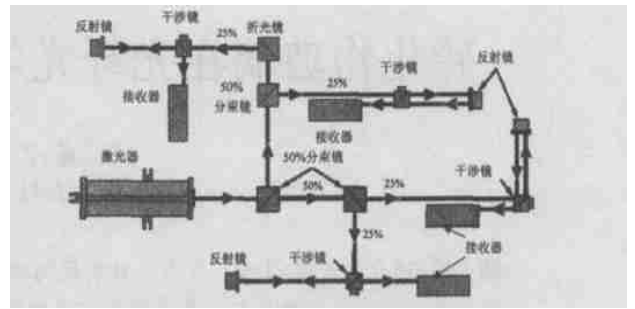


图 3 双频激光干涉仪光路多路复用示意图

### 3.5 空气折射率补偿

空气折射率的影响是干涉仪应用中的主要误差来源。目前国外许多产品是用温度、气压、湿度传感器测出相应参数, 用 Edlén 公司计算出折射率和波长值, 再与干涉仪测量信号并行输入信号处理系统实现空气折射率补偿。Renishaw 公司使用这种折射率补偿器控制激光器腔长达到较高的频率稳定性。

另外还可以采用空气折射率干涉仪直接测出空气折射率, 并得出波长值。这种干涉仪可解决空气成分变化情况下的测量问题, 误差最小。Agilent 公司的产品采用这种方式进行空气折射率补偿, 其空气折射率干涉仪的光源也由激光头分光复用而来。

## 4 结论

双频激光干涉仪向着高分辨率、高精度、高测速等方向发展, 为了实现上述目标, 其研究领域也在进一步深入拓宽, 我们应该加强研究, 争取早日研制出具有自主知识产权的仪器, 缩小与世界先进水平的差距。

### 参考文献:

- [1] 关信安, 袁树忠, 刘玉照. 双频激光干涉仪[M]. 中国计量出版社, 1987
- [2] Agilent 公司主页. <http://we.home.agilent.com>. 2003.
- [3] Renishaw 公司主页. <http://www.renishaw.com>. 2003.
- [4] 殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津大学出版社, 1999.
- [5] ZYGO 公司主页. <http://www.zygo.com>. 2003.
- [6] 戴高良. 双频激光纳米干涉测量技术的研究[D]. 申请清华大学工学博士学位论文, 1998.
- [7] 高赛, 殷纯永. 高速双频激光干涉仪[J]. 光学技术, 2001, 27(3): 238-239, 246.
- [8] Jin Yuye, Zhang Shulian, Li Yan, et al. Zeeman-Birefringence He-Ne Dual Frequency Lasers[J]. Chinese Physics Letters 2001, 18(4): 533-536.
- [9] Li Yan, Fan Zhijun, Zhang shulian. Dual-frequency He-Ne lasers of 3MHz-40MHz frequency-difference [A]. In: Yukihiko Ishii ed. proceedings of SPIE, Shanghai, 2002, 4916: 424-430.