

文章编号: 1002-2082(2004)06-0026-05

# 基于光纤 Bragg 光栅位移测量的研究

李志全, 蔡璐璐, 高庆, 吴飞

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 介绍了一种基于布喇格光纤光栅技术的位移测量方法。利用宽带光源经不同的布喇格光栅得到一种由温度稳定器控制波长稳定性的合成光源。由于系统设计的合成光源波长比常规光源的波长长, 所以允许的光程差测量范围提高了几百倍, 从而使得布喇格光纤光栅的波长准确性提高了干涉仪位移测量的准确性。此外, 利用光外差法马赫-曾德尔干涉仪进行了位移测量实验, 得到了很好的效果。

**关键词:** 布喇格光纤光栅; 位移测量; 合成波长; 马赫-曾德尔干涉仪; 光外差

**中图分类号:** TN25-34

**文献标识码:** A

## Research on Displacement Measurement Based on Bragg Gratings

LI Zhi-quan, CAI Lu-lu, GAO Qing, WU Fei

(Electrical Engineering Institute, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** This paper presents a method of the displacement measurement using the technology of fiber Bragg gratings. After a broadband light source passes through separate Bragg grating, the synthesized light source, which a temperature stabilizer controls the stability of wavelengths, is obtained. The synthesized wavelength is longer than those of conventional light source, so the permitted measured range of path-length is enhanced by several hundred times. The measuring accuracy of the interferometer is improved because of the wavelength accuracy of fiber Bragg gratings. In addition, a M-Z interferometer used for high precision displacement measurement proves that this system with simple structure can complete the high-precision measurement.

**Keywords:** fiber Bragg grating; displacement measurement; synthesized wavelength; M-Z interferometer; optical heterodyne

### 引言

1978年, K. O. Hill 等人在加拿大通信研究中心发现  $\text{GeO}_2$  玻璃在  $\text{Ar}^{3+}$  激光器照射下发生折射效应, 从而大大促进了光纤光栅制作技术的发展。现在, 光纤光栅已经广泛应用于各种光纤传感器之中, 用来测量应力、温度和位移等物理量。布喇格光纤光栅近来也得到了很大发展, 现已广泛应用于光纤传感系统中。

由于布喇格光纤光栅装置的合成光源比单个半导体激光器更容易使双波长产生干涉, 所以本文采用光纤光栅作为高效率的光带通滤波器来产生

高精度波长光源。宽带光源经过两个布喇格光栅时产生两个高精度波长的光源, 且宽带光源产生的光强对波长影响不大, 因此测量光程差时不必精确控制由布喇格光栅进入干涉仪的波长。

1960年, Crane 首先提出了光外差干涉仪技术<sup>[1]</sup>。之后, 光外差技术在位移和振动及形貌测量方面得到了成功的应用<sup>[2,3]</sup>。应用光外差马赫-曾德尔干涉仪实时测量位移系统能显著减少外界的干扰, 在通常实验室条件下可以获得稳定的测量结果, 并且依靠合成光源技术可以在很大程度上扩展干涉仪的测量范围。虽然使用两个不同波长的半

收稿日期: 2003-12-10; 修回日期: 2004-07-07

作者简介: 李志全(1954-), 男, 河北人, 燕山大学教授, 博士生导师, 主要从事非线性光电检测、智能仪表和智能控制等研究及教学工作。

半导体激光器可以获得不同的波长,但是当使用两个半导体激光器作为双波长干涉仪的光源时,由于很难同时控制每一个半导体激光器,从而不能输出一个固定的波长。此外,使用一个半导体激光器作为合成光源时,为了使其保持高稳定性,必须严格控制环境的温度和驱动电流。针对这些不良因素,本文提出了一种基于布喇格光纤光栅技术<sup>[4,5]</sup>的新型合成光源进行位移测量的方法。

### 1 测量原理

图1为基于布喇格光纤光栅技术的双波长干涉仪实验装置。波长为 $\lambda=0.98\ \mu\text{m}$ 的大功率半导

体激光器(LD)经波分复用系统(WDM)进入掺铒光纤(EDF)产生一个宽带光源(BLS),反馈控制半导体激光器的驱动电流使宽带光源的输出功率保持常量。经过光谱分析后,宽带光源的带宽范围在 $1.525\sim 1.565\ \mu\text{m}$ 之间(带宽大约为 $40\ \text{nm}$ ),且宽带光源的输出功率大约为 $20\ \text{nW}$ ,波长 $\lambda=1.550\ \mu\text{m}$ 的光纤隔离器(FI)用来阻止反射光从布喇格光栅反射回掺铒光纤中,宽带光纤耦合器用来获得从两个布喇格光栅反射的光。两个布喇格光栅的波长分别用 $\lambda_1$ 与 $\lambda_2$ 表示。由布喇格光栅反射出来的光被送入光干涉仪,其输出强度 $I_{\text{OUT}}$ 可表示为

$$I_{\text{OUT}} = \langle E_1 E_1^* \rangle + \langle E_2 E_2^* \rangle \quad (1)$$

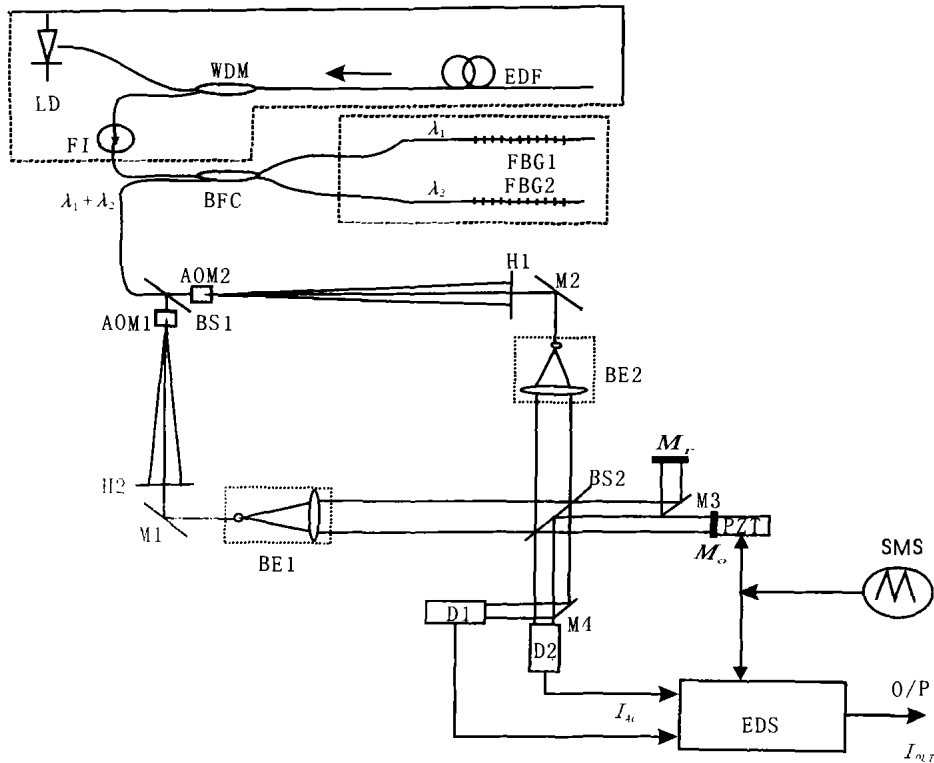


图1 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of the system

式中, $E_1$ 和 $E_2$ 分别表示两束光检波器的电场强度。由基础理论可知:

$$E_1 = A_1 \exp[i(\omega_1 t + 2\pi L_1 / \lambda_1)] + A_1 \exp[i(\omega_1 t + 2\pi L_2 / \lambda_1)] \quad (2)$$

$$E_2 = A_2 \exp[i(\omega_2 t + 2\pi L_1 / \lambda_2)] + A_2 \exp[i(\omega_2 t + 2\pi L_2 / \lambda_2)] \quad (3)$$

式中, $\omega_1$ 与 $\omega_2$ 分别表示2束光的角频率; $L_1$ 与 $L_2$ 分别表示2束光的光程,则光干涉仪的输出信号可表示为

$$I_{\text{OUT}} = K_{c1} P_1 [1 + \cos(\varphi_1)] + K_{c2} P_2 [1 + \cos(\varphi_2)] \quad (4)$$

式中, $K_{c1}$ 和 $K_{c2}$ 分别表示光从2个布喇格光栅反射的相干部分; $P_1$ 与 $P_2$ 分别表示光经2个布喇格光栅反射后的输出功率; $\varphi_1$ 与 $\varphi_2$ 分别表示波长为 $\lambda_1$ 与 $\lambda_2$ 的光在光干涉仪中的周相延迟,它们分别为

$$\varphi_1 = 2\pi(L_1 - L_2) / \lambda_1 \quad (5)$$

$$\varphi_2 = 2\pi(L_1 - L_2) / \lambda_2$$

设 $L = L_1 - L_2$ ,表示光干涉仪的光程差。本文所给

系统测量的位移远比2束光的相干波长小得多,因此可假设 $K_{c1}=K_{c2}=K, P_1=P_2=P$ 。输出信号 $I_{OUT}$ 的交流部分 $I_{AC}$ 则可表示为

$$I_{AC} = KP \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_B) \quad (6)$$

$I_{AC}$ 是由 $I_{OUT}$ 滤去直流信号后得到的。式中

$$\varphi_A = 2\pi L/\Lambda; \quad \varphi_B = 2\pi L/\Gamma \quad (7)$$

式中

$$\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2); \quad \Gamma = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (8)$$

由于波长为 $\lambda_1$ 与 $\lambda_2$ 的光由同一个光源发出,即由一个半导体激光器发出,由半导体激光器的兰姆凹陷特性可知 $\lambda_1 \cong \lambda_2$ ,所以 $\Lambda$ 与 $\Gamma$ 分别表示此双波长干涉仪的合成波长和平均波长,且

$$\Lambda \gg \lambda_1 \cong \lambda_2; \quad \Gamma \cong \lambda_1 \cong \lambda_2 \quad (9)$$

$\Lambda$ 和 $\Gamma$ 可近似表示为

$$\Lambda \cong \lambda_1^2 / (\lambda_1 - \lambda_2); \quad \Gamma \cong 2\lambda_1^2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (10)$$

(6)式中的光相位延迟 $\varphi_A$ 和 $\varphi_B$ 可用来检波不平衡的光程差 $L$ 。本文利用合成光相位延迟 $\varphi_A$ 来测量光程差 $L$ 。对于相干部分检波,平均波长的光相位延迟 $\varphi_B$ 相当于光干涉仪的相位解调器。利用峰值检波和锁相解调等方法可得到这种光源的相干部分,也可利用检波技术记载这2个光源的相干部分。平均光相位延迟 $\varphi_A$ 可由一个解调系数为 $2\pi$ 的锯齿形波来进行相位调整,它的输出信号是正弦信号。同样,对于锁相检波技术,输出信号可以作为参考信号使用。结合两者并经过一个低通滤波器便可得到相干部分。

当 $\lambda_1 \cong \lambda_2$ 时, $\Lambda \gg \lambda_1 \cong \lambda_2, \Gamma \cong \lambda_1 \cong \lambda_2$ ,同时 $\varphi_A \cong \varphi_B \cong \varphi$ 。光干涉仪的光程差用一个锯齿形的检波信号检波之后,光相位检波可以表示为

$$\varphi_m = \alpha t \quad (0 \leq t \leq T) \quad (11)$$

式中, $T$ 和 $\alpha$ 分别是锯齿形检波信号的周期和斜率;峰值检波指数是 $2\pi$ 。交流耦合光接收器把双波长干涉仪的相位检波的干涉输出转换成电信号,其输出 $I_{AC}$ 可表示为

$$\begin{aligned} I_{AC} &= KP \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_m + \varphi_B) \\ &= KP \cos(\varphi_A) \cos(\omega_m t + \varphi_A) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\omega_m = 1/T$ ,表示检波信号的角频率。图2给出了干涉仪输出信号 $I_{AC}$ 与应用锯齿形检波信号之间的关系。由图可得,输出信号是检波指数为 $2\pi$ 的标准正弦波。当输出信号通过一个电解调系统时,其波形可表示为方波信号。此方波信号由参考信号与

输出信号 $I_{AC}$ 混合而得,载波频率 $\omega_m$ 经过低通滤波器可被消除。经过低通滤波器后的输出信号 $I_{OUT2}$ 可写为

$$I_{OUT2} = KP K_0 \cos(\varphi_A) = KP K_0 \cos(2\pi L/\Lambda) \quad (13)$$

式中, $K_0$ 为电路的传递增量。

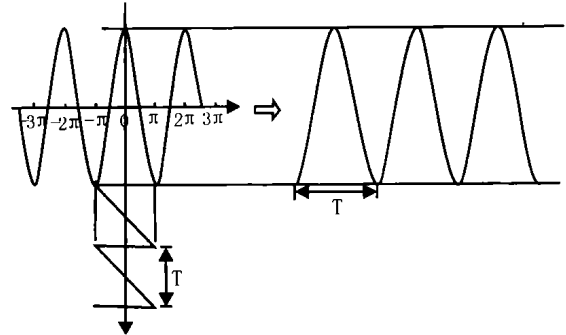


图2 干涉仪输出信号与锯齿形检波信号间的关系图

Fig. 2 The relation between the output signal and the toothed demodulation signal applied in the interferometer

## 2 实验现象和结果

实验中合成光源的波长 $\Lambda$ 随光程差变化时的输出信号如图3所示。该图显示了(6)~(8)式之间的关系。对于文中的合成波长干涉仪,光相位延迟

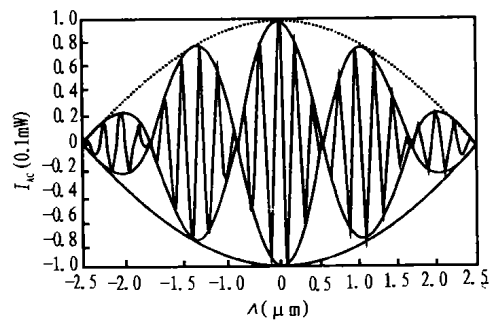


图3 随光程差变化时合成光源波长的光干涉输出信号

Fig. 3 Optical interfering output signal of the synthesized wavelength when varying with optical path differences

为 $\varphi_A = 2\pi L/\Lambda$ ,且光相位延迟的变化量 $\delta\varphi_A$ 是由光程差与合成波长的变化引起的。它们之间的关系可表示为

$$\delta\varphi_A/\varphi_A = \delta L/L - \delta\Lambda/\Lambda \quad (14)$$

由 $\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ ,可得 $1/\Lambda = (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)$ 。对 $1/\Lambda$ 取微分可得:

$$\delta\Lambda/\Lambda = 2\delta\lambda/\lambda + \delta(\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda \times \Lambda/\lambda \quad (15)$$

当布喇格光栅有相近的温度关联系数, 且温度由相同的温度控制器稳定时,  $\delta(\lambda_1 - \lambda_2)$  近似为 0。(15) 式中由合成波长引起的影响可以忽略, 则(15)式可变为

$$\delta\Lambda/\Lambda = 2\delta\lambda/\lambda \quad (16)$$

由于波长变化  $\delta\lambda$  是由温度变化  $\delta T$  与驱动电流变化量  $\delta I$  共同决定的, 因此波长变化  $\delta\lambda/\lambda$  可表示为

$$\delta\lambda/\lambda = [(\delta\lambda/\lambda)/\delta T]\delta T + [(\delta\lambda/\lambda)/\delta I]\delta I \quad (17)$$

又由于布喇格光栅属被动装置, 其驱动电流的变化量  $\delta I$  可以忽略。通常  $\delta\lambda/\delta T = 0.01 \text{ nm/C}$ , 且对于波长为  $1550 \text{ nm}$  的布喇格光栅, 使其稳定的温度变化量  $\delta T$  为  $0.01 \text{ C}$ 。由此可得单个布喇格光栅为

$$\delta\lambda/\lambda = 10^{-7} \quad (18)$$

而合成布喇格光栅

$$\delta\Lambda/\Lambda = 2 \times 10^{-7} \quad (19)$$

然而, 对于同一波长下工作的一个半导体激光器, 其

$$\begin{aligned} \delta\lambda/\delta T &= 0.3 \text{ nm/C} \\ \delta\lambda/\delta I &= 0.024 \text{ nm/mA} \end{aligned} \quad (20)$$

当温度和驱动电流被稳定控制在  $0.01 \text{ C}$  和  $0.01 \text{ mA}$ , 且  $\delta\lambda/\lambda = 2 \times 10^{-6}$  时, 可得到稳定的波长。对于合成半导体激光器,  $\delta\Lambda/\Lambda = 4 \times 10^{-6}$  时得到稳定的波长。固定光相位延迟的合成波长  $\Lambda$  的最小可探测光程差可表示为

$$\delta L/L = \delta\Lambda/\Lambda \quad (21)$$

(18) 和 (19) 式表明, 对于布喇格光栅,  $\delta\Lambda/\Lambda = 2 \times 10^{-7}$ ; 对于两个半导体激光器,  $\delta\Lambda/\Lambda \geq 4 \times 10^{-6}$ 。如果光程差  $L = 100 \mu\text{m}$ , 则布喇格光栅和半导体激光器的最小探测光程差分别为  $0.02 \text{ nm}$  和  $0.4 \text{ nm}$ 。由此可见, 被动的布喇格光栅装置比主动的半导体激光器在波长稳定和平衡等方面性能要好得多。此外, 在光程差探测分解方面, 合成光源也比半导体激光器好得多。

合成光源经过干涉仪产生的波长变化量  $\Delta\Lambda$  在很大程度上影响着干涉仪测量光程差的精度。最小探测的光程差与固定光相位延迟和光源的波长变化量之间的关系可表示为

$$\Delta L/L = \Delta\Lambda/\Lambda \quad (22)$$

布喇格光栅是一个被动装置, 当波长变化量为  $0.1 \text{ nm}$  时被驱动。然而, 根据材料的特征以及制造工艺, 波长为  $1550 \text{ nm}$  的半导体激光器在波长变化

量大约为  $10 \text{ nm}$  时被驱动。因此

$$\Delta\Lambda/\Lambda|_{\text{laserdiode}} = 100 \times \Delta\Lambda/\Lambda|_{\text{FBG}} \quad (23)$$

故不需要再进行系统校准。除此之外, 由布喇格光栅构成的双波长干涉仪的测量精度远比半导体激光器的好的。

一台通常使用的商用半导体激光器, 其输出功率和线宽分别是  $1 \text{ nW}$  和  $1 \text{ nm}$ 。然而, 对于一个布喇格光栅,  $99\%$  的反射光用于输出功率和线宽分别为  $40 \text{ nW}$  和  $40 \text{ nm}$  的掺铒光源。布喇格光栅反射光的输出功率和线宽分别为  $0.1 \text{ nW}$  和  $0.1 \text{ nm}$ , 因此有

$$P_0|_{\text{FBG}} = 0.1 P_0|_{\text{laserdiode}} \quad (24)$$

由于系统的信噪比依赖于光源的输出功率, 所以, 经布喇格光栅后的信噪比也比半导体激光器的小。光相位测量限制的基本原理是依据光干涉仪中光子发出的噪声建立的, 且噪声的大小由光子探测器所接收的光强决定, 则相位噪声  $\delta\varphi_{ms}$  可表示为

$$\delta\varphi_{ms} = (2h\nu/P_0)^{1/2} B \quad (25)$$

式中,  $h$  和  $B$  分别为普朗克常数和探测系统的带宽;  $\nu$  和  $P_0$  分别为光源的频率和光功率。对于输出功率为  $100 \mu\text{W}$  的光源, 其最小可探测的光相位延迟大约是  $10^{-7} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ , 而布喇格光栅的输出功率是半导体激光器的  $1/10$ , 所以它的最小光相位延迟为  $\delta\varphi|_{\text{min}} = 10^{-6} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ 。

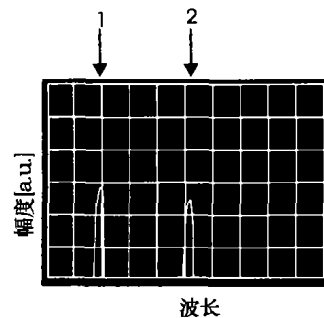


图 4 由两个布喇格光纤光栅反射产生的光源光谱

Fig. 4 Optical spectrum of light sources generated by two fiber Bragg gratings

图 4 表示了实验中两个布喇格光纤光栅反射产生的光源的光谱, 图中 1 和 2 分别表示合成光源的 2 个波长  $1.527 \mu\text{m}$  和  $1.550 \mu\text{m}$ , 其带宽分别为  $0.1 \text{ nm}$  和  $0.2 \text{ nm}$ 。根据  $\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ , 可计算出合成波长等于  $110 \mu\text{m}$ , 其分别对应的相干长度是  $16 \text{ mm}$  和  $8 \text{ mm}$ 。显然, 相干长度要比合成波长长得多, 且在测量过程中 2 个光源的能见度可认为

是一个常量。

2 个光强大约为  $26 \mu\text{W}$  的光源结合在一起通过宽带光纤耦合器,经分光镜 BS1 分成 2 束,分别进行频率调制。声光调制器 AOM1 和 AOM2 的驱动频率分别是 39.89 MHz 和 40.00 MHz。光路中的小孔用来选择声光调制器的衍射级次。本光路仅让 +1 级的衍射光通过。这样,由反射镜 M2 反射的光经 BE2 扩束后透过分光镜 BS2,其中一部分光经过待测移动镜反射,与经过 M1→BE1→BS1 的光一起射入光电探测器 1;另一部分光经过 M3→参考镜→M3→BS2→M4,与经过 M1→BE1→BS2→M4 的另一频率的光一起射入探测器 2,探测器 1 和 2 的信号分别作为待测信号和参考信号。当 PZT 驱动的反射镜 M 移动距离  $d$  时,2 束光的光程变化为  $2d$ ,相位差为  $\Delta\varphi=4\pi d/\lambda$ 。测出相位的变化  $\Delta\varphi$  即可得到反射镜 M 的位移  $d=\lambda\Delta\varphi/4\pi$ 。经频率为 100 Hz 的锯齿形解调信号解调后作用于压电传感器(PZT)上。压电传感器用来观察马赫-曾德尔干涉仪的相位变化,把由功能发生器产生的频率为 100 Hz 的锯齿形解调信号输入到功率放大器中(对于平均波长为  $\Gamma$  的锯齿形解调信号其解调指数为  $2\pi$ )。2 个波长在测量范围内保持不变,这说明了为何光干涉仪在解调后的输出是一个标准的正弦曲线。干涉光起初被转换为电信号,然后被自混解调系统解调。当图像探测器输出的电信号开始通过比较器时,其波形被分割为方波,且被用作电混合器(EM)的反射信号。在此期间图形探测器输出的

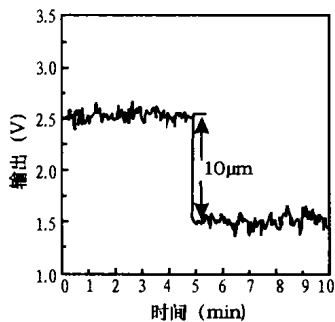


图 5 光程差每变化  $10 \mu\text{m}$  时的测量输出

Fig. 5 Measured output with a optical path-difference step change of  $10 \mu\text{m}$

电信号也被输入到电混合器的输入口。当电混合器的输出通过低通滤波器(带宽为  $100 \mu\text{m}$ )时,得到合成光源的各光程差  $L_1, L_2$  和  $L_3$  等的可见度。比较各种光程差,可知其测量范围大约为  $110 \mu\text{m}$ ,与

合成波长大致相等。在整个试验过程中,各种位移(如极化变化引起的光纤机械振动等)会影响实验结果。输出光强由反馈来控制,即由半导体激光器的驱动电流控制。极化控制器使极化变化的影响减至最小,这个实验组被隔离以避免环境引起的位移变化。图 5 表示了光程差每步变化为  $10 \mu\text{m}$  时的测量结果,合成光源测量的最小光程差为  $6 \text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。表 1 为合成光源与半导体激光器的性能比较。从表中可以看出合成光源的特点。

表 1 合成光源与半导体激光器的性能比较

Table 1 Performance comparison between synthesized light-source and semiconductor laser

光源	波长稳定性 ( $\delta\lambda/\lambda$ )/ $\delta T$	再现性 ( $\delta\lambda$ )	可测最小相位 延迟( $\delta\varphi_{\text{min}}$ )	输出光强
合成光源	$<10^{-5}$	$<0.1 \text{ nm}$	$10^{-6} \text{ rad}/\text{Hz}^{1/2}$	$<0.1 \text{ mW}$
半导体激光器	$<10^{-4}$	$<10.0 \text{ nm}$	$10^{-7} \text{ rad}/\text{Hz}^{1/2}$	$<1.0 \text{ mW}$

### 3 结论

本文提出了一种基于布喇格光栅反射的双波长干涉仪,其光源由宽带光源经布喇格光栅而得到,且波长的稳定性由温度稳定器进行控制,合成波长比常规光源的波长长,因此所允许的测量范围提高了几百倍。由于使用了一个解调指数为  $2\pi$  的解调信号,由其得到的干涉信号的波形经接收图像探测器后得到一个标准正弦信号。此外,本文还使用了光外差位移实时测量系统,此系统采用了共光路技术,有效地降低了振动和空气扰动等环境因素的干扰,使外差技术高灵敏度的优点得到了充分发挥。

#### 参考文献:

- [1] H K Tonvhoff, C Emmelmann. Laser cutting of advanced ceramics [J]. Annals of the CIRP, 1989, 38 (1):114—116.
- [2] E Westkamper. Grinding assisted by Nd-YAG laser [J]. Annals of the CIRP, 1995, 44(1):15—20.
- [3] J C Cartledge. Comparison of effective  $\alpha$ -parameters for semiconductor Mach-Zehnder optical modulator [J]. J Lightwave technol, 1998, 16:372—378.
- [4] B Lissak, A Arie, M Tur. High resolution strain sensing by locking lasers to fiber-Bragg gratings [J]. SPIE, 1998, 3483:250—254.
- [5] 刘志国,刘云启,关伯鸥,等.高灵敏度光纤光栅传感特性测试仪研制[J].光子学报,1999,28(2):138—141.