

长程轮廓仪菲涅耳双棱镜对分束结构

廖家胜^{1,2} 巩岩¹ 张巍¹ 李晶^{1,2} 李春才^{1,2} 姚长呈^{1,2} 闵林^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对长程轮廓仪中的一个重要光学部件——分束器,设计了一种菲涅耳双棱镜对分束结构。其功能是将一束正入射平行光分成两束间距可变、强度相等且光程差为零的平行光。对菲涅耳双棱镜对结构特点进行了详细的描述,并对基于菲涅耳双棱镜对分出的两束光在傅里叶透镜后焦面上的干涉条纹振幅分布和能量分布做了理论分析和数值仿真。分析和仿真结果表明,菲涅耳双棱镜对不仅具有已有的等振幅分束结构同样的功能,而且能使长程轮廓仪探测精度更高。对比菲涅耳双棱镜对与已有的 4 种等振幅分束结构的性能发现,菲涅耳双棱镜对兼备结构简单、满足等光程条件以及分出的两束光间距可变等优异分光效果,可作为已有等振幅分束结构的一种替代结构。

关键词 测量;长程轮廓仪;分束结构;菲涅耳双棱镜

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0123001

Beam Splitter with Two Fresnel Biprisms for Long Trace Profiler

Liao Jiasheng^{1,2} Gong Yan¹ Zhang Wei¹ Li Jing^{1,2} Li Chuncai^{1,2}
Yao Changcheng^{1,2} Min Lin^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Beam splitter is one of the most important components in long trace profiler. A new beam splitter which is composed of two Fresnel biprisms is proposed. An incident beam is divided into two parallel exiting beams with a variable separation, equal-intensity and zero optical path difference. The characteristics of the Fresnel biprisms is described in detail. The amplitude pattern and intensity pattern of interference fringes made by two exiting beams in detector is analyzed and simulated. The result of analysis and simulation suggests that the Fresnel biprisms not only owns the same function of four existing equal amplitude-splitting beam splitters but also can obtain high accuracy. We comparing the performance of the Fresnel biprisms with four existing equal amplitude-splitting beam splitters, and the result states that the Fresnel biprisms simultaneously own many merits including simple structure, zero optical path difference and variable separation with the exiting beams and so on. It can be a substitute for the existing amplitude-splitting beam splitters.

Key words measurement; long trace profiler; beam splitter; Fresnel biprism

OCIS codes 120.6650; 230.5480; 340.6720; 220.4840

1 引言

同步辐射光学^[1]元件不同于可见光波段的传统光学元件,同步辐射光学元件自身很长,其形状一般是椭圆、抛物线、双曲线以及超环面等复杂非球面,

传统光学检测方法^[2-5](如斐索型干涉仪等)很难对其进行检测。为了检测此类光学元件表面面型,基于 Bieren^[6-7]提出的细光束干涉原理, Takacs 等^[8-9]于 1987 年提出了一种等光程分束系统的细

收稿日期: 2013-06-14; 收到修改稿日期: 2013-07-16

基金项目: 国家杰出青年科学基金(41104122)、中国与俄罗斯国家科技合作次助项目(2011DFR10010)

作者简介: 廖家胜(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学检测等方面的研究。E-mail: expore07@163.com

导师简介: 巩岩(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光机集成设计和系统装调方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

光束干涉轮廓仪,并命名为长程轮廓仪(LTP)。它通过扫描测量被测表面斜率变化,进而获得被测表面的轮廓。在此后的二十多年里,长程轮廓仪在提高测量精度、减小仪器系统误差方面取得了很大的进展,并相继诞生了LTP II^[10]、五棱镜长程轮廓仪(PPLTP)^[11]、ISLTP^[12]、VSLTP^[13-14]、衍射型LTP^[15-16]、PTLTP^[17]等轮廓仪。2005年,Qian等^[18]又提出了多功能轮廓仪(LTP-MF),进一步扩展了轮廓仪的应用范围。在长程轮廓仪系统中,分束结构是其最重要的光学部件之一,分束结构分为两种:等振幅分束结构和等波前分束结构。等振幅分束结构主要功能是将一束入射平行光分成两束具有一定间距且强度相等的平行光,目前文献报道的等振幅分束结构主要有4种^[19]:Bieren分束结构^[7]、平行平板,以及Takacs等^[9,19]提出的两种等振幅、零光程差分束结构。Bieren分束结构和平行平板不满足零光程差条件,测量结果易受光源频率或波长漂移等影响;Takacs等^[8-9,18]提出的第一种结构满足零光程差条件,但结构复杂、稳定性差,第二种分束结构满足零光程差条件、结构简单且稳定性好,但分开的两束光之间的间距不可变,其应用范围受到一定限制。等波前分束结构主要功能是将一束入射平行光分成两束强度相等且相位相差 π 的平行光。Zhao等^[15]提出的 π 阶跃位相板是其最具有代表性的一种结构,大部分等波前分束结构从原理和结构上都与 π 阶跃位相板类似。

本文针对等振幅分束结构的不足,设计了一种菲涅耳双棱镜对分束结构,并对菲涅耳双棱镜对进行了详细描述,且在理论上推导出了基于菲涅耳双棱镜对分出的两束光在傅里叶透镜后焦面上的干涉条纹振幅分布公式。通过对干涉条纹振幅分布和能量分布的理论分析以及菲涅耳双棱镜对与4种等振幅分光结构的性能对比,阐述了菲涅耳双棱镜对的优势及其应用前景。

2 菲涅耳双棱镜对分束结构和理论分析

2.1 菲涅耳双棱镜对

菲涅耳双棱镜对由菲涅耳双棱镜A和B组成,如图1所示。一束正入射平行光投射到该分光结构后,首先经棱镜A折射变成两束强度相等、方向不同的平行光,再经棱镜B折射后变成两束有一定间距、强度相等且相位相同的平行光。菲涅耳双棱镜

对需满足以下条件:1)棱镜A和棱镜B的顶角 α 相同;2)棱镜A和棱镜B的折射率一样,即两者材料相同;3)两棱镜同光轴放置。经过棱镜B后两束光之间的间距 d 可表示为

$$d = \frac{2d_0 \tan[\arcsin(n \sin \alpha) - \alpha]}{1 - \tan \alpha \tan[\arcsin(n \sin \alpha) - \alpha]}, \quad (1)$$

式中 d_0 为棱镜A到棱镜B之间的距离, α 为两棱镜的顶角, n 为两棱镜的折射率。由(1)式可知,在顶角 α 确定的情况下,两束光之间的间距可通过调节棱镜A与棱镜B之间的距离来改变。

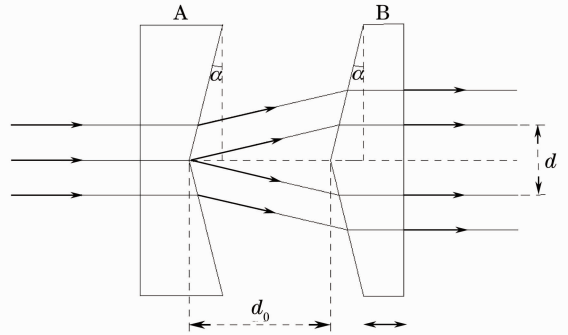


图1 菲涅耳双棱镜对
Fig. 1 Fresnel biprisms

2.2 LTP测量原理

绝大多数长程轮廓仪(LTP)都是基于细光束干涉原理设计的,其测量过程和数据处理较为相似。下面以PPLTP为例介绍LTP的工作原理。PPLTP基本结构如图2所示,由He-Ne激光器发出的光束被耦合到保偏光纤内传播,经过准直镜准直后投射到菲涅耳双棱镜对,分出的两束光经过半波片(HWP)后进入偏振分光棱镜(PBS)。透过偏振分光棱镜的两束光称为测量光,被偏振分光棱镜反射的两束光称为参考光。半波片的作用是调节参考光和测量光的强度。测量光经过1/4波片(QWP)和五角棱镜后进入被测面(SUT),被测面反射后再经过五角棱镜,1/4波片。两次经过1/4波片使光偏振方向改变 90° ,因此再次经过偏振分光棱镜的测量光被反射,经过FT透镜并在其后焦面CCD上发生干涉。参考光经过1/4波片进入参考镜,被参考镜反射后,再次经过1/4波片且透过偏振分光棱镜,出射光经过傅里叶变换(FT)透镜,在其后焦面上发生干涉。通过测量参考光和测量光条纹亮斑之间的距离,求出被测面被测点处的斜率,进而获得被测面面型轮廓。

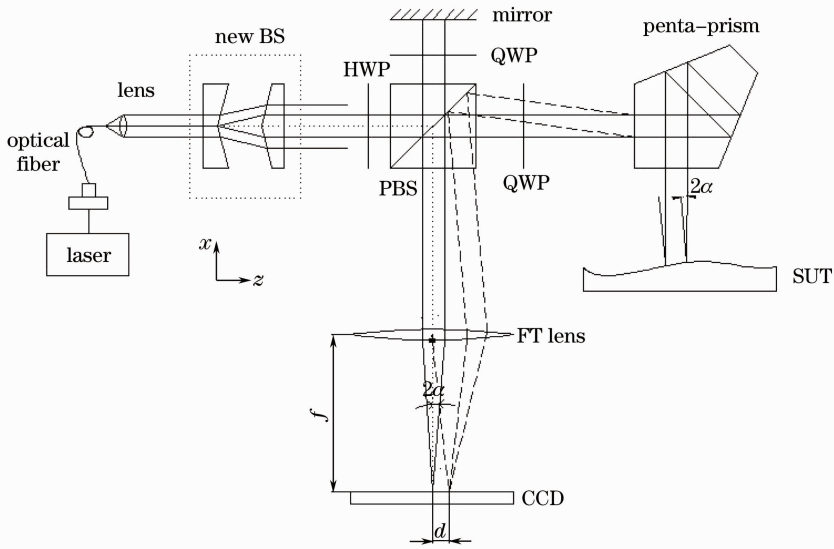


图 2 PPLTP 基本结构

Fig. 2 Schematic of PPLTP configuration

2.3 理论分析

由于轮廓仪的光源是激光，入射到菲涅耳双棱镜对上的光束为高斯光束，用数学公式表示如下：

$$A_1(x) = A \exp\left(-\pi \frac{x^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

式中 $R/\sqrt{\pi}$ 为激光束的束腰半径， A 为常数。高斯光束经过菲涅耳双棱镜对后分成两束平行的半高斯光束，分开后两束光的振幅分布分别为

$$A_{2a}(x) = \begin{cases} A \exp\left[-\pi \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 / R^2\right], & x > \frac{d}{2} \\ 0, & x < \frac{d}{2} \end{cases},$$

$$A_{2b}(x) = \begin{cases} 0, & x > -\frac{d}{2} \\ A \exp\left[-\pi \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 / R^2\right], & x < -\frac{d}{2} \end{cases}. \quad (3)$$

从菲涅耳双棱镜对出射的两束平行光经被测面反射后，由于被测面的特殊面型，两束反射光之间将会产生相对相位，反射后波前的相移效应如图 3 所示，任意两束反射光束沿 FT 透镜前焦平面上 u 轴的相对相位^[15]为

$$\varphi(u) = \frac{2\pi}{\lambda} u \tan 2\theta, \quad (4)$$

式中 θ 为被测面上被测点处的倾角。经被测面反射

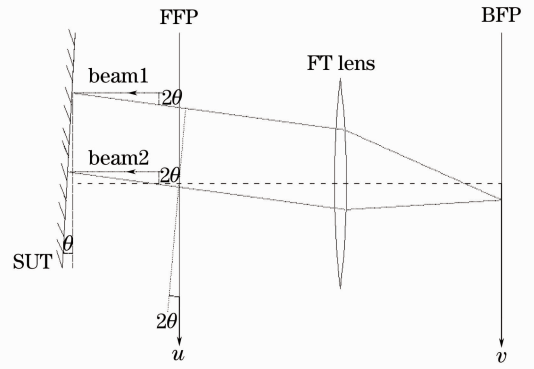


图 3 反射后波前的相移效应

Fig. 3 Effects of phase shift from reflection

产生相移后，前焦面（FFP）光束的复振幅为

$$A_f(u) = [A_{2a}(u) + A_{2b}(u)] \exp[-i\varphi(u)]. \quad (5)$$

假设 FT 透镜无几何像差，且透镜口径足够大，则后焦面（BFP）上的复振幅分布是前焦面上复振幅的标准傅里叶变换。后焦面上复振幅为

$$A_b(v) = \mathcal{F}[A_f(u)]. \quad (6)$$

根据傅里叶相移定理

$$\mathcal{F}[g(u) \exp(-i2\pi su)] = G(v-s), \quad (7)$$

式中 $G(v)$ 为 $g(u)$ 的傅里叶变换。将 (7) 式应用于 (6) 式，可得

$$A_b(v) = \mathcal{F}[A_{2a}(u) + A_{2b}(u)] \otimes \delta\left(v - \frac{\tan 2\theta}{\lambda}\right), \quad (8)$$

式中 \otimes 符号代表卷积运算，利用欧拉定理和变量代换， $A_{2a}(u) + A_{2b}(u)$ 的傅里叶变换结果如下：

$$\mathcal{F}[A_{2a}(u) + A_{2b}(u)] = AR \cos(\pi vd) \exp(-\pi R^2 v^2) - 2AR \sin(\pi vd) \int_0^\infty \exp(-\pi u^2) \sin(2\pi Rvu) du. \quad (9)$$

令 $K(v) = 2 \int_0^\infty \exp(-\pi u^2) \sin(2\pi Rvu) du$, 结合(8)~(9)式, 可得

$$A_b(v) = AR \cos\left[\pi d\left(v - \frac{\tan 2\theta}{\lambda}\right)\right] \exp\left[-\pi R^2\left(v - \frac{\tan 2\theta}{\lambda}\right)^2\right] - AR \sin\left[\pi d\left(v - \frac{\tan 2\theta}{\lambda}\right)\right] K\left(v - \frac{\tan 2\theta}{\lambda}\right). \quad (10)$$

由于被测面的倾角 θ 很小, 故可对正切函数近似

$$\tan 2\theta \approx 2 \tan \theta, \quad (11)$$

又

$$S_{\text{slope}}(x) = \tan \theta, \quad (12)$$

式中 $S_{\text{slope}}(x)$ 表示被测面上被测点处的斜率。将(12)~(13)式代入(11)式, 得

$$A_b(v) = AR \cos\left[\pi d\left(v - \frac{2S_{\text{slope}}(x)}{\lambda}\right)\right] \exp\left\{-\pi R^2\left[v - \frac{2S_{\text{slope}}(x)}{\lambda}\right]^2\right\} - AR \sin\left\{\pi d\left[v - \frac{2S_{\text{slope}}(x)}{\lambda}\right]\right\} K\left[v - \frac{2S_{\text{slope}}(x)}{\lambda}\right]. \quad (13)$$

(13)式为菲涅耳双棱镜对分出的两束光在傅里叶透镜后焦面上的干涉振幅分布。后焦面上干涉条纹的能量分布为

$$I_b(v) = A_b(v)A_b^*(v). \quad (14)$$

基于等振幅分束结构分出的两束光在傅里叶透镜后焦面上的干涉振幅分布由 Irick^[20]推导出, 去掉常数项因子的振幅公式表示为

$$A'_b(v) = \cos\left\{\pi d\left[v - \frac{2S_{\text{slope}}(x)}{\lambda}\right]\right\} \exp\left\{-\pi R^2\left[v - \frac{2S_{\text{slope}}(x)}{\lambda}\right]^2\right\}. \quad (15)$$

对比(13)式和(15)式可知, 将(13)式中常数因子 AR 去掉后, (13)式中的左半部分与 Irick 推导的振幅公式相同。由于(13)式和(15)式中的斜率项只影响测量光束在后焦面上干涉条纹的位置, 不影响条纹振幅分布形式, 因此在分析条纹振幅分布形式时, 可令斜率等于零。令斜率为零后的(13)式中的右半部分是一个关于 v 轴偶对称的函数, 右半部分中的积分函数 $K(v)$ 关于 v 轴奇对称, 当 $v = 0$ 时, $K(v) = 0$, 在这一点处(13)式中右半部分对左半部分没有影响。 $v = 0$ 的这一点即为振幅最大, 光强最强点, 在这一点处菲涅耳双棱镜对与等振幅分束结构的能量分布一样。

为了观察(13)式中各个频率处的振幅分布, 对 $K(v)$ 进行数值积分, 积分公式采取复合抛物线求积公式^[21], $K(v)$ 函数中的各个参数分别取 $R = \sqrt{\pi} \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, 由于高斯函数的衰减特性, 将 u 的积分区间取为 $(0, 2)$, 积分结果如图 4(a) 所示。积分结果图显示 $K(v)$ 函数是一种奇对称函数且在 $(0, \infty)$ 区间先增大后减小。从数学上看, $K(v)$ 可视为一个在零到无穷大区间上的高斯函数被一个频率

可变的正弦函数调制。当频率很大(有效积分区间包含多个正弦函数周期)时, 由于正弦函数在一个周期内的积分为零, 此时频率越大, 积分值很小; 当频率很小(有效积分区间远小于 $1/4$ 个正弦函数周期)时, 相当于高斯函数乘了一个特别小的因子, 此时频率越小, 积分值也小, 此分析与数值计算结果相符, 这也间接证明数值积分结果的正确性。

图 5(a)和图 6(a)分别表示基于等振幅分光结构的振幅分布和能量分布, 图 5(b)和图 6(b)分别表

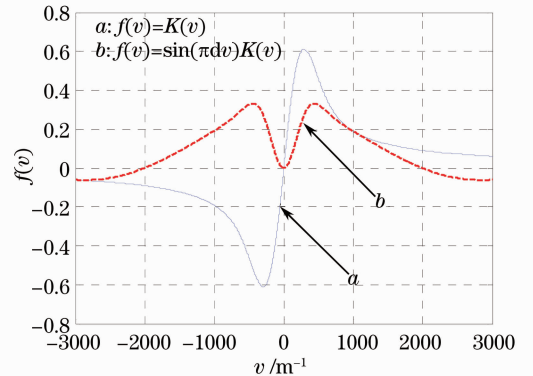


图 4 数值分析结果

Fig. 4 Numerical analysis result

示基于菲涅耳双棱镜对的振幅分布和能量分布。可知,菲涅耳双棱镜对的能量分布与等振幅分光结构的能量分布基本相同,差别之处在于,中心条纹宽度比等振幅分光结构要窄,两个旁瓣比等振幅分光结构的要大,中心宽度越窄,说明干涉条纹愈明锐,探测精度更高,旁瓣会给轮廓仪的测量带来一些不利的影 响,但这个影响可以通过数字图像处理的方法滤掉。因此,菲涅耳双棱镜对相比等振幅分光结构,可获得更高的探测精度。从物理上看,FT 透镜前焦平面上两束光的干涉类似于双缝干涉。双缝的零级条纹宽度取决于单缝的宽度及两缝之间的间距,宽度和间距越大,中心条纹越尖锐。对于细光束干涉,由于光束宽度很窄,影响中心条纹宽度主要因素是两束光之间的间距。若以一个单缝代替分束结构分出的一束光,则两种分束结构的两个单缝之间的间距不等。若等振幅分束结构的分出的两束光的间距为 d ,则其相应两个单缝之间的间距为 d ;若菲涅耳双棱镜对分出两束光的间距为 d [(1)式],则其相应两个单缝之间的间距为 d 加上其单缝尺寸。因此,

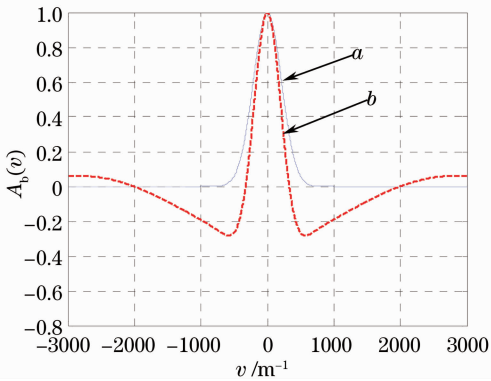


图 5 (a) 基于等振幅分束结构的振幅分布;(b) 基于菲涅耳双棱镜对的振幅分布

Fig. 5 (a) Amplitude pattern based on equal amplitude-splitting beam splitters; (b) amplitude pattern based on Fresnel biprisms

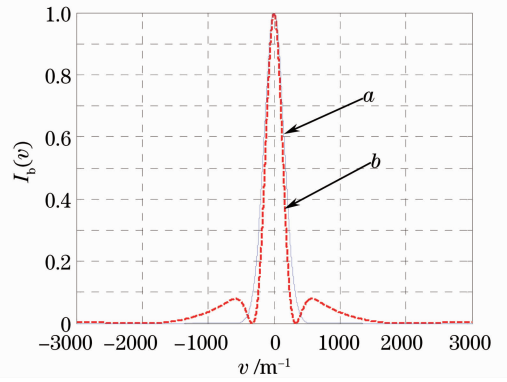


图 6 (a) 基于等振幅分束结构的能量分布;(b) 基于菲涅耳双棱镜对的能量分布

Fig. 6 (a) Intensity pattern based on equal amplitude-splitting beam splitters; (b) intensity pattern based on Fresnel biprisms

菲涅耳双棱镜对两个窗口之间的间距比等振幅分束结构两个窗口之间的间距要大,其中心条纹比等振幅分束结构的要窄,分辨率更高。

3 菲涅耳双棱镜对分束结构的优势

对于长程轮廓仪中的分束结构而言,其性能好 坏取决于其分束效果,理想的分束效果是出射的两束光光程相等、强度相等且间距可变。光程相等可以避免测量过程中由于光源频率或波长漂移所引起的误差^[22];强度相等可以使干涉条纹对比度更好;间距可变可适应不同测量要求,提高测量效率。为了比较菲涅耳双棱镜对与等振幅分束结构,图 7 列举了 4 种主要的等振幅分束结构。Bieren 分束结构 [如图 7(a)所示]由一个分光棱镜(BS)和一块平面镜组成,它可得到两束强度相等、间距可变的平行光,但两束光的光程差不等;平行平板[如图 7(b)所示]利用其二次反射可得到两束强度相等、间距可变的平行光,但两束光的光程差不等;Qian I [图 7(c)所示]即 Qian 等提出的第一种分束结构,由一个分光棱镜和两个反射直角棱镜组成,它可实现光程相等、强

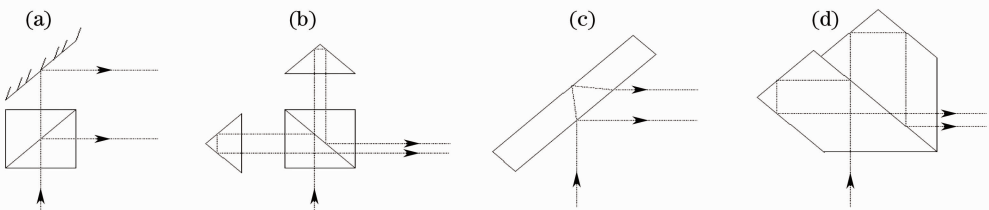


图 7 4 种等振幅分光结构。(a) Von Bieren;(b) 平行平板;(c) Qian I ;(d) Qian II

Fig. 7 Four equal amplitude-splitting beam splitters. (a) Von Bieren; (b) parallel plate; (c) Qian I ; (d) Qian II

度相等且间距可变的分束效果,但其结构复杂、稳定性差。Qian II [如图 7(d)所示]是 Qian 等提出的第二种分束结构,由两个梯形形状棱镜胶合而成,该结构简单、稳定性好、误差小,但该结构分开的两束光之间的间距固定,使得其应用范围受到一定限制。菲涅耳双棱镜对与 4 种等振幅分光结构的比较如

表 1 五种分光结构的性能对比

Table 1 Comparison of five beam splitters

	Von bieren's	Parallel plate	Qian I	Qian II	Fresnel biprisms
Figure	Fig. 7(a)	Fig. 7(b)	Fig. 7(c)	Fig. 7(d)	Fig. 1
Equal optical length	No	No	Yes	Yes	Yes
Stability	Not good	Good	Not very good	Good	Good
Structure	Complex	Most simple	Complex	Monolithic	Simple
Beam separation	Adjustable	Fixed	Adjustable	Fixed	Adjustable
Frequency influence	Severe	Less	No	No	No

4 结 论

提出了一种应用于长程轮廓仪的菲涅耳双棱镜对分束结构,并对其特点进行了详细的描述。菲涅耳双棱镜对主要功能是将一束正入射平行光分成两束间距可变、强度相等且光程相等的平行光。理论上分析了基于菲涅耳双棱镜对分开的两束光在 FT 透镜后焦面上的干涉条纹振幅分布和能量分布,理论分析表明,新分光结构不仅具有与等振幅分光结构相同的功能,同时还能使长程轮廓仪探测精度更高。对比菲涅耳双棱镜对与 4 种等振幅分光结构的性能发现,菲涅耳双棱镜对具有更为优异的分光效果,实用性很强,可作为已有的四种等振幅分光结构的一种替代结构。

参 考 文 献

- Lin Weihao, Luo Hongxin, Song Li, *et al.*. Absolute flatness measurement of optical elements in synchrotron radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0912005.
- 林维豪, 罗红心, 宋 丽, 等. 同步辐射用光学元件面形绝对检测方法的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0912005.
- Yuan Qun, Gao Zhishan, Li Jianxin, *et al.*. Research on techniques of fabrication and measurement about Fizeau infrared interferometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0808001.
- 袁 群, 高志山, 李建欣, 等. 斐索式红外干涉仪研制和测试技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0808001.
- Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Research on the randomly phase shifting algorithm with wavelength tuning [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0508002.
- 郭仁慧, 李建欣, 朱日宏, 等. 波长调谐随机移相算法的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508002.
- V FPaz, S Peterhansel, K Frenner, *et al.*. Solving the inverse grating problem by white light interference Fourier scatterometry [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(11): e36.
- Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112001.
- 王汝冬, 田 伟, 王 平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112001.
- K V Bieren. Pencil beam interferometer for aspheric optical

表 1 所示,从表 1 可以看出,菲涅耳双棱镜对相比已有的等振幅分光结构,在分光效果上具有很大的优势,而且,由理论分析可知,菲涅耳双棱镜对使长程轮廓仪的探测精度更高。因此,菲涅耳双棱镜对可作为已有的 4 种等振幅分光结构的一种替代结构。

surfaces [C]. *SPIE*, 1982, 343: 101-108.

- K Von Bieren. Interferometry of wave fronts reflected off conical surfaces [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(14): 2109-2114.
- P Z Takacs, S N Qian. Design of a long trace surface profiler [C]. *SPIE*, 1987, 749: 59-64.
- P Z Takacs, S N Qian. Surface Profiling Interferometer [P]. US patent: U4884697, [1989-12-05].
- Peter Z Takacs, Eugene L Church, Cynthia J Bresloff, *et al.*. Determining surface profile from sequential interference patterns from a long tracer profiler [J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, 38(25): 5468-5479.
- S N Qian, W Jark, P Z Takacs. The penta-prism LTP; a long-trace-profiler with stationary optical head and moving penta-prism [J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(3): 2562-2569.
- S Qian, W H Jark, P Z Takacs, *et al.*. *In situ* surface profiler for high heat load mirror measurement [J]. *Opt Eng*, 1995, 34(2): 396-402.
- H Li, P Z Takacs, T Oversluisen. Vertical scanning long trace profiler: a tool for metrology of X-ray mirrors [C]. *SPIE*, 1997, 3152: 180-187.
- Li Shun, Gong Yan. Error analysis and correction during measurement of tube-shaped super-smooth mirrors using long trace profiler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112001.
- 李 顺, 巩 岩. 长程轮廓仪用于筒状超光滑表面测量的误差分析及校正[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1112001.
- Y Zhao, Z Li, D Li, *et al.*. Principle of π -phase plate long trace profiler for synchrotron radiation optics [J]. *Opt Commun*, 2001, 200(1): 23-26.
- D Zeng, T Xiao, G Du, *et al.*. New long trace profiler based on phase plate diffraction for optical metrology of SSRF [J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77(9): 093305.
- S N Qian, P Z Takacs. Portable long trace profiler: concept and solution [J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, 72(8): 3198-3204.
- Shinan Qian, Qiuping Wang, Yilin Hong, *et al.*. Multiple functions long trace profiler (LTP-MF) for national synchrotron radiation laboratory of China [C]. *SPIE*, 2005, 5921: 41-47.
- S Qian, P Z Takacs. Equal optical path beam splitter for a pencil beam interferometer and shearing interferometer [J]. *Opt Eng*, 2003, 42(4): 929-934.
- S C Irick. Determining surface profile from sequential interference patterns from a long tracer profiler [J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, 63(1): 1432-1435.
- Zhou Pin, He Zhengfeng. *Matlab Numerical Analysis* [M]. Beijing: China Machine Press, 2009. 216-218.
- 周 品, 何正风. *Matlab 数值分析* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. 216-218.
- S Qian, P Z Takacs. Equal optical path beam splitters by use of amplitude-splitting and wavefront-splitting methods for pencil beam interferometer [C]. *SPIE*, 2004, 5193: 79-88.

栏目编辑: 何卓铭