

文章编号: 0253-2239(2005)09-1201-7

# 同步辐射压弯准直镜姿态的检测 ——大曲率半径小口径光斑的波前检测

郑 欣<sup>1,2</sup> 朱佩平<sup>1</sup> 王 隽越<sup>1</sup> 国秀珍<sup>2</sup> 冯晓冬<sup>2</sup> 孙立娟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院高能物理所同步辐射室, 北京 100039)  
(<sup>2</sup> 吉林大学物理学院光科学与技术系, 长春 130000)

**摘要:** 提出了利用微小楔角剪切干涉仪测量同步辐射压弯准直镜姿态的方法。利用透镜和针孔产生与同步辐射发散度相同的激光束。通过剪切干涉仪, 测量经压弯准直镜输出激光束的平行度, 可将准直镜的位置、俯仰角度和镜面曲率皆调整到最佳。该剪切干涉仪结构简单, 可根据条纹图样判断光束的平行度, 每一幅干涉条纹图样与准直镜的一种姿态对应, 因而这种方法能确定准直镜表面各点反射 X 射线的整体效果。该方法适用于测量波前曲率半径大竖直口径小的光束, 不但精度高, 而且具有实用价值。

**关键词:** 光学设计与制造; 压弯镜; 剪切干涉仪; 干涉条纹

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Inspection for the Status of Collimating Mirror in Synchrotron Radiation ——Wavefront Inspection of Spot with Small Output Width But Long Curvature Radius

Zheng Xin<sup>1,2</sup> Zhu Peiping<sup>1</sup> Wang Junyue<sup>1</sup> Guo Xiuzhen<sup>2</sup> Feng Xiaodong<sup>2</sup> Sun Lijuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High-Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)  
(<sup>2</sup> Departement of Optical Information Science and Technology, College of Physics, Jilin University, Changchun 130000)

**Abstract:** A new approach is described to detect the position status of collimating mirror with a shearing interferometer based on micro-wedge. Laser beam having the same divergence as the synchrotron radiation can be created with a lens and a pinhole, and by measuring the parallelism of the laser beam reflected by the collimating mirror with the shearing interferometer, the best status of the collimating mirror about its position, pitch, curvature and bending force can be determined. This interferometry scheme is easily aligned, every interference pattern corresponds with only one status of the collimating mirror. Therefore this approach can determine the whole status of the mirror. The approach is especially fit for measuring the wavefront with small output width but long curvature radius, and not only has high accuracy but also is valuable in practice.

**Key words:** optical design and fabrication; collimating mirror; shearing interferometer; interference pattern

### 1 引 言

由于 X 射线不可见, 准直镜在线调试时, 很难确定准直镜的最佳姿态(准直镜的姿态包括: 高低位置、水平偏转角、俯仰角和镜面曲率。前三个姿态的检测比较简单, 故文中提及的“姿态”主要指压弯准直镜的压弯半径)。为了避免调光的盲目性, 在线调

试之前, 先做离线检测和调试。目前国内外采用的准直镜调整方法都是局部测量, 不能给出准直镜的某一姿态与输出光束平行度的整体关系。特别是选取的测量点不同, 测量结果有较大误差。因此, 需要一种方法, 确定准直镜姿态和输出光束平行度的关系, 以便将准直镜调整到最佳姿态。判断压弯镜最

作者简介: 郑 欣(1978~), 男, 吉林省长春市人, 吉林大学硕士研究生, 主要从事同步辐射压弯准直镜姿态检测理论与实验研究。E-mail: zhengx@ihep.ac.cn

收稿日期: 2004-08-17; 收到修改稿日期: 2005-01-20

佳姿态的问题也就转化为在压弯方向上波前曲率半径的判定。当曲率半径达到无穷大时,压弯镜调整到了最佳姿态,输出光束的平行度最高。同时,通过对实验装置的简单调整,还可以用来判定准直镜的压弯均匀性。本文提出了利用微小楔角剪切干涉仪测量同步辐射压弯准直镜姿态的方法。

## 2 待测波前的形状和特点

图 1 为同步辐射硬 X 射线光束线的标准设计光路。准直镜位于光源和单色仪之间,将发散的同步

步辐射光尽可能地会聚成平行光,然后输送给单色仪。从准直镜输入的光束的平行度越高,单色器输出光束的单色性就越好。因此,准直镜的姿态正确与否直接关系到光束线输出光束的质量。在同步辐射光束线安装调试中,准直镜姿态的检测是光束线调整中难度最大的一环。

利用透镜对激光束进行聚焦和发散,可产生与同步辐射光束发散度相同的激光束。此激光束经过压弯准直镜时,通过压弯可调整子午面内波前的曲率半径,而在弧矢面内光束发散度不变,如图 2。

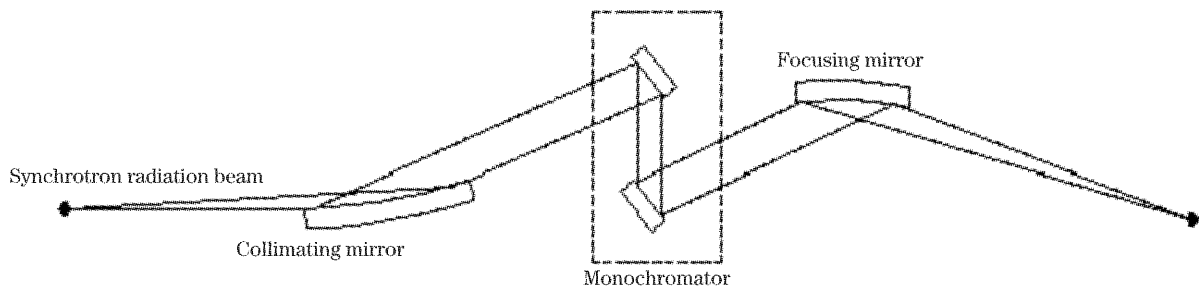


图 1 同步辐射 X 射线光束线的标准设计光路

Fig. 1 The standard construction of X-ray beam from synchrotron radiation

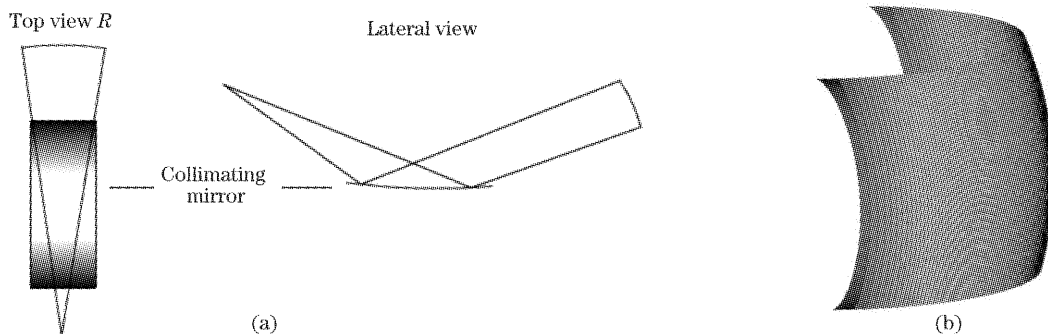


图 2 (a) 波前产生机制示意图,(b)波前的立体视图

Fig. 2 (a) Diagrammatic sketch of the wavefront's generation, (b) three-dimensional view of the wavefront

当激光波前子午半径  $r$  被压弯镜调整后趋于无穷大时,波前为一个竖直圆柱面。

为验证本文提出方法的可行性,在实验中用柱透镜模拟价格昂贵的准直镜,其效果完全等价。

综上所述,同步辐射压弯准直镜姿态的调试和检测可以简化为:与同步辐射发散度相同的激光束经柱透镜后,其波前在竖直方向上曲率的调试和检测。

## 3 利用干涉图测量波前的原理

### 3.1 参考波干涉方法

参考波干涉方法是用一个参考波与未知波面干涉,通过干涉条纹判断未知波面的形状。一般用平

面波作为参考波,图 3 为球面波的干涉图。

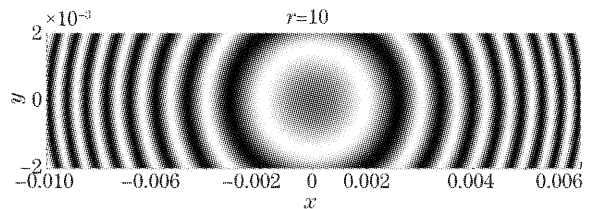


图 3 理论上干涉图像

Fig. 3 The theoretical interference stripe pattern

参考波干涉方法不适合测量大曲率半径波前。例如对曲率半径  $r=10$  m 的波前,在竖直方向上 5 mm 的范围内只可以看到一个完整的明暗交替条纹。因此,此法不但对大曲率半径的波前检测精度

不高,而且还要引入参考波。

### 3.2 平行平板剪切干涉方法(横向剪切)

剪切干涉的基本原理<sup>[1]</sup>是:被测波前通过特定的分光元件分成(剪切)两部分,在横向(垂直于波传播方向)相互错开,并在重叠区域发生干涉,根据干涉条纹评价被检验波前本身的缺陷<sup>[2~5]</sup>。

这种方法通过改变剪切后的两波前相互错开的距离(剪切量)在有限范围内得到所需的干涉条纹。优点<sup>[1]</sup>是可以简单调整装置使得条纹的间距和倾斜度做相应的改变;不需要参考波;抗干扰能力强,对测试环境的要求低;设施简单,方便搭建,成本低廉。缺点是除了对简单波前(如球面波、柱面波和平面波等)直接测量外,对于复杂波前,剪切干涉图一般不能直接判定被测波前形状,且剪切干涉图的处理比较复杂。

虽然,复杂波前的剪切干涉条纹拟合是一个难点,但是对于简单波前,不存在剪切干涉条纹拟合的困难。本文提出的方法正是利用了剪切干涉方法优点,又避免了其缺点。

剪切沿  $y$  轴方向,在剪切量比较小时,光程差可近似写为

$$\Delta W = \frac{\partial W}{\partial y} \cdot s = P\lambda, \quad (1)$$

以  $W$  表示波前方程, $\Delta W$  表示剪切后两波前在同一点处的光程差; $P$  为干涉条纹的级次, $\lambda$  为波长。

将上式变形:

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{P}{s}\lambda, \quad (2)$$

可知在剪切方向上的干涉条纹密度与波前变化率成正比。

设条纹宽度为  $b$ ,待测波前曲率半径为  $r$ ,有

$$b = r\lambda/s, \quad (3)$$

由此得出的干涉条纹的宽度  $b$  的表达式和杨氏双缝干涉条纹完全一致。这说明对于均匀曲面剪切干涉条纹应该是一系列垂直于剪切方向的直条纹。

根据(3)式可知,波前曲率半径小对应条纹密度大;而波前曲率半径大对应条纹密度小。

在准直镜压弯过程中,被准直镜反射的激光束波面由凸变平,曲率半径由小变大,直至变成无穷大;然后波面由平变凹,曲率半径又由大变小。当用剪切干涉条纹监测时,伴随着上述过程,剪切干涉条纹密度由大变小,直至变成零,然后又由小变大。由此可以通过条纹的密度判断出波前曲率半径的大小。

波前子午半径检测时,要求光束在子午面内的

高度,必须满足在剪切干涉后至少得到几对完整周期的明暗条纹(设  $n$  对条纹)。由于光束高度  $H$  是重叠区域加上剪切量,即

$$H = n \cdot b + s \Rightarrow H = n \cdot \frac{r\lambda}{s} + s, \quad (4)$$

当  $s = \sqrt{nr\lambda}$  时, $H$  有最小值,即  $H = 2\sqrt{nr\lambda}$ 。设  $n = 5$ ,对于曲率半径  $r = 50$  m 的波前,要求光束高度至少为

$$H = 2 \times \sqrt{5 \times 50 \times 0.6328 \times 10^{-6}} = 25.2 \text{ mm},$$

重叠区域为  $n \cdot b = s = \sqrt{nr\lambda} = 12.6$  mm。这说明在 5 mm 观测范围里,只能看到两对明暗条纹。可见平行平板剪切干涉仪不适合检测竖直高度较窄的同步辐射光束,即不适合检测大曲率半径小口径波前。

## 4 存在楔角的剪切干涉装置及方法

以上两种方法,都是利用条纹密度判读波前曲率半径的,不适用于测量大曲率半径小口径波前。为此将空间频率合成原理应用于横向剪切干涉,利用干涉条纹方向判读波前曲率半径。根据傅里叶光学,空间频率的合成公式为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{f_y}{f_x}, \quad (5)$$

(5) 式中, $f_x$  为水平方向分量, $f_y$  为竖直方向分量, $f$  为合成频率, $\phi$  为合成频率  $f$  的指向与  $x$  轴的夹角。

这里  $f_y$  为平行平板剪切干涉仪中获得的垂直于剪切方向、水平走向干涉条纹频率,它与 3.2 中讨论的条纹密度相对应。为了引入  $f_x$ ,需将平行平板剪切干涉仪改造为光楔剪切干涉仪。由于光楔前表面和后表面的法线夹角与空气楔角相等,光楔后表面反射波面在弧矢方向倾斜,使得后表面反射光线(虚线所示)与前表面反射光线、入射光线不在同一

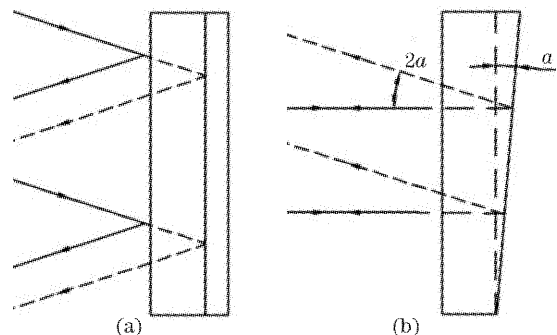


图 4 产生竖直走向的干涉条纹的光楔的侧视图和俯视图  
Fig. 4 The lateral view and top view of the optical wedge

竖直平面内,所以产生竖直走向的干涉条纹。如图 4 所示。图中楔角为  $a$ , 反射的剪切波前偏转  $2a$ , 产生频率为  $f_x = 2a/\lambda$  的条纹。合成的剪切干涉条纹走向是倾斜的,与合成频率指向垂直,如图 5 所示。

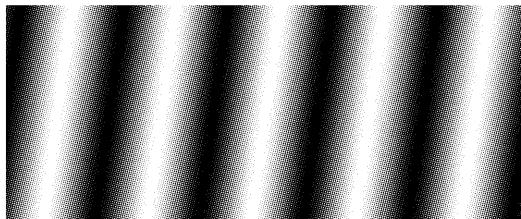


图 5 倾斜的干涉条纹图

Fig. 5 The tilted interference stripe pattern

在实际中,  $f_x$  过大(即对应由楔角带来的竖直条纹密度大), 条纹太密,不但会给判读带来不便,而且条纹方向随波前曲率半径变化的灵敏度也要降低;  $f_x$  过小,水平方向上条纹也会变得很宽,也不利于判读。需要选择一个合适的  $f_x$ 。

在水平 2 cm 范围内得到 8 条干涉条纹较为理想,所需的光楔楔角是非常小的,约  $26''$  左右。这样的精度不便加工。利用双玻璃平板间的空气层,通过调整空气层的楔角,可以得到角度很小的楔角。通过调整双棱镜剪切干涉仪的空气楔角,可以选择便于观察的条纹密度。如图 6(a)所示。

双平板剪切干涉清晰度较差,原因是第一块玻璃平板的前表面和第二块玻璃平板的后表面的反射光会降低条纹的清晰度。用图 6(b)的方法可以分离对干涉图不利的反射光<sup>[6]</sup>。两块棱镜的底面相对,两底面之间留有微空气间隙构成的楔角,两侧以固定件固紧,以得到双棱镜剪切干涉光楔。

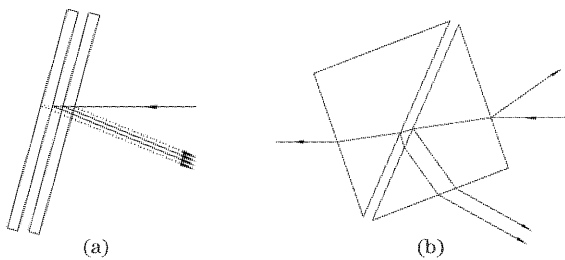


图 6 (a) 利用双玻璃平板间的空气层得到的楔角, (b) 利用双棱镜替代双平板分离反射光

Fig. 6 (a) A micro-wedge angle can be obtained by air layer between two glass plates, (b) the reflected light can be separated by replacing the two glass plates with two prisms

最终的剪切干涉光楔如图 7(a), 这里起到剪切干涉装置作用的是空气楔。

图 8 为双棱镜剪切干涉装置的侧视图,由激光

束(使光束有一点发散角的)、凸透镜、针孔、柱透镜、双棱镜剪切干涉仪和显示屏或胶片组成。

调整棱镜剪切干涉仪的位置与各方向倾角,使得标准平面波在屏幕上得到竖直干涉条纹。

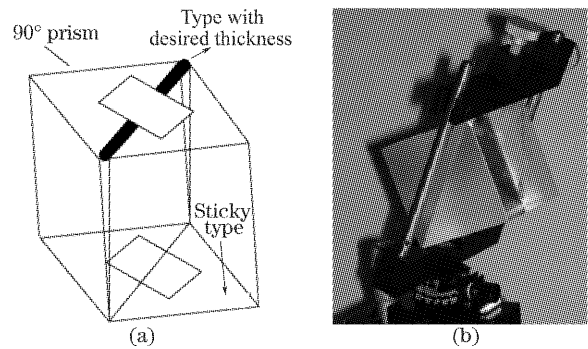


图 7 双棱镜剪切干涉光楔。(a)原理示意图, (b)装置实物图

Fig. 7 The two-prism shearing interferometer. (a) Diagrammatic sketch, (b) the photo of the interferometer

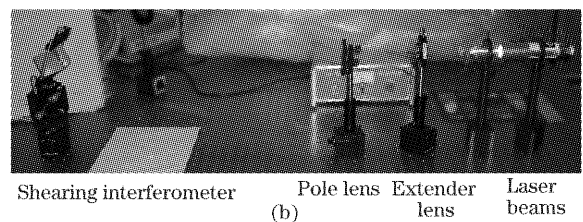
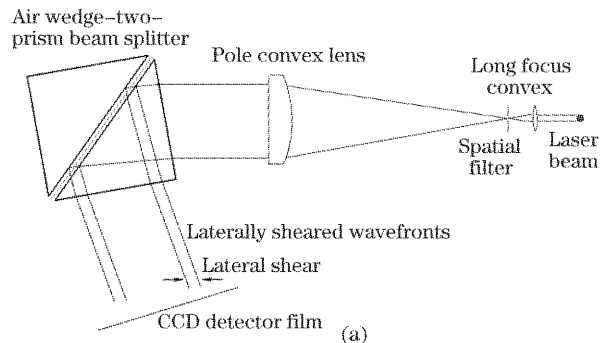


图 8 柱透镜和双棱镜剪切干涉仪实验装置。(a)实物图, (b)示意图

Fig. 8 The beam path of the pole lens simulating the collimating mirror and two-prism shearing interferometer. (a) Diagrammatic sketch, (b) the real beam path

空气楔的楔角非常之小,而且实验中是用两个棱镜胶合在一起产生的空气楔,很难满足理论上的设计要求,空气楔的厚度不一定就如理论上所想的,一侧稍厚一侧稍薄,而可能是左上角稍厚另一侧稍薄,即使对于一个平面波也会产生倾斜的条纹。

给激光光源加上平行光管作为扩束系统后可以得到平面波。光束通过棱镜剪切干涉仪。调整棱镜剪切干涉仪的位置与各方向倾角得到干涉条纹,如

图 9 所示。通过下文将要介绍的图像处理方法判定此条纹倾角(文中对于干涉条纹和棱镜的倾角在未做特殊说明的情况下皆是指与垂直方向的倾角)为零,即斜率无穷大。这样可以说明楔角的大小和方向已经调整到满足实验所需。

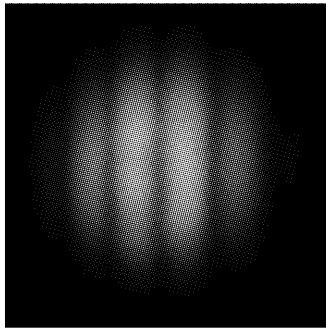


图 9 竖真条纹光斑

Fig. 9 Vertical stripe spot

将针孔放置于柱透镜焦点位置,将柱透镜沿光轴前后移动以改变光波面在垂直方向上的曲率,光束通过双棱镜剪切干涉仪可以得到斜率变化的干涉条纹,如图 10 所示,这正是判断曲率半径的依据。

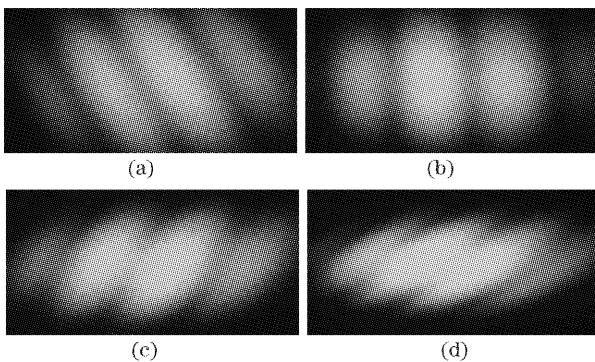


图 10 柱透镜分别在不同益得到的干涉条纹图。(a)在一倍焦距内,(b)在焦点附近,(c)在一倍焦距外,(d)在一倍焦距外更均匀处

Fig. 10 The interference stripe patterns. (a) In one time focal length, (b) near focus, (c) out of one time focal length, (d) distant from focus

对于灰度条纹图,计算在指定方向上图像矩阵的投影,也就是图像矩阵在投影方向上的线积分,在返回的结果中,积分值  $R$  的极大值对应着图像中的明亮直线。这个思路类似于利用拉东(Radon)变换判断一幅图像中直线(在这里我们要判断的是条纹)所在位置和角度的方法。利用此方法,编写图像处理程序对 10(b)图进行分析,可以得到如图 11 所示的几幅图像。

实验中拍得的图片和图 5 所示的理论的干涉条

纹有很大的不同:条纹形状不是那么笔直、粗细均匀;图像中的“噪音”非常严重等等。必须对原始干涉图像降噪(利用中值滤波)和图像增强(增强图像衬比度,使得条纹轮廓分明)<sup>[7]</sup>。图 11(a)为原始图经处理后得到的图像。

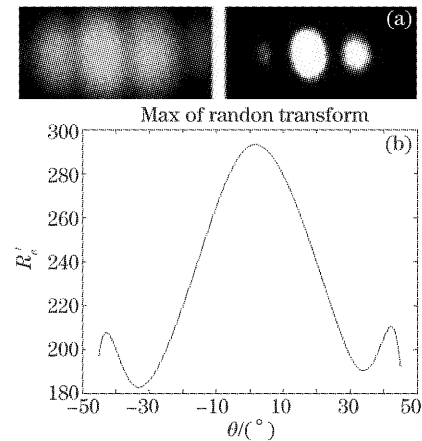


图 11 对柱透镜在焦点附近拍摄的条纹处理的图像和曲线。(a)对原始图像进行滤波和图像增强,(b)图像在特定角度方向上得到的积分值与角度的关系图

Fig. 11 The photo shoot when pole lens is near focus and the curve returned via program after image processing. (a) The primitive picture after filtering and picture enhancement, (b) the relation between the integral value received in special direction to be treated picture and the angle

对经处理后的图像进行拉东变换,即对不同角度进行积分,可以得到不同角度对应的最大  $R_\theta$  值,如图 11(b)。原始的  $R_\theta \sim \theta$  曲线波动性较大(未在图中标出),其原因是来自原始图像的“噪音”无法通过图像处理完全去除其影响。对  $R_\theta \sim \theta$  曲线分别进行了插值和拟合,得到比较光滑的  $R'_\theta \sim \theta$  曲线图。这里  $R'_\theta$  是一个十阶多项式,既能反映  $R_\theta$  的变化规律,又能很好地对曲线进行光滑处理。

经过以上的处理,程序返回在  $R'_\theta \sim \theta$  图中,最大  $R'_\theta$  值对应于  $1.76^\circ$ 。可见,图 10(b)对应的状态仍不是垂直曲率无穷大。以此为依据可以对光束的准直性进行判断。

根据以上讨论可知,光楔剪切干涉图与平行平板剪切干涉图不同,判别波前曲率半径的依据不是条纹密度,而是条纹倾斜方向。提高实验灵敏度和精度的方法主要有:

1) 增大空气楔厚度

空气楔厚度非常之小,剪切量  $s$  也很小。由(3)式可知:波前曲率半径  $r$  不变, $s$  的增大使得条纹宽

度  $b$  减小, 即  $f_y$  增大, 提高了对  $\phi = \arctan(f_y/f_x)$  的分辨灵敏度。

2) 适当增大空气楔楔角

空气楔楔角适当增大使得  $f_x$  变大, 即条纹变得更加细密。在不影响分辨力和清晰度的情况下, 条纹通过拉东变换会有明显且尖锐的最大值曲线, 判读会更精确。

5 对压弯均匀性的判断

干涉条纹图不会总是笔直线条, 条纹的弯曲正是判断压弯均匀性的依据。

经以上讨论可知, 条纹倾斜角  $\phi = \arctan(f_y/f_x)$  越小对应着曲率半径  $r$  越大, 反之则  $r$  越小。调整空气楔楔角使条纹变得细密些, 更方便观察条纹的弯曲。可以通过条纹的弯曲判断压弯准直镜的压弯均匀性。条纹越笔直说明压弯均匀性越好。

6 剪切干涉装置的设计要求及其参量的讨论

平板厚度  $h$  与剪切量  $s$  的关系式如下<sup>[1]</sup>:

$$\frac{s}{h} = 2 \cos i \left\{ \tan \left[ \arcsin \left( \frac{\sin i}{n} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

对于空气楔则表示为

$$s/h = 2 \cos i \{ \tan [\arcsin (n \sin i)] \}, \quad (7)$$

棱镜倾角对上述关系的影响如图 12 所示。

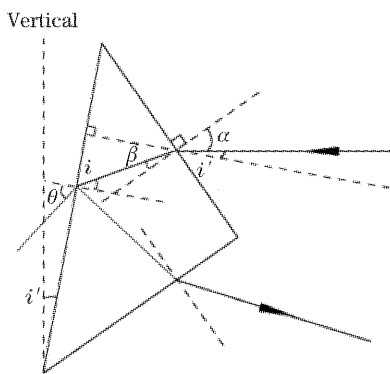


图 12 相对于平板剪切干涉中水平光束的入射解

Fig. 12 The incident angle of horizontal beam as to shearing interference

可以容易得到

$$\sin(45^\circ - i') = n \sin(45^\circ - i), \quad (8)$$

通过以上两个公式可以得出  $s/h$  关于组合棱镜的整体倾角  $i'$  的变化关系, 令其为

$$s/h = f(i'), \text{ 即 } s = h \cdot f(i'). \quad (9)$$

当取  $s = 2.5 \text{ mm}$  和  $s = 0.5 \text{ mm}$  时, 棱镜倾角  $i'$  与所需的光楔厚度  $h$  之间的关系由图 13 给出。

图 12 中,  $\sin \theta = n \sin i$ , 结合 (9) 式则有

$$\theta = \arcsin \left( n \sin \left( 45^\circ - \arcsin \left[ \frac{1}{n} \sin(45^\circ - i') \right] \right) \right), \quad (10)$$

图 14 为  $\theta$  与  $i'$  之间的关系曲线, 可以看出, 在  $i'$  小于  $40^\circ$  时, 不发生全反射, 即光束能进入空气楔, 可得到剪切波前。

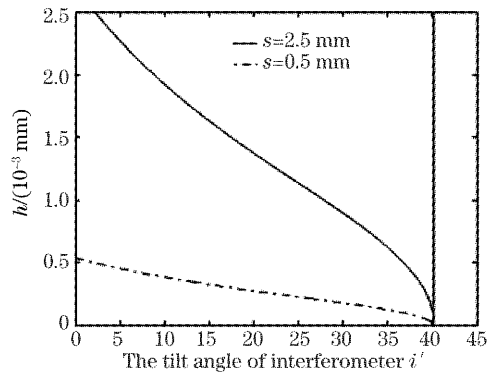


图 13  $s = 2.5 \text{ mm}$  和  $s = 0.5 \text{ mm}$  时, 剪切干涉装置摆角  $i'$  与所需的光楔厚度  $h$  之间的关系曲线图

Fig. 13 The curve of relation between the tilt angle  $i'$  of shearing interferometer and the needed thickness of the air layer between prisms when  $s = 2.5 \text{ mm}$  and  $s = 0.5 \text{ mm}$

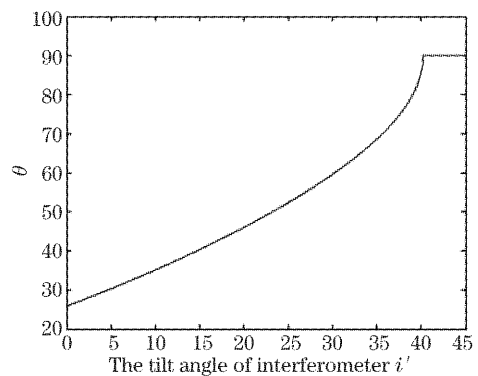


图 14  $\theta$  与剪切干涉装置摆角  $i'$  的关系曲线

Fig. 14 The relation curve of  $\theta$  and the tilt angle  $i'$  of shearing interferometer

7 结 论

文中提出的实验方法结合计算机处理, 能确定准直镜表面各点反射 X 射线的整体效果, 即通过判断楔角剪切干涉条纹的倾斜程度可以判断出通过柱透镜的小口径光束的平行度。由此得到将准直镜姿态调整到最佳的方法。此方法解决了同步辐射光大

曲率半径波前和输出光束口径小带来的检测难题。适合于曲率半径大观测范围小的波前检测,精度高,具有实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Xu Deyan. *Lateral Shearing Interferometers and Application* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987 (in Chinese)  
徐德衍. 剪切干涉仪及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 2 Xu Deyan, Dai Mingkui, Shen Weixing *et al.*. Large shearing interference in equal optical path measurement of the laser-wavefront radius of curvature[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 311~314 (in Chinese)  
徐德衍, 戴名奎, 沈卫星等. 超半口径补偿剪切干涉法测量脉冲激光波面半径[J]. 中国激光, 1997, **A24**(4): 311~314
- 3 Zhang Zhuo, Sun Dongsong, Qiao Lijie *et al.*. Collimating optical component systems using heterodyne interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1759~1763 (in Chinese)  
张 琢, 孙东松, 乔立杰等. 利用外差干涉仪的光学系统准直方法[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1759~1763
- 4 Zhu Xiangbing, Fu Shaojun, Ye Weiquan *et al.*. Interferometric measurement of the line density of varied-line-space gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1354~1358 (in Chinese)  
朱向冰, 傅绍军, 叶为全等. 变线距光栅线密度的干涉测量[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1354~1358
- 5 Liang Yiping, Dai Teli. Improving on the collimating performance of cylindrical lens to the beam of laser diode bar[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1305~1311 (in Chinese)  
梁一平, 戴特力. 圆柱透镜对半导体激光光束性能的改进[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1305~1311
- 6 S. A. Pikuz, V. M. Romanova. A simple air wedge shearing interferometer for studying exploding wires [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1): 1098~1100
- 7 Gu Jie, Chen Fang. Automated image processing for analysis of carrier cided fringe pattern[J]. *Chin. J. Lasers*, 1994, **A21**(6): 499~503 (in Chinese)  
顾 杰, 陈 方. 载波条纹自动化图像处理[J]. 中国激光, 1994, **A21**(6): 499~503