

同步辐射用光学元件的检测

罗红心 王 劫 肖体乔

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)

摘要 同步辐射(SR)用光学元件必须采用很大的入射角以得到较高的反射率,从而使得这类光学元件一般均为横向较窄而轴向甚长的长条状。为获得好的聚焦性能,这类光学元件的面形通常为非球面,包括圆柱面、环面等,曲率半径范围从约几十毫米到无穷大,因此同步辐射中的光学检测不同于可见光光学元件的检测方法。为了保证同步辐射光束线的传输效率,第三代同步辐射光束线要求镜子工作表面的斜率均方根(RMS)误差在 $3 \mu\text{rad}$ 以下,表面粗糙度 RMS 要求小于 0.3 nm ,精确测量这些反射镜的表面轮廓对于建造同步辐射光束线非常重要。同步辐射光学检测设备除了常用的面形干涉仪、粗糙度仪外,还有一种可见光检测中没有的设备——长程面形仪(LTP)。着重介绍同步辐射中的光学检测手段。

关键词 测量;同步辐射;光学检测;斜率误差;长程面形仪

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0134

Optical Elements Metrology in Synchrotron Radiation

Luo Hongxin Wang Jie Xiao Tiquiao

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract Specialized mirrors are normally used as prefocusing and postfocusing optical elements in synchrotron radiation (SR) beam lines. These mirrors are used for extreme grazing incidence in the vacuum ultraviolet, X-ray regions. Mirrors are typically segments of far-off axis aspherics off-axis aspheres, such as cylinders, ellipsoids and toroid with radii of curvature from tens of millimeters to infinite. Surface figure or shape error for these mirrors is generally represented by root mean square (RMS) slope errors. Typical tolerances for these mirrors are $3 \mu\text{rad}$ for RMS slope error and 0.3 nm for RMS micro-roughness. Measuring the mirrors used in SR with high precision is very important. The long trace profiler (LTP) is used for metrology in SR besides optical interferometer. The LTP is used for testing surface slope error of SR optical elements in world and is not adopted in visible optics generally. Optical metrology methods used in SR are introduced in this paper.

Key words measurement; synchrotron radiation; optical metrology; slope error; long trace profiler

1 引 言

运用高亮度、短波长的同步辐射光在空间分辨上的优势,可以进行许多前沿学科的探索。同步辐射光源已经成为材料科学、生命科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科领域的基础和应用研究的一种最先进的、不可替代的工具,并且在电子工业、医药工业、石油工业、化学工业、生物工程和微细加工工业等方面具有重要而广泛的应用。

同步辐射用光学元件必须采用很大的入射角($86^\circ \sim 88^\circ$)以得到较高的反射率,从而使得用于同

步辐射的光学元件一般均为横向较窄而轴向甚长的长条状,其轴向长度可达 1 m 甚至更长。为了获得好的聚焦性能,这类光学元件的面形通常为非球面,主要包括圆柱面、超环面等,而且两个垂直方向的曲率半径相差很大,有时甚至可达两个数量级以上,曲率半径范围从几十毫米到数千米。

同步辐射用光学元件的表面质量和形貌参数将直接影响聚焦或准直后的光束质量,影响光束线的传输性能。由于反射镜容许工作变形量是工作波长的函数,因而随着波长的减小,对反射镜的表面质量

和形貌参数要求越来越高。为了保证同步辐射光束线的传输效率,新一代同步辐射光束线要求镜子工作表面的斜率误差(Slope error)在 $3 \mu\text{rad}$ 以下,反射面表面均方根(RMS)粗糙度要求小于 0.3 nm 。精确测量反射镜的表面轮廓和粗糙度对于同步辐射光束线的整体质量非常重要。如何精确检测同步辐射光学元件的表面质量成为同步辐射发展的一项重要内容。

常规光学加工过程中,关注的是镜面的高度形貌是否符合设计要求,而在以掠入射为最大特点的同步辐射光学中,研究人员们最关心的是反射镜表面的斜率分布情况;可见光领域常用于干涉条纹分析表面质量,如面形精度 $\lambda/10$ 。同步辐射中用斜率指标如斜率误差来描述镜面的起伏分布。同步辐射中除了关心光学元件表面的斜率分布外,粗糙度也是一个很关键的技术指标,由于同步辐射主要使用短波长的 X 射线波段,因此对粗糙度的要求比可见光元件更高。

变线密度平面光栅单色仪具有自动聚焦和消慧差能力,可以大幅度提高单色仪的分辨本领,减少杂散光;可以节省光学元件,极大地简化单色仪的设计和加工,在同步辐射应用中有着重要的应用。变间距光栅的刻槽密度可以用一个多项式表示^[1]

$$N(x) = N_0 + N_{1x} + N_{2x^2} + N_{3x^3} + \dots$$

只要精确得到各项系数就可以得到变间距光栅的线密度变化。

目前国际上同步辐射装置中普遍采用的光学检测设备主要有长程面形仪(LTP)、面形干涉仪、粗糙度仪和原子力显微镜等。长程面形仪主要用来检测光学元件的表面斜率分布和曲率半径,尤其是检测同步辐射中普遍使用的压弯镜在压弯状态下的曲率半径,长程面形仪可以检测大口径的光学元件,同时适合检测较大的曲率半径;面形干涉仪用来检测光学元件表面的斜率分布和曲率半径,但通常只能用来检测口径较小的光学元件和较小的曲率半径;粗糙度仪用来检测表面粗糙度;原子力显微镜用来检测光栅中具有微小周期结构的光学元件。

上海光源是我国跨世纪最大的科学工程,投资逾 12 亿人民币,属于第三代同步辐射光源,能量仅次于世界上仅有的 3 台高能光源。2004 年 12 月开工,到 2009 年 4 月完成调试后向用户开放,坐落在上海张江高科技园区。作为国家级大科学装置和多学科的实验平台,上海光源由全能量注入器(包括 150 MeV 电子直线加速器、周长 180 m 的全能量增

强器和注入/引出系统)、电子储存环(周长 432 m , 能量 3.5 GeV)、光束线和实验站组成。

在这个硕大的圆形装置中,全能量注入器提供电子束并使其加速到所需能量,无数电子束以接近光的速度在闭合环形的真空电子储存环中运行,并在拐弯时放出同步辐射光。电子储存环是同步辐射光源的主体与核心,它的性能直接决定了同步辐射光源性能的优劣。为了保证向用户提供在空间位置上高度稳定的同步辐射光,电子束轨道的稳定需要被控制在微米量级。

光束线沿着电子储存环的外侧分布,它起着用户实验站与电子储存环之间的桥梁作用。也就是说这道“光闸”将从电子储存环引出的同步辐射光束“条分缕析”出从远红外到硬 X 射线等不同波长的同步辐射光,并按用户要求进行准直、聚焦等再加工,然后输送到用户实验站。

在实验站,同步辐射光被“照射”到各种各样的实验样品上,同时科学仪器记录下实验样品的各种反应信息或变化,经处理后变成一系列反映自然奥秘的曲线或图像。科学家和工程师们不仅可以利用强大光速快速测定蛋白质三维晶体结构,还能完成对超大规模集成电路的“精雕细刻”。

2 长程面形仪

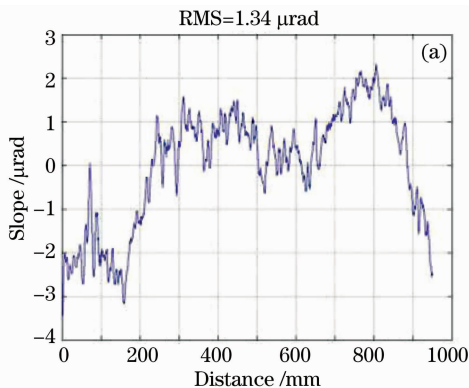
长程面形仪是一个采用顺序扫描法来实现宏观轮廓测量的设备,其本质为一个 $f-\theta$ 透镜系统,在同步辐射中用来检测光学元件的表面斜率分布和曲率半径,是一种目前在同步辐射应用中无法替代的表面轮廓检测仪器。长程面形仪基本的工作原理是:通过测量被测表面反射光束的角度变化,获得被测表面的斜率变化。长程面形仪的探测光束通常是非聚焦的激光束,不受测场深度的制约,可以广泛地应用于大型光学表面的精密轮廓测量。

采用单准直激光束扫描被测表面是扫描轮廓仪的基本结构,为进一步提高精度,Bieren^[2,3]将一两臂固定的 Michelson 干涉仪引入基本扫描轮廓仪中,提出了光笔干涉仪的结构。这种轮廓仪的探测器上接收到的光斑图样为干涉条纹,从而大大提高了轮廓仪的分辨率。Takacs, Qian, Irick 等^[4~16]在此基础上继续探索,1989 年 Qian 等提出了基于零光程分光单元的光笔干涉轮廓仪——LTP,实现了对同步辐射掠入射反射镜形貌的高精度测量。1995 年 Qian 等^[8,9]继续发展 LTP,提出了 ppLTP (pentaprism long trace profiler) 轮廓测量方法,该

方法利用激光光纤准直技术提高了激光束的指向性;用五角棱镜扫描代替光笔干涉仪光学头的整体扫描,由扫描运动引起的绝大部分影响测量精度的因素得到了有效的抑制或补偿,取得了比较好的测量精度。

中国科学院上海应用物理研究所的肖体乔研究员等^[17~20]研制成功了基于相位板衍射理论的新型长程面形仪 LTP-1200。该设备目前用于上海同步辐射装置的光学元件检测。新型长程面形仪 LTP-1200 一共由 4 部分组成:光学系统、运动系统、支持系统和控制系统。光学系统承载了长程面形仪所有光学行为,它整合了激光源、单模准直光纤、 π 相位板、分束镜、参考棱镜、极化器、五角棱镜、傅里叶变换透镜和面阵 CCD 相机。图 1 为新型大量程长程面形仪 LTP-1200 的实物照片。

采用相位板衍射准直技术以衍射条纹作为测量基准,利用光的衍射对激光平漂不敏感这一特性来减小光漂的影响,准直精度得到很大的提高,同时对衍射条纹位移的辨识可以达到较高精度。一维 π 阶



跃相位板是在石英玻璃平板的半面上运用干蚀法刻掉一定厚度,使通过两半面的平行光产生 π 相位差,这样的光束远场中间会出现一条黑线,以此黑线为基准可以精确确定光斑位置。图 2 为一单晶硅平面反射镜在 LTP-1200 上的检测结果,其斜率误差为 $1.34 \mu\text{rad}$,面形起伏为 $0.43 \mu\text{m}$;检测时扫描间距 1 mm ,测量范围 900 mm 。

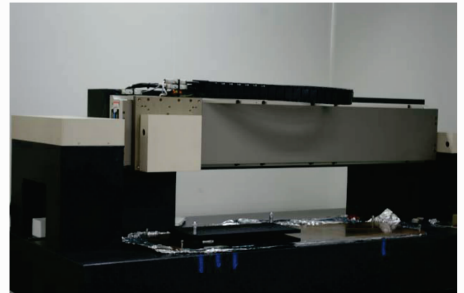


图 1 中国科学院上海应用物理所自行研制的长程面形仪 LTP-1200

Fig. 1 Long trace profiler LTP-1200 research and developed by Shanghai Institute of Applied Physics of Chinese Academy of Sciences independently

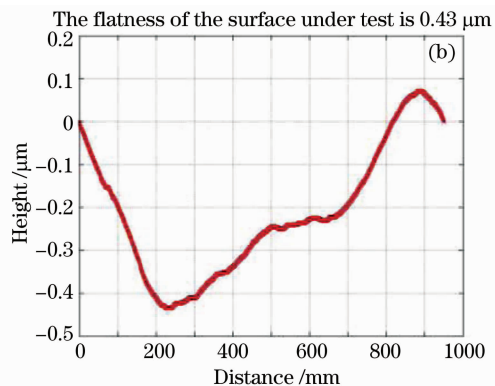


图 2 长程面形仪测得的单晶硅反射镜斜率分布与表面起伏

Fig. 2 Slope error and surface undulation of a single crystal silicon mirror measured by LTP

长程面形仪除了检测光学元件的斜率和曲率半径,其在同步辐射中的另一个重要应用是检测压弯机构压弯后反射镜的斜率分布及曲率半径。同步辐射中对光束的各种不同要求使得压弯机构在束线的安装方式不尽相同,有的镜面向上,有的镜面向下,还有的反射镜侧向安装;而同步辐射中使用的反射镜大多采用单晶硅基底,尺寸较大时重力引起的斜率分布就不能忽略,因此压弯机构上线前检测时需要采用和线上安装时相同的姿态。长程面形仪由于采用单光束扫描技术,只要通过适当的光学元件对扫描光束进行转折就可以对不同姿态放置的反射镜进行表面轮廓检测。图 3 为 LTP-1200 测得的压弯

镜面形及斜率分布。

3 面形干涉仪

面形干涉仪为检测光学元件的表面面形、光学镜头的波面像差以及光学材料均匀性等的一种精密仪器。同步辐射检测中常用的为美国 Zygo 公司的斐索型面形干涉仪,单色光束在标准平面或标准球面上,部分反射为参考光束,部分透射并通过被测件作为检测光束。检测光束自准返回后与参考光束重合,形成等厚干涉条纹。用斐索平面干涉仪可以检测平板或棱镜的表面面形及其均匀性。

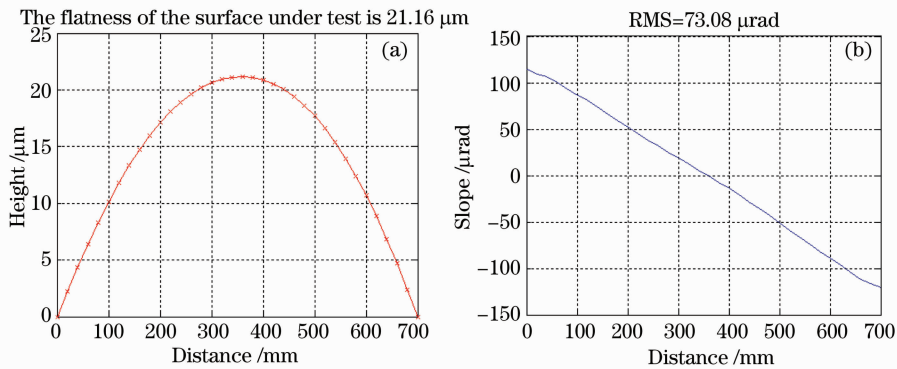


图 3 长程面形仪测得的压弯镜面起伏与斜率分布

Fig. 3 Slope error and surface undulation of a bending mirror by LTP

由于同步辐射中使用的反射镜尺寸较大, 通常的 Zygo 干涉仪口径有限, 难以一次全口径测量整块反射镜, 通常生产厂家和同步辐射装置采用掠入射方法来检测大口径反射镜的面形, 如图 4 所示为法国 SESO 公司的掠入射检测原理图, 其中掠入射角可以根据反射镜的尺寸进行调整。上海光源采用 LTP 检测光学元件的子午即长尺度方向, 弧矢即短尺度方向面形由 Zygo 干涉仪完成, 因此不需采用掠入射方式。图 5 为上海光源用 Zygo 干涉仪得到的单晶硅反射镜面形检测结果。

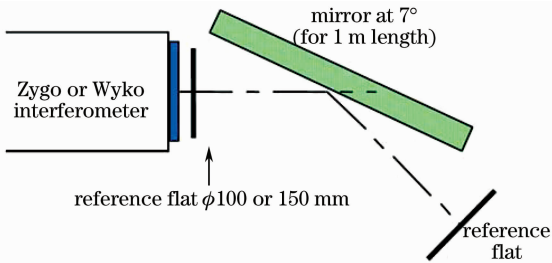


图 4 掠入射检测大面型光学元件原理图

Fig. 4 Principle of measuring big mirror by grazing incidence

4 粗糙度仪

商用的粗糙度仪有接触式和非接触式两种。接触式代表产品为 Taylor Hobson 公司的接触式轮廓扫描仪, 这种设备通过一个探针以一定的压力接触待测表面, 然后通过扫描方式得到一维的表面信息, 从中可以得到表面粗糙度、表面几何形状、曲率半径等表面信息。接触式粗糙度仪具有纳米级的分辨率和较大的测量范围, 但由于这种接触式检测具有一定的破坏作用, 并不适用于同步辐射中高精度光学元件的表面粗糙度检测。

同步辐射中通常采用的表面粗糙度检测方法为非接触的白光干涉轮廓仪, 白光干涉轮廓仪具有

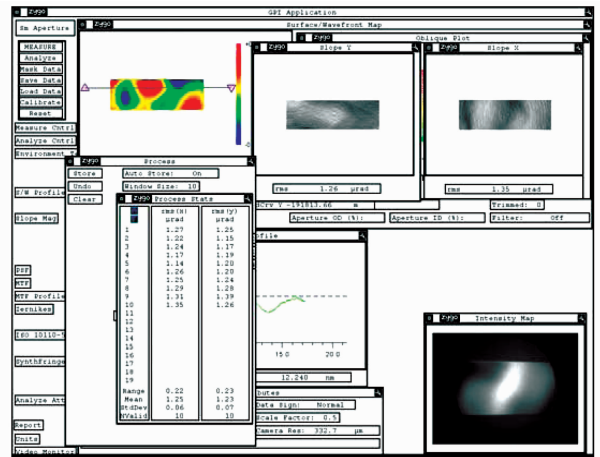


图 5 面形干涉仪检测结果

Fig. 5 Metrology result by interferometer

0.1 nm 的纵向分辨率, 测量速度快, 横向分辨率依干涉显微镜头的数值孔径而不同, 可以达到可见光波长量级。上海光源采用 Zygo 公司的 Newview 白光干涉轮廓仪作为粗糙度检测设备, 图 6 为反射镜粗糙度检测结果。

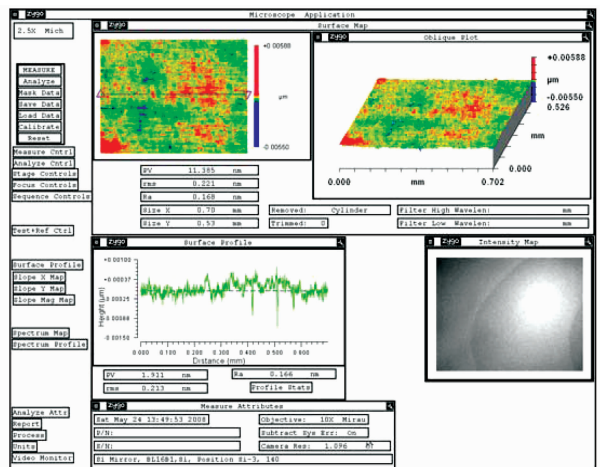


图 6 粗糙度仪检测结果

Fig. 6 Roughness measurement result

5 扫描探针显微镜

扫描探针显微镜包括扫描隧道显微镜 (STM)、原子力显微镜 (AFM)、横向力显微镜 (LFM) 等, 这类显微镜都是基于探针对被测样品进行扫描成像的显微系统。

扫描探针显微镜具有原子级的横向、纵向分辨率, 既可以分辨出单个原子, 同时又具有无损检测的优点。扫描探针显微镜的缺点在于成像范围很小, 速度慢。

扫描探针显微镜在同步辐射光学检测中一般用于光栅显微质量的检测, 比如光栅刻槽的深度、槽宽、槽型等, 同时也可用于检测粗糙度。图 7 和图 8 分别为同步辐射用超环面光栅照片和 Laminar 光栅的原子力显微镜检测结果。

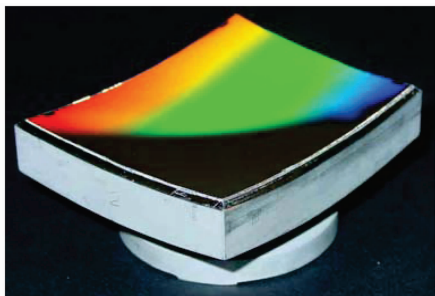


图 7 超环面光栅 (图片来自 Zeiss 网站)
Fig. 7 Toroidal grating (from Zeiss)

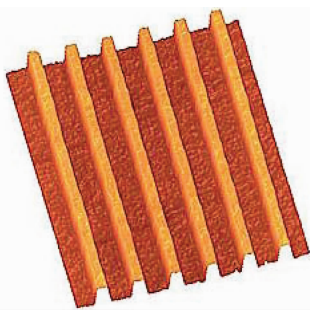


图 8 Laminar 光栅的 AFM 图
Fig. 8 Laminar grating by AFM

6 变线距光栅的检测

变线距光栅线密度检测方法可以采用 LTP^[21] 方法和衍射法相结合, 这两种方法通过精确测量衍射角, 利用光栅方程得到光栅线密度。

LTP 本身作为同步辐射专用的面型检测设备, 具有很高的角度分辨率。测量时必须在垂直于光栅刻线方向上移动光栅, 测量不同位置光栅的线密度。采用利特罗 (Littrow) 放置 (入射角 = 衍射角), 通过测量衍射角, 根据光栅方程, 可计算得出光栅的刻线

密度。首先使“0”级光与人射光重合, 记录角度; 通过转动光栅, 使“±1”级光满足 Littrow 条件, 再次记录角度, 得到衍射角。衍射角与光栅该点处的线密度 N 的关系为: $mN\lambda = \sin \alpha + \sin \beta = 2\sin \beta$, 其中 α 为入射角, β 为衍射角, λ 为激光波长。在测量过程中, 入射光方向和探测器的位置是固定的。通过移动光栅, 可以测量对应光栅表面上不同位置处相应的衍射角, 计算得刻线间距密度 N_i 。由测得的一系列衍射角和线间距密度值, 根据光栅的刻线密度方程, 可计算得到光栅的刻线密度变化参数。利用 LTP 方法检测精度可达到 $\Delta N/N = 10^{-6}$ 。

通过衍射法测量光栅间距的变化, 这种方法测量精度可以达到 $\Delta N/N = 10^{-4}$ 。这种方法同样采用 Littrow 条件, 测量不同位置处相应的衍射角和线间距密度来得到线密度方程。

7 同步辐射光学元件检测中的问题

由于同步辐射光学元件的特殊性, 在光学检测中也会遇到不同于通常可见光光学元件的问题。

1) 光学元件装夹及位置调整。由于同步辐射采用的单晶硅光学元件普遍尺寸较大, 同时重量也较大, 因此装夹时比较困难, 需要特殊设计的样品台及装夹装置; 同时同步辐射用光学元件使用在真空中, 人体接触留在光学元件表面的灰尘和汗渍会严重影响其光学性能, 不能直接接触, 因此位置调整时需要格外注意。

2) 光学元件表面洁净度的保持。同步辐射用光学元件使用时, 高能光束直接通过其表面, 如果表面有灰尘及人体碎屑、汗渍等, 长时间后这些表面污物会被碳化形成表面积碳, 光学元件的性能会严重下降并最终报废。因此光学检测必须在洁净室中进行, 检测时尽量避免直接接触光学元件并减少暴露在空气中的时间, 如果条件允许, 检测完毕的光学元件应储存在恒温恒湿干净的环境中。

3) 光学元件曲率半径的检测。同步辐射光学元件的曲率半径可以采用 LTP 和干涉仪进行检测。LTP 检测的表面起伏通常不大, 因此适合大曲率半径的检测; 干涉仪检测曲率半径时需要精密的位置检测装置配合, 检测时需移动光学元件, 而干涉仪必须工作在隔振台上, 因此适合检测小曲率半径。介于两者检测范围之间的曲率半径就难以检测, 需要开发新的检测方法或者拓展 LTP 和干涉仪的检测范围。

4) 在线检测。通常的同步辐射光学元件检测

都是在检测实验室中进行的,而这些光学元件由于尺寸较大,其自重对表面面形的影响较大。安装在光束线上的光学元件尤其是压弯机构,由于姿态及自重影响,其面形会发生变化,可能会和实验室检测结果偏差较大。这就需要进一步研究同步辐射光学元件的在线检测方法。

8 结 论

讨论了目前同步辐射中通用的光学检测方法及设备。长程面形仪等设备目前已经可以满足普通同步辐射光学元件的检测任务,从国外采购的大部分光学元件在上机前都可以进行表面质量无损检测;但有些光学元件还不能很好地进行检测,比如曲率半径刚好在长程面形仪和干涉仪的检测范围之外的光学元件,变间距、变深度光栅的质量检测等现在还没有完善的方法,需要对现有的检测设备进行升级改造或者开发出新的检测手段。随着同步辐射光源的发展,所采用的光学元件尺寸会更大,精度会要求更高,面形更复杂,需要检测的项目也会越多,在对加工技术提出更高要求的同时,也对光学检测提出新的课题,这就需要光学检测方面作出更大的努力来满足同步辐射光学元件的检测要求。

参 考 文 献

- 1 M. Fujisawa, A. Harasawa, A. Agui *et al.*. Varied line-spacing plane grating monochromator for undulator beamline[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(2): 345~349
- 2 V. Bieren. Pencil beam interferometer for aspherical optical surfaces[C]. *SPIE*, 1982, **343**: 101~108
- 3 V. Bieren. Interferometry of wave fronts reflected off optics surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(14): 2109~2114
- 4 S. C. Irick. Determining surface profile from sequential interference patterns from a long tracer profiler[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(1): 1432~1435
- 5 S. C. Irick, W. R. Mckinney. Advancements in one-dimensional profiling with a long trace profiler [C]. *SPIE*, 1992, **1720**: 162~168
- 6 S. C. Irick. Improved measurement accuracy in a long trace

- profiler-compensation for laser pointing instability [J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1994, **347**(1-3): 226~230
- 7 S. N. Qian, W. Jark, P. Z. Takacs *et al.*. In-situ surface profiler for high heat load mirror measurement[J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(2): 396~402
- 8 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
- 9 S. N. Qian, H. Z. Li, P. Z. Takacs. Penta-prism long trace profiler (PPLTP) for measurement of grazing incidence space optics[C]. *SPIE*, 1996, **2805**: 108~114
- 10 S. C. Irick. Error reduction techniques for measuring long synchrotron mirrors[C]. *SPIE*, 1998, **3447**: 101~108
- 11 P. Z. Takacs, E. L. Church, C. J. Bresloff *et al.*. Improvements in the accuracy and the repeatability of long trace profiler measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(25): 5468~5479
- 12 G. Sostero, D. Cocco, S. N. Qian. Metrological challenges of synchrotron radiation optics[C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 310~316
- 13 S. N. Qian, G. Sostero, P. Z. Takacs. Precision calibration and systematic error reduction in the long trace profiler[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 304~310
- 14 P. Z. Takacs, S. N. Qian, T. Kester *et al.*. Large-mirror figure measurement by optical profilometry techniques [C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 266~274
- 15 G. Sostero, A. Bianco, M. Zangrando *et al.*. Temperature-dependence perturbations on LTP measurements [J]. *SPIE*, 2002, **4782**: 38~45
- 16 S. N. Qian, P. Z. Takacs. Equal optical path beamsplitter for a pencil beam interferometer and shearing interferometer[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(4): 929~934
- 17 T. Q. Xiao, S. J. Xia. A new long trace profiler for aspheric optical surface metrology[C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 208~213
- 18 D. H. Zeng, T. Q. Xiao, G. H. 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
- 19 Xiao Tiqiao, Xia Shaojian, Yu Xiaohan. Long trace profiler[P]. China Patent, ZL02110541.3, 2005
- 肖体乔,夏绍建,余笑寒. 长程面形仪[P]. 发明专利, ZL02110541.3, 2005
- 20 Zeng Danhua. Comparison research of metrology of large aspheric profile[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006
- 曾丹华. 大型非球面轮廓检测技术的对比研究[D]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所, 2006
- 21 D. Cocco, G. Sostero, M. Zangrando. Technique for measuring the groove density of diffraction gratings using the long trace profiler[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(7): 3544~3548