

对变线距光栅干涉测量中的环形条纹的分析

朱向冰^{1,2}, 付绍军¹, 叶为全¹, 何世平³, 陈 瑾², 徐向东¹, 洪义麟¹

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;

2. 安徽师范大学 物理系, 安徽 芜湖 241000;

3. 中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230027)

摘要: 变线距光栅能够自动聚焦和消像差, 在同步辐射装置、激光核聚变装置上有着广阔的应用前景, 本文用干涉法测量变线距光栅的密度, 设计并给出了实验中的光路, 发现了环形的干涉条纹和变化规律, 分析了这些现象产生的原因, 产生明显的环形条纹的必要条件首先是变线距光栅的线密度单调变化的, 连续增加或连续减小, 其次要光栅的刻线是弯的, 第三虚栅的密度接近待测光栅的整数倍, 由于元件位置偏差, 检测用的平面波会变成球面波, 也会产生环形的干涉条纹, 但是这种效应可以忽略。预言了类似双曲线的干涉条纹。通过对条纹运动规律的分析, 可以在初步测量中定性分析光栅密度的变化趋势, 从而为进一步测量做准备。

关键词: 变线距光栅; 线密度; 干涉测量; 环形条纹

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

1 引言

变线距光栅具有自动聚焦和消像差等优良的特性, 所以单色仪采用变线距光栅可以节省光学元件、减少杂散光、简化单色仪的设计和加工、提高单色仪的分辨本领。因而在同步辐射装置、激光核聚变装置、太空探测器中变线距光栅有着广阔的应用前景^[1,4]。

变线距光栅的检测难点在于精确的测量线密度, 并找出它们的变化规律, 而光栅的其它参数可以用检测普通光栅的方法来测量。对刻线分布检测最简单的方法是用显微镜观察, 该方法难以对整块光栅作全面的评价, 国外最近几年发展起来的长程面形仪可以用来测变线距光栅^[5,6], 但是一般只适于检测已加工好的成品, 难以实现在线检测。笔者用干涉法测量了变线距光栅的线密度, 得到了比较准确的结果, 观察到了环形干涉条纹和它们的变化, 为了抛砖引玉, 下面就该现象进行肤浅的解释。

2 光路和图像

实验中光路见图1^[7], G 为待测光栅, 它的刻线在 YZ 平面上的投影平行于 Z 轴, C 是入射波, 一部分直接照到光栅表面, 其余部分被 M_2 反射形成另一路入射波 D 。 M_2 和 G 互相垂直的放在转台上, f_2, f_1 和 CCD 构成图像采集系统。 C, D 两束光对称入射到光栅上, C, D 的衍射光基本上沿法线方向出射, 两衍射光将在光栅表面形成较宽的干涉条纹, 两衍射光分别为 m_C, m_D 级, 它们

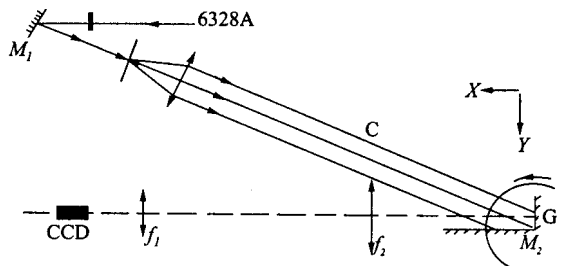


图1 检测光路

Fig. 1 Schematic of the measurement.

在光栅表面 S 点干涉场的光强是:

$$I(y, z) = I'_C + I'_D + 2 \sqrt{I'_C I'_D} \cos \frac{2\pi}{\lambda} [(\overline{P_C S} - \overline{P_D S}) - N(m_D - m_C) \lambda]$$

$$= I'_C + I'_D + 2 \sqrt{I'_C I'_D} \cos 2\pi K, \quad (1)$$

I'_C 和 I'_D 反映了两衍射光的强度, $K = \frac{1}{\lambda} [(\overline{P_C S} - \overline{P_D S}) - N(m_D - m_C) \lambda]$ 是干涉条纹的级次, P_C, P_D 分别是 C, D 等相面上的点, 经过它们的光线入射到光栅表面的 S 点, $\overline{P_C S}, \overline{P_D S}$ 是直线距离, N 是从坐标原点到 S 点之间的刻线数。

文献[8]中使用下列形式表示光栅的线密度 n :

$$n = \frac{dN}{dy} = \sum_{i=0}^{\infty} a_i y^i = a_0 + a_1 y^1 + a_2 y^2 + a_3 y^3 + a_4 y^4 + \dots, \quad (2)$$

在实验中通过测量干涉条纹就可以测出 N 和 n 以及 a_i , 一般在实际测量中最多只要求测到 a_3, a_4 。

理论上, 干涉条纹应该平行平直, 完全满足(1)式, 实验中采集了很多干涉条纹, 发现它们既不平行平直, 也不完全满足(1)式。观察到的主要现象为: (1) 干涉条纹是环形的; (2) 干涉条纹疏密不一样; (3) 入射角等有关参量连续改变时, 干涉条纹特殊的变化规律。图 2 是一幅干涉图, 入射角为 0.3070 rad , 可以明显观察到现象(1)、(2)。无论从减少干扰信号提高测量精度的角度, 还是从测量理论的角度来考虑, 都必须分析这些现象产生的原因。

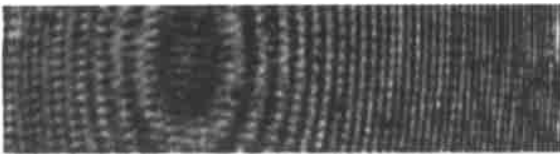


图 2 入射角为 0.3070 弧度, 干涉条纹图的局部
Fig. 2 Interference pattern when incidence angle is 0.3070 Rad .

3 对环形条纹的解释

环形的干涉条纹表明干涉级次基本上是对称的, 为了说明这个问题, 对(1)式进行分析, 用 K_{PS}

$= \frac{1}{\lambda} (\overline{P_C S} - \overline{P_D S})$ 表示 K 中几何距离的作用, 用 $K_{Nm} = N(m_D - m_C)$ 表示 K 中光栅刻线的作用, 则

$$K = K_{PS} - K_{Nm}, \quad (3)$$

对 K 求导数, 就得到干涉条纹的密度:

$$\frac{dK}{dy} = \frac{dK_{PS}}{dy} - (m_D - m_C) \frac{dN}{dy}, \quad (4)$$

可以将 K_{PS} 看作一个虚拟的光栅的刻线, 它的密度就是 C, D 两入射光干涉条纹的密度, $N(m_D - m_C)$ 相当于将待测光栅的刻线增加 $(m_D - m_C)$ 倍, 衍射光在光栅表面的干涉条纹的数量和密度是它们两者之差。用虚栅的密度减去干涉条纹的密度 dK/dy , 除以 $(m_D - m_C)$, 就得到干涉条纹的密度, 干涉条纹密度的变化量反映了光栅密度变化量的 $(m_D - m_C)$ 倍。

图 3 表示各种线密度连续变化的光栅中 K_{PS} 和 K_{Nm} 的关系。各图中 K_{PS} 始终是一条直线, 因为用于检测的 C, D 光束都是平面波, K_{PS} 的斜率和光栅表面坐标 y 无关, 它是虚栅的密度, 只和入射角有关。e 图中待测光栅的密度 dN/dy 恒定, K_{Nm} 也是直线, 它的斜率和 y 无关, 由(3)式可知两衍射光的干涉条纹级次 K 随着 y 线性变化, 各点的干涉条纹密度都一样, 如果两条直线的斜率相差太多, 干涉条纹将非常密, 可能观察不到干涉条纹, 如果斜率相同, 则干涉条纹无限宽, 光强均匀分布, 观察不到干涉条纹。a 图中 K_{Nm} 虽然随着 y 增加, 但是曲线向下凹, 各点的 K_{Nm} 斜率(光栅线密度)不一样并且随着 y 坐标的增加而增加, y_1 点的斜率小于 K_{PS} 的斜率, y_2 点的斜率等于 K_{PS} 的斜率, y_3 点的斜率大于 K_{PS} 的斜率, 由图中可以看到在 y_1 点和 y_3 点, K_{PS}, K_{Nm} 的差 K 相等, 说明这两点干涉级次相同, y_2 点两侧干涉级次基本上对称分布, 在 y_2 点 K_{PS}, K_{Nm} 的差 K 最小, 干涉条纹的密度 dK/dy 等于零, 干涉条纹最稀疏, 增大入射角, K_{PS} 的斜率增加, y_1, y_2, y_3 点向光栅密度增加(坐标增加)的方向移动, 干涉条纹向右移。b 图中 K_{Nm} 向上凸, 各点的 K_{Nm} 斜率(光栅线密度)不一样并且随着 y 坐标的增加而减小, y_2 点两侧干涉级次也基本上对称分布, y_2 点干涉条纹的密度也等于零, 干涉条纹最稀疏, 增大入射角, y_1, y_2, y_3 点向光栅密度增加(坐标减小)的方向移动, 干涉条纹向左移。c 图和 d 图中, K_{Nm} 的斜率在 y_2 点和 K_{PS} 相同, 干涉条纹的密度为零, 条纹最稀疏, y_1 点和 y_3 点 K_{Nm} 斜率相同, 这两点

干涉条纹的密度应该相同, 由于 K_{Nm} 和 K_{PS} 的差是干涉级次 K , 所以这两点干涉级次不相同, 如果以 y_2 点的干涉级次为零, y_1 点和 y_3 点的干涉级次一正一负, 在 y_2 点两侧干涉级次不对称, 从图中的情况开始增大入射角, K_{PS} 的斜率增加, c 图中条纹最疏的点 y_2 的位置不变, 各点的干涉条纹都变密, d 图中 y_2 点的干涉条纹变密, y_1, y_3 点干涉条纹变稀疏, 实际上 c 图中 y_2 点是光栅密度最大的点, d 图中 y_2 点是光栅密度最小的点; 从图中的情况开始减小入射角, K_{PS} 的斜率减小, c 图中 y_2 点的干涉条纹变密, y_1, y_3 点干涉条纹变稀疏, d 图中条纹最疏的点 y_2 的位置不变, 各点的干涉条纹都变密。无论待测光栅的密度变化多么复杂, 只要它是连续的, 就可以将它分成许多小块, 每一块都是图 3 中的一种情况, 实用的变线距光栅中尚未见到线密度不是连续变化的文献报道, 从目前变线距光栅的使用原理来讲, 所有的变线距光栅都是连续的, 都可以使用上面的分析, 图 3 中 c, d 两种情况也可以看成是 a, b 的组合。

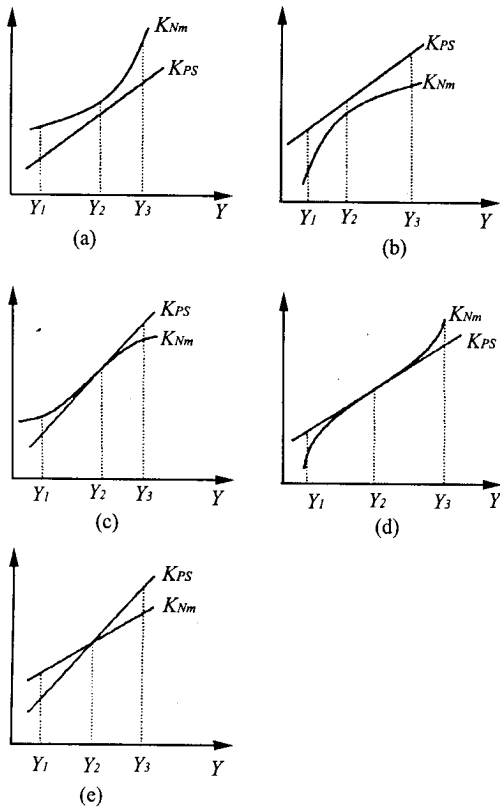


图 3 各种情况下的 K_{Nm} 和 K_{PS} 的关系

Fig. 3 All kinds of K_{Nm} and K_{PS} .

目前全息法制作变线距光栅的光路中, 采用的基本上是由两球面波或者稍微修整后的球面

波^[1,8,9], 所以刻线都不是直的, 虽然刻线的轻微弯曲不影响使用, 但在检测中会出现环形的干涉条纹。图 4 表示光栅的刻线, 沿着 y 向 K_{Nm} 逐渐增加, 沿着 z 向光栅的刻线数 N 基本上对称分布, 对称分布的 $K_{Nm} \neq 0$, 理论上沿着 z 向各点 K_{PS} 都完全相同, 所以沿着 z 向干涉条纹的级次 K 会发生变化, 会出现干涉条纹, 并且在整个光栅表面条纹关于 $z = 0$ 的直线基本上对称分布, 如果在 y 方向满足图 3a, b 的情况, 整个光栅表面干涉条纹将沿 $y = y_2$ 的直线基本上对称分布, 干涉图样就会出现同心环形或双曲线形, 它们的中心在 $(0, y_2, 0)$ 点。在对称中心附近, 当干涉级次 K 对于 z 轴的偏导数 $\partial K / \partial z$ 和对于 y 轴的偏导数 $\partial K / \partial y$ 符号相同时, 出现同心环形条纹, 符号相反时将出现两对类似双曲线的条纹, 只不过目前的实验中测量的光栅数量有限, 尚未观察到类似双曲线的条纹。

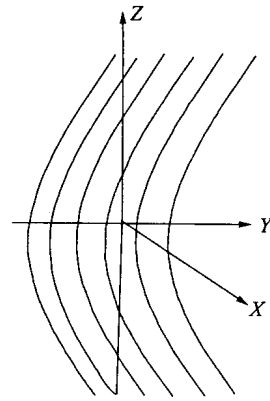


图 4 弯曲的刻线

Fig. 4 Curved grooves.

实验中不可能完全保证理论上的反射镜、光栅的位置, 沿着 z 向 K_{PS} 会有变化, K_{PS} 对 z 坐标的导数不为零, 通过和前文相似的讨论, 干涉条纹的对称中心将向上或向下移动。如果在实验中调节光栅的俯仰角, 由于入射平面波并不严格对称, 所以沿 z 向 K_{PS} 出现线性变化, 它的变化率随俯仰角的变化而变化, 对称中心将向上或向下运动, 这和实验中观察到的现象相符合。

如果入射光不是平面波, 而是曲率很大的球面波, 则沿着 z 向各点 K_{PS} 都不相同, 取曲率中心所在的平面为 xz 平面, 则 K_{PS} 的对称中心为 $z = 0$, 即便光栅的刻线完全平直, yz 平面上的干涉条

纹也将沿 $z = 0$ 的直线对称, 出现和上文相似的情况, 只不过从测量的角度来讲, 球面波很接近于平面波(另文给出讨论), 曲率中心应该离光栅非常远, 理论分析(略)表明这种效应完全可以忽略。

4 结论

变线距光栅的线密度检测比较困难, 本文尝试了用干涉法测量变线距光栅, 发现了环形干涉条纹和条纹变化的规律, 分析了这些现象产生的原因, 预言了类似双曲线的干涉条纹。

从前文分析可以发现, 要产生明显的环形条纹, 首先要变线距光栅的线密度单调变化, 连续增

加或连续减小, 其次要光栅的刻线是弯的, 第三虚栅的密度 $\partial K_{PS}/\partial y$ 和 $\partial K_{Nm}/\partial y$, $\partial K_{PS}/\partial z$ 和 $\partial K_{Nm}/\partial z$ 相近。这些只是必要条件, 仅满足它们, 还可能产生双曲线形条纹, 在对称中心附近, 当 $\partial K/\partial z$ 和 $\partial K/\partial y$ 符号相同时, 出现同心环形条纹, 符号相反时将出现两对类似双曲线的条纹。

由于元件位置偏差, 检测用的平面波会变成球面波, 也会产生环形的干涉条纹, 但是这种影响可以忽略。

通过对条纹运动规律的分析, 可以在初步测量中定性分析光栅密度的变化趋势, 从而为进一步测量做准备。

参考文献:

- [1] Namioka T, Koike M. Aspheric wavefront recording optics for holographic gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34: 2180_2186.
- [2] 王炜, 杨厚民. 平面变栅距光栅的原理及设计[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1158_1162.
- [3] Hettrick M C, Bowyer S. Varied line space gratings: new designs for use in grazing incidence spectrometers [J]. *Appl. Opt.* 1983, 22: 3921_3924.
- [4] 时轮, 郝德阜. 变栅距衍射光栅的原理及应用[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 284_288.
- [5] Cocco D, Sergio R, Sostero G, et al. High precision measurements of the groove density of diffraction gratings[A]. *San Diego: Conference on Soft X-Ray and EUV Imaging Systems* [C]. 2000.
- [6] Chen S J, Chen C T, Perng S Y, et al. Design and fabrication of an active polynomial grating for soft_X-ray monochromators and spectrometers[A]. *Berlin 7th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation* [C]. 2000.
- [7] 朱向冰, 何世平, 付绍军, 等. 云纹法检测变线距光栅的线密度[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 285_289.
- [8] Deville B, Bonnemason F. Holographically recorded, ion etched variable line space gratings[J]. *SPIE*, 1998. 3450: 24_35.
- [9] Palmer C. Theory of second generation holographic diffraction gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, 6(8): 1175_1188.

Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied_line_space gratings

ZHU Xiang_bing^{1, 2}, FU Shao_jun¹, YE Wei_quan¹,
HE Shi_ping³, CHEN Jin², XU Xiang_dong¹, HONG Yi_lin¹

(1. NSRL, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;

2. Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

3. School of Engineering Science, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: Varied_line_space gratings can correct aberrations, and they are useful in synchrotron radiation devices and laser inertial confinement fusion devices. In this paper, the line_density of varied_line_space gratings is measured with interferometry. The design of optical alignment is given, and the round interference fringes and their changes are observed in experiments. The prerequisite of round interference fringes is that the density of gratings is monotone, and the density of virtual grating divided by a integer is close to it, but the grooves are curved. The fringes that hyperbolas are predicted.

Key words: varied_line_space grating; line_density; interferometry; round interference fringes

作者简介: 朱向冰(1973), 男, 安徽省南陵人, 讲师, 中国科技大学国家同步辐射实验室博士生, 主要研究方向是光学加工和检测、图形处理。E_mail: readsword@263.net。