

文章编号 1004-924X(2003)04-0354-05

消像差光栅的理论及实验研究

朱向冰^{1,2}, 付绍军¹, 叶为全¹, 何世平³, 刘颖¹, 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: 对消像差光栅进行了理论和实验研究。用光程函数和费马原理研究光栅的成像, 用刻槽分布函数表示光栅的刻槽曲率及间距变化。对成像的理论分析表明光栅刻槽分布函数比刻槽间距更容易表达像差, 给出了消像差光栅的表达形式。比较了SD、WFA、LPF等光栅的参数优化方法。探讨了消像差光栅密度的干涉测量法, 设计了光路, 对光栅密度进行了测量。

关键词: 刻槽分布函数; 像差; 消像差光栅

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Theory, design, manufacture and measurement of aberration reducing gratings

ZHU Xiang-bing^{1,2}, FU Shao-jun¹, YE Wei-quan¹, HE Shi-ping³,
LIU Ying¹, 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: Fermat's principle and light path functions were used to analyze the aberration of gratings. The groove pattern function was employed to express the curvature and groove space of aberration reducing gratings, and the dispersive system containing a single grating was discussed. The groove pattern function contains more information about the imaging properties of the grating than groove space, and there is no need to project the grooves. Several expressions of aberration reducing gratings are given. The design manufacture and measurement of aberration reduced gratings are discussed. And the gratings measured by interference.

Key words: groove pattern function; aberration; aberration reducing gratings

收稿日期: 2003-04-16; 修订日期: 2003-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10272098)

1 引言

随着惯性约束核聚变、同步辐射应用技术和天体观测的发展, 对分光仪器的要求越来越高, 常规的分光仪器使用镜面, 但是波长较短时, 难以制造出合适的镜面, 有必要发展新型的分光仪器, 尽可能减少各种镜面, 使用消像差光栅替代常规光栅可以满足这些场合的要求。有意改变光栅刻槽(间距、曲率)和基底面形能提高光栅的分辨力, 改善光学系统的成像的特性, 并能节省辅助透镜, 减少杂散光, 增加出射光强, 提高光学系统的性能, 使光路更为简便^[1,3]。普通的凹面光栅仅靠面形就能达到很好的成像效果^[4,6], 而变密度光栅具有更大的优越性。国外少数公司(如 Jobbir Y von、蔡司)已能够生产这类光栅, 目前国内尚未掌握该技术。

介绍消像差光栅的刻槽间距和曲率变化、基底面形对光栅成像特性的影响, 阐述设计加工和检测方法。用几何光学的成像理论分析光栅的成像问题, 不考虑衍射效率、能量的强弱等问题。

2 成像理论

2.1 基本原理

图 1^[2]为单一光栅构成的简单分光仪器的示意图, 光栅的中心为原点 $O(0, 0, 0)$, X 轴是光栅中心的法线, YZ 平面是光栅的切平面, Z 轴为刻槽方向。点源 A 发出理想球面波, 经光栅衍射后, 某一个波长的光会聚于 B 点。对于普通的平面光栅而言, A, B 都在无穷远处, 如果改变光栅刻槽和基底面形, A, B 可以在有限远处。 α 是入射角, β 是衍射角。 $P(x, y, z)$ 是光栅表面上任意一点。

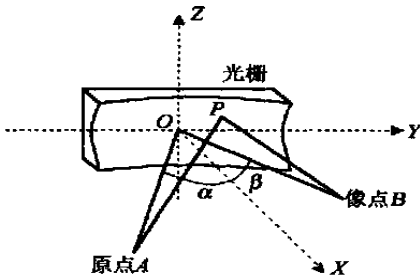


图 1 单个光栅对点源的成像
Fig. 1 Schematic of single grating

在图 1 中光程差应为^[7]:

$$\Psi(\lambda) = \overline{APB} - \overline{AOB} + Nm\lambda, \quad (1)$$

m 为衍射级次, λ 是光的波长, N 为 P, O 两点之间刻槽数。 $\Psi(\lambda)$ 与波长和衍射级次有关, 因此像点 B 的位置与波长、衍射级次有关, 在不同位置能得到不同波长的像。要理想成像必须消除所有像差, 即对于光栅表面所有点满足 $\Psi(\lambda) = 0$, 不为零的 $\Psi(\lambda)$ 反映了像差的大小^[2]。

对于给定的基底面形 $x = f(y, z)$, x 不是独立变量, 所以对于选定的 A, B 两点, 经过基底表面任一点 P 的 $\Psi(\lambda)$ 由 P 点的坐标 y, z 完全决定。一般情况下 $\Psi(\lambda)$ 可以关于 y, z 两坐标在原点附近展开, (1) 式可写成:

$$\begin{aligned} \Psi(\lambda) &= \overline{AP} + \overline{PB} - \overline{AO} - \overline{OB} + Nm\lambda = M + Nm\lambda \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} F_{ij} y^i z^j = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (M_{ij} + N_{ij}m\lambda) y^i z^j, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 M 包含了所有几何量, M_{ij}, N_{ij} 分别是 M, N 展开式的系数, 各高阶项的系数分别对应各种像差, F_{10} 对应光栅方程, F_{20} 表示离焦量, F_{02} 和 F_{04} 对应像散, F_{30} 对应彗差, F_{12} 和 F_{22} 对应像散彗差, F_{40} 对应球差^[2]。

2.2 刻槽分布函数

$N(x, y, z)$ 为 $P(x, y, z)$ 点的刻槽分布函数或槽函数, 对于给定的基底面形, $N(x, y, z)$ 简化为 $N(y, z)$ 。

设坐标原点处的密度和槽距为 n_0 和 d_0 , (2) 式中 $N = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} N_{ij} y^i z^j$ 。如果刻槽关于 XY 平面对称, 展式中关于 Z 的奇次项是 0, 即: $N = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} N_{ij} y^i z^j$; 如果刻槽都平行于 Z 轴, 则 N_{ij} 中所有关于 Z 的项都是 0, 前式简化为: $N = \sum_{i=0}^{\infty} N_i y^i$, 这是刻槽分布函数的常用形式。Kita 等人曾将槽距展成下列形式^[4]: $d(y, z) = d_0 \left(\sum_{n=1}^{\infty} n b_n y^{n-1} \right)^{-1}$, 其中 $b_1 = 1$ 。B. Deville 等人使用 $n = \sum_{i=0}^{\infty} a_i y^i$ 表示光栅的线密度^[8]。对于全息光栅 N_{ij} 常用 $H_{ij} = N_{ij} / \lambda_0$ 反映, λ_0 是制作光栅所用的波长, 对于机械刻划光栅常写成 G_{ij} ^[2]。

2.3 基底面形的影响

M 中包含了所有几何长度, 对于确定的 A 、 B 、 M 反应了基底的成像特性, 波长和槽函数仅通过衍射角 β 影响 M 。(2) 式中 $M = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} M_{ij} y^i z^j$, 其中每一项系数 M_{ij} 代表了一种由基底面形引起的衍射波前与理想波前之差, 对零级衍射光, 光栅简化为面镜, M_j 可以用各种数学形式来表达^[2,5,7,9]。

对于光线由入射狭缝进入, 经光栅和一些辅助镜后, 由出射狭缝射出的情况, 原理和上文是一致的。根据文献[9]可以写出图 2 光路的光程差的级数形式, 其中 MA、MB 是用来修正波前的椭球面镜。

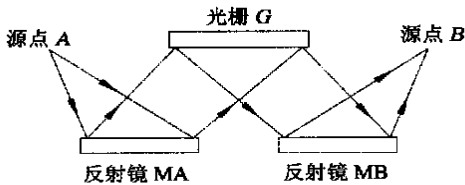


图 2 经过球面镜反射后的光栅成像

Fig.2 Schematic diagram of grating and ellipsoidal mirror

3 参数优化和光栅加工

3.1 参数优化

光栅的像差与波长有关, 参数优化是选择最好的参数, 使得指定的波长范围内特定的像差最小, 并且要考虑到计算量, 加工过程等因素^[10]。

参数优化的方法^[11]分为 LPF (Light Path Function) 方法、WFA (Wave Front Aberration) 方法和 SD (Spot Diagrams) 方法。一般不用 WFA 方法, 目前国内都采用 LPF 方法, 如国家同步辐射实验室的光栅^[12]。LPF 方法首先是根据实际情况确定要消除的主要像差, 一般是几个低阶像差, 如 F_{20} 和 F_{30} , 让几个典型波长的 $F_{ij} = 0$, 用具体的像差表达式求出光栅参数, 再根据参数求其他波长的像差, 如果它们都可以接受, 则参数优化完毕, 否则重新优化。M. Koike 和 T. Namioka 发展了 SD (Spot diagrams) 方法^[11,13], 又称为混合法 (Hybrid design method), 在一些特殊的波长处选择几条光线近似求解像点的位置, 进而评价和选择光栅的参数。在优化结束后, 都必须用严

格的射线追迹方法来验证。

文献[14]中用遗传算法求解光栅的参数, 既考虑到了全息加工, 又考虑到了解在全局范围内最优, 只不过算法复杂, 计算时间较长。

3.2 光栅的加工

能实现的 N_{ij} 越多则能消的像差就越多, 一般用到 N_{30} 。现代光栅刻划机可以制造密度缓慢变化的刻槽^[2]和弯曲的刻槽, 但还不能在任意形状的基底上刻制任意分布的刻槽。用全息离子束刻蚀法也可以制作槽距(密度)变化的光栅, 并且设备简单、速度快, 国外使用的光路已经发展到第二代, 第一代光路和图 1 相似, 只不过将 A 、 B 换成两相干点源, 对光栅基底进行曝光、刻蚀而成的, XY 平面内的两个点源共有四个坐标, 应该能实现 N_{10} 、 N_{20} 、 N_{30} 、 N_{40} , 其中 N_{10} 不表示像差, 该光栅最多只能消 3 种像差, 通常情况下该类光栅只用于消 2 种像差, 对于它们校正像差的讨论可参阅文献[2]; 第二代光路是在第一代光路中加入其他修正波前的光学元件, 一般是椭球面镜或凹面光栅^[8], 光路和图 2 相似, 这将使 N_{ij} 的表达式极其复杂^[9], 第二代变密度光栅既可以实现第一代不能实现的一些刻槽分布, 也可以实现更多的 N_{ij} 以减小多种的像差。

4 消像差光栅的检测

消像差光栅的检测难点在于精确的测量密度, 并找出它的变化规律, 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, 原子力显微镜可以直接观察单根刻线, 但是这种方法难以对整块光栅作全面的评价, 并且显微镜价格昂贵。如能准确的测量各点的衍射角, 就可以算出光栅的密度分布, 近年发展起来的长程面形仪(光笔式干涉仪)可以用来测衍射角^[15], 这种方法简单可靠, 只适于检测已加工好的成品; 还可采用 He-Ne 光扫描光栅表面以测量衍射角^[16]; 还有报道用测量自准直角的方式来测量光栅密度^[17]。

干涉法检测密度^[18]不仅简单、可靠, 而且可以观察整块光栅, 并且在全息法制造光栅过程中可以用来调整光路。光路见图 3, 待测光栅的刻线在 YZ 平面上的投影基本平行于 Z 轴, Z 轴垂直于纸面向上, C 是平面入射波, 一部分直接照到光

栅表面,其余部分被反射镜 Mirror 反射形成另一路入射波 D ,一般情况下让 C, D 对称入射到光栅上,并选择法线方向作为衍射光的传播方向,两衍射光将在光栅表面形成较宽的干涉条纹。两衍射波分别为 m_c 和 m_D 级,它们在光栅表面 S 点干涉条纹的级次是:

$$K = \frac{1}{\lambda_0} [(\overline{P_C S} - \overline{P_D S}) - N(m_D - m_C)\lambda_0], \quad (3)$$

λ_0 是检测光 C 的波长, 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 S 点的刻槽分布函数。

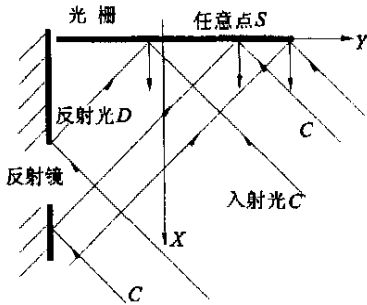


图3 检测光路

Fig. 3 Schematic of measurement

用 $K_{PS} = \frac{1}{\lambda_0}(\overline{P_C S} - \overline{P_D S})$ 表示 K 中几何距离的作用,用 $K_{Nm} = N(m_D - m_C)$ 表示 K 中光栅刻槽的作用,则 $K = K_{PS} - K_{Nm}$, 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。根据入射角计算出 K_{PS} , 测量出干涉条纹的位置 K 和衍射级次,就能得到待测光栅的 $N^{[19]}$ 。

5 结 论

通过对仅包含一个光栅的分光系统成像的分析,可以得出以下结论:刻槽分布函数 N 完全确定了刻槽对像的影响,不必求等效槽函数 N' ; 除衍射角之外,基底的成像特性与刻槽无直接关系;部分 F_0 代表了不同的像差,恰当的选择面形和刻槽分布函数,就可以减小特定的波长范围内的主要像差,对于给定的光栅,像差依赖于入射点、像点的位置和波长。

消像差光栅的参数优化仍然需要进一步研究,目前的方法虽然基本能满足要求,但是都仅仅对只包含一块光栅的简单光路进行分析,国内还没有 SD 方法的程序。

消像差光栅的加工和检测方法尚未完全成熟。干涉法可以检测光栅的密度,并可以实现在线检测和同时观察整块光栅表面,但对于密度变化很快光栅,干涉条纹会太密,数据难以处理,直接测量衍射角的方法虽然比较简单,但是很难看到加工中的缺陷,测量的范围也很有限,而且只能检测成品。

参考文献:

[1] HETTRICK M C, BOWYER S. Varied line-space gratings; new designs for use in grazing incidence spectrometers [J]. *Appl Opt*, 1983, 22: 3921-3924.

[2] PALMER C, MCKINNEY W R. Imaging theory of plane-symmetric varied line-space grating systems[J]. *Opt Eng*, 1994, 33(3): 820-829.

[3] 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.
SHI L, HAO D F. Theory and applications of varied line-space gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(3): 284-288. (in Chinese)

[4] KITA T, HARADA T. Use of aberration-corrected concave gratings in optical demultiplexers[J]. *Appl Opt*, 1983, 22: 819-825.

[5] AMIOKA T, KOIKE M, CONTENT D. Geometric theory of the ellipsoidal grating[J]. *Appl Opt*, 1994, 33: 7261-7274.

[6] NODA H, NAMIOKA T, SEYA M. Geometric theory of grating[J]. *J Opt Soc Am*, 1974, 64: 1031-1036.

[7] ABRAMSON N. Principle of least wave change[J]. *J Opt Soc Am*, 1989, A6: 627-629.

- [8] DEVILLE B, BONNEMASON F. Holographically recorded, ion etched variable line space gratings[A] . *Part of the SPIE Conference on Theory and Practice of Surface Relief Diffraction: Synchrotron and Other Applications, San Diego; CA*. 1998 *Proc SPIE* [C] . San Diego, 1998, 3450: 24-35.
- [9] NAMIOKA T, KOIKE M. Aspheric wave front recording optics for holographic gratings[J] . *Appl Opt*, 1995, 34: 2180-2186.
- [10] MCKINNEY W R, PLAMER C. Numerical design method for aberration reduced concave grating spectrometers[J] . *Appl Opt*, 1987, 26: 3108-3118.
- [11] KOIKE M, NAMIOKA T. Merit function for the design of grating instruments[J] . *Appl Opt*, 1994, 33(10) : 2048-2056.
- [12] SHENG W F, ZHENG H W. The design of the beamline for magnetic circular dichroism study at HNSRL[J] . *Nuc Instrum Meth*, 2000, A440: 232-240.
- [13] NAMIOKA T, KOIKE M. Analytical representation of spot diagrams and its application to the design of monochromators[J] . *Nuc Instrum Methodes*, 1992, A319: 219-217.
- [14] HARADA T, TAKAHASHI K, SAKUMA H, *et al*. Optimum design of a grazing incidence flat field spectrograph with a spherical varied line space grating[J] . *Appl Opt*, 1999, 38: 2743-2748.
- [15] COCCO D, SERGO R, SOSTERO G, *et al*. High precision measurements of the groove density of diffraction gratings [A] . *Conference on Soft X-Ray and EUV Imaging Systems, San Diego, CA, USA, Aug 03-04, Proc SPIE* [C] . San Diego, 2000, 4146: 143-150.
- [16] AMEMIYA K, KOTAJIMA. Fabrication of a varied line spacing plane grating with aspheric wavefront holographic recording for a new grazing incidence monochromator at the Photon Factory[A] . *Gratings and Grating Monochromators for Synchrotron Radiation. San Diego, CA, USA. 31 1997. Proc SPIE* [C] . San Diego CA, USA, 1997, 3150: 171-182.
- [17] 陈锵, 王秋平, 余小江, 等. 变间距光栅刻线密度的测试精度分析[J] . *核技术*, 2001, 24(7) : 557-563.
CHEN Q, WANG Q P, YU X J, *et al*. The groove density measurement of VLS plane grating by diffraction method [J] . *Nuclear Techniques*, 2001, 24(7) : 557-563. (in Chinese)
- [18] 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.
ZHU X B, HE S P, FU SH J, *et al*. Measurement of the line density of varied line space grating by Moiré fringe[J] . *Optics and Precision Engineering*. 2002, 10(3) : 285-289. (in Chinese)
- [19] 朱向冰, 付绍军, 叶为全, 等. 对变线距光栅干涉测量中的环形条纹的分析[J] . *光学 精密工程*, 2002, 10(6) : 634-637.
ZHU X B, FU SH J, YE W Q, *et al*. Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied line space gratings[J] . *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6) : 634-637. (in Chinese)

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