

文章编号 1004-924X(2008)07-1153-05

变栅距光栅光谱分辨研究

刘正坤, 谭鑫, 徐向东, 洪义麟, 付绍军

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要: 基于夫琅禾费衍射理论, 推导了平行光入射变栅距光栅后衍射光强的角度分布。计算了变栅距光栅参数相同, 入射光斑宽度分别为 5 mm 和 10 mm 时, 衍射光的分布特点和变栅距光栅参数不同, 入射光斑宽度为 10 mm 时, 衍射光的分布特点。实验验证了不同入射光斑宽度对光纤式变栅距光栅位移传感器分辨率的影响。结果表明: 基于变栅距光栅的衍射特点, 入射光斑直径的大小是影响传感器分辨率的一个重要因素。

关键词: 变栅距光栅; 分辨率; 夫琅禾费衍射

中图分类号: O436.1; O438.1 **文献标识码:** A

Study on resolving power of varied line-space grating

LIU Zheng-kun, TAN Xin, XU Xiang-dong, HONG Yi-lin, FU Shao-jun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: On the basis of Fraunhofer diffraction theory, the diffraction patterns of a Varied Line-space (VLS) grating were obtained for incidence beam in parallel and uniform. The intensities of the diffraction spots changing with diffraction angles were figured out and pictured, when the diameter of incident spots were 5 mm and 10 mm to the same VLS grating, and 10 mm to different VLS gratings. The result was validated by the experimentation for the sensor's resolving power when the diameter of incident spot was different to the same VLS grating. The result reveals that the diameter of incident spot is very important to the sensor's resolving power for the diffraction pattern of VLS grating.

Key words: Varied Line-space(VLS) grating; resolving power; Fraunhofer diffraction

1 引言

变栅距光栅一般用在同步辐射光束线成像系统和平场光谱仪中, 且多用于真空紫外波段和 X 波段, 如合肥国家同步辐射实验室中有多条光束线使用 VLS 光栅(平面, 凹面基底的)作为光学元

件, 其自身具有成像和消部分像差的功能。消像差的变栅距光栅的线密度一般变化比较平缓, 理论分析计算均是为了优化变栅距光栅参数以使衍射光束在成像面上有最小的像差。在国内已有长春光学精密机械与物理研究所的时轮, 王炜等介绍了 VLS 光栅的工作原理^[1-2], 朱向冰、陈锵等^[3-5]研究了变栅距光栅线密度的检测方法。

变栅距光栅大多用在消像差系统中,而运用其周期变化特性作为光学位移传感系统还是比较新的思想,文献[6-8]对此做了较为详细的原理介绍。这种传感器具有量程较宽,抗电磁干扰,结构简单和能给出绝对位移的特点,因此具有很好的应用前景,国内外都在进行研究开发。国内尚未见有文献分析变栅距光栅的衍射特性,而这在传感器的设计中是提高传感器分辨率必不可少的环节。本文结合夫琅禾费衍射积分的理论推导,给出了变栅距光栅在平行光入射情况下,衍射光强度随角度分布的积分公式;给出了不同波长的光在几种不同条件下经变栅距光栅衍射后的衍射光强随角度变化的分布图;并通过实验验证了不同入射光斑大小对位移传感器分辨率的影响情况。

2 变栅距光栅的衍射特性

由文献[6-7]可知变栅距光栅位移传感器的光学原理。用宽光谱的光入射到反射式的变栅距光栅上,入射角保持不变,所以在有位移变化时,变栅距光栅将不同波长的光自准直光衍射到接收光纤中,通过对接收到的光谱的数据处理和简单的公式计算可以得到位移的变化。其光学原理可用图 1 表示。为了图示的清晰,这里将文献[6]中反射式光栅改为透射式的,入射光为垂直光栅表面入射,但原理是一致的。

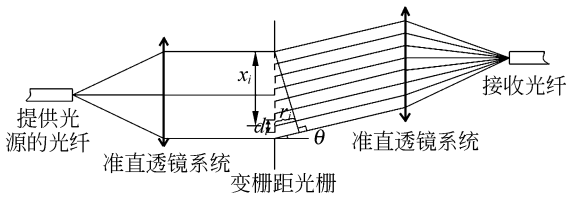


图 1 变栅距光栅传感器的光路原理图

Fig. 1 Path principle of VLS grating sensor

由光栅的夫琅禾费衍射公式^[10]:

$$\tilde{U}(\theta) = G \int_{(\Sigma_i)} \tilde{U}(x) \exp(jkR) dx = \sum_{i=1}^N G \int_{(\Sigma_i)} \tilde{U}(x_i) \exp(jkR_i) dx_i, \quad (1)$$

其中 r_i, x_i 如图 1 所示, $R_i = r_i - x_i \sin \theta$ 。

而对于特殊的光栅,这个公式具有普适性,单个周期的衍射强度计算:

$$\int_{(\Sigma_i)} \tilde{U}(x_i) \exp(jkR_i) dx_i = \exp(jkr_i) \int_{-d_i/2}^{d_i/2} \tilde{U}(x_i) \exp[-jkx_i \sin \theta] dx_i, \quad (2)$$

其中 r_i, x_i 如图 1 所示。

对于变栅距光栅, $r_i = (d_0/2 + d_1 + d_2 + \dots + d_{i-1} + d_i/2) \times \sin \theta$, $R_i = r_i - x_i \sin \theta$, 这里假定实际入射光的分布是均匀的,光栅为占空比为 1:1 的振幅光栅,得到下式:

$$\int_{-d_i/2}^{d_i/2} \tilde{U}(x_i) \exp[-jkx_i \sin \theta] dx_i = \tilde{U} \int_{-d_i/4}^{d_i/4} \exp[-jkx_i \sin \theta] dx_i = \frac{\tilde{U}}{-jk \sin(\theta)} [\exp(-jk \frac{d_i}{4} \sin \theta) - \exp(jk \frac{d_i}{4} \sin \theta)], \quad (3)$$

$$\tilde{U}(\theta) = \int_{(\Sigma_i)} \tilde{U}(x_i) \exp(jkR_i) dx_i = \exp(jkr_i) \int_{-d_i/2}^{d_i/2} \tilde{U}(x_i) \exp[-jkx_i \sin \theta] dx_i = \sum_{i=1}^N G \exp(jkx_i \sin \theta) \frac{\tilde{U}}{-jk \sin \theta} \times [\exp(-jk \frac{d_i}{4} \sin \theta) - \exp(jk \frac{d_i}{4} \sin \theta)], \quad (4)$$

N 表示在入射光斑内的光栅周期数;实际计算时,可以由光斑宽度与其中心位置变栅距光栅周期的比值得到,与准确值有一定的偏差,通过微小调整,可以得到与真实周期数有很小偏差的 $[N]$ 值 ($[N]$ 表示取整)。

实际变栅距光栅的周期与光栅基底位移之间的关系可以用多项式表示为:

$$d_i = d_0 + b_1 \times x_i + b_2 \times x_i^2 + b_3 \times x_i^3 + \dots, \quad (5)$$

在变栅距光栅位移传感器中,变栅距光栅的制作保证了其周期变化与光栅基底上位移的关系可用三次多项式表示,更高级次的影响基本可以忽略。在光栅衍射强度计算中,可以通过程序设计一个循环计算来求取每一个光栅周期的大小和相应的光栅中心位移 x 来简化计算公式。

通过聚焦透镜,在焦平面上对应的固定点的强度为:

$$I(\theta_i) = \tilde{U}(\theta) \times \tilde{U}^*(\theta). \quad (6)$$

3 变栅距光栅衍射实例计算

计算了当入射光为垂直入射,负一级衍射光

在不同波长时,衍射光斑的光强随衍射角度分布的特点。变栅距光栅的周期公式: $d_i = 1\ 000 + 4.5 \times 10^{-6} \times x + 1.2 \times 10^{-13} \times x^2$ (单位:nm);用式(4)~(6)得到入射光斑直径为 5 mm,入射光为 632.8 nm 的单色光的夫琅禾费衍射特性,如图 2,入射光斑直径为 5 mm,10 mm 时,入射波长为 632.4 nm 和 632.8 nm 的夫琅禾费衍射的强度分布分别如图 3,图 4。

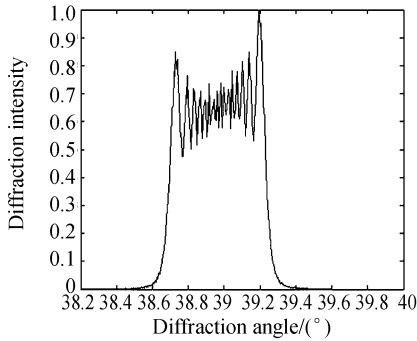


图 2 变栅距光栅负一级衍射光的强度分布
(入射光直径为 5 mm,周期 1 000~1 025 nm)

Fig. 2 Distribution of the -1 order diffraction intensity for VLS grating
($D=5\text{ mm}, d=1\ 000\sim 1\ 025\text{ nm}$)

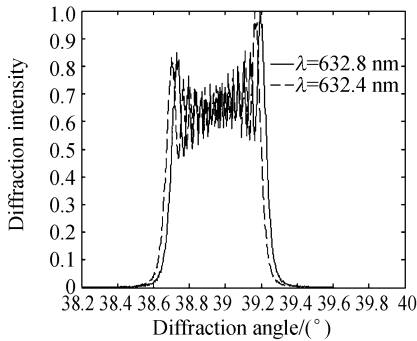


图 3 不同波长的负一级衍射光强分布
(入射光直径为 5 mm,周期 1 000~1 025 nm)

Fig. 1 Distribution of the -1 order diffraction intensity with different incident wavelengths
($D=5\text{ mm}, d=1\ 000\sim 1\ 025\text{ nm}$)

变栅距光栅的周期公式 $d_i = 1\ 000 + 2 \times 10^{-6} \times x + 2.2 \times 10^{-14} \times x^2 - 3.0 \times 10^{-21} \times x^3$ (周期和位移 x 的单位均 nm);用式(4)~(6)得到入射光斑为 10 mm 时的衍射光强度分布如图 5。

由图 2 可以看出,单波长的光平行入射到变栅距光栅后,衍射光的角度范围较宽,与等间距光

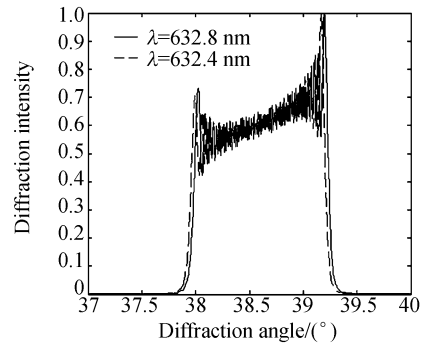


图 4 不同波长的负一级衍射光强分布
(入射光直径为 10 mm,周期 1 000~1 058 nm)

Fig. 4 Distribution of -1 order diffraction intensity with different incident wavelengths
($D=10\text{ mm}, d=1\ 000\sim 1\ 058\text{ nm}$)

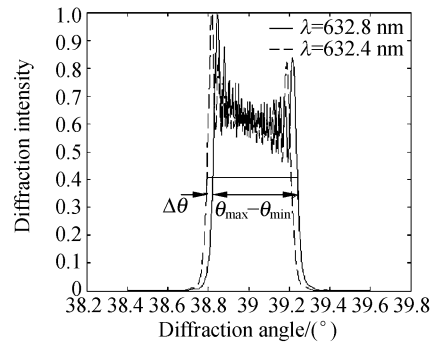


图 5 改变变栅距光栅参数后,图 4 的负一级衍射光强分布
(周期 1 000~1 019 nm)

Fig. 5 Distribution of -1 order diffraction intensity for Fig. 4 after changing VLS grating parameter
($d=1\ 000\sim 1\ 019\text{ nm}$)

栅的衍射光的特点有很大差距。由图 3,图 4 可以看出,在光斑范围内光栅周期的变化越大,衍射角度的展宽即图 5 中 $\theta_{\max} - \theta_{\min}$ 越大。图 5 与图 4 相比,由于图 5 光斑范围内周期变化较小,所以衍射光角度发散较小。

由图 3,图 4 和图 5 可以看出,对于变栅距光栅来说,单一波长的平行光入射后,衍射光的角度有一定的角度发散,经过准直透镜系统后,在焦平面上形成一定大小的光斑。实际传感器的数据测量,是从接收光纤得到具有很窄光谱宽度的光送入光谱仪,由光谱仪判断接收光的中心波长。由于光谱仪设备本身具有一定的本底噪声,如果接收光纤选择不合适或入射到变栅距光栅的光

斑直径不理想,会使得接收到的光谱曲线较宽,从而中心波长的强度与相邻波长(相邻波长指的是在光谱仪中相邻的 CCD 像元对应的波长值,每个 CCD 像元对应于一个波长,相邻波长之间的差值一般很小)的光谱强度相差很小。如果该差值低于 CCD 噪声的峰峰值,则由于噪声的影响,中心波长的采集和判断会出现偏差,由文献[8]中式(3)可知,在传感器的位移检测中,由噪声引起的随机误差会较大,使得传感器的整体分辨率降低。

在对变栅距光栅进行参数设计时,要考虑到后续衍射强度分布的大小。由图 4 可知,波长为 632.4 nm 与 632.8 nm 的光的衍射光斑中心衍射角的错位(图 5 中 $\Delta\theta$)与单一波长衍射光斑的角度带宽(图 5 中 $\theta_{\max} - \theta_{\min}$)之间的比值取决于入射到变栅距光栅的光斑两端的周期差,周期差越大,衍射角度越宽; $\Delta\theta$ 只与要分辨的波长差和光栅的中心线密度相关,光谱分辨确定后,这个值基本不变,所以 $\Delta\theta/(\theta_{\max} - \theta_{\min})$ 的值主要取决于 $\theta_{\max} - \theta_{\min}$ 的大小,也就是入射光斑直径的大小。

4 光斑变化对传感器分辨率的影响

搭建了一套光纤式变栅距光栅位移传感器装置,在实验中使用纤芯为 100 μm 的 Y 型光纤,其它保持不变,当光斑的直径分别为 6 mm 和 3 mm 时,采集数据。观察变栅距光栅的衍射光在不同入射光斑直径时,由于光谱分辨率不同对位移分辨产生的影响。

由图 6 可以看出,在光斑较大时, $\Delta\theta/(\theta_{\max} - \theta_{\min})$ 太小,由于噪声的影响,造成在同一位置的位移误差较大;将入射光斑减小时,位置精度有了一

些提高。图中的随机误差值在两端整体增加(由于衍射光强在传感器两端处的强度弱于中心位置),使得信噪比降低,所以两端的误差整体比中心位置高,误差值与理论分析的结果相符。

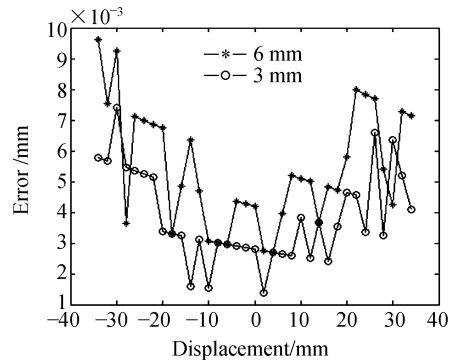


图 6 不同光斑造成光谱不稳定而引起的位移误差
Fig. 6 Displacement error of sensor with light spot of different diameters

5 结 论

从基本的夫琅禾费衍射积分公式出发,并结合实际的变栅距光栅的设计实例,得出变栅距光栅在变栅距光栅位移传感器中的衍射特性,给出在不同条件下变栅距光栅衍射特性的计算结果,并实验验证了理论分析对实际系统参数优化的作用。该理论分析计算对实际的传感器的整体设计和进一步研究起到了一定的指导作用,但只是理论分析了平行光入射时,衍射光的分布特性,而在实际的传感器制作中,很多情况并不能如理论假设中那么理想,如入射光不是绝对均匀,而是存在高斯分布的特性等。这些尚需进一步进行研究,以便尽可能对真实的系统给出理论分析。

参考文献:

- [1] 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):284-287.
SHI L, HAO D F. Theory and applications of varied line-space gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(3): 284-287. (in Chinese)
- [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.
WANG W, YANG H M. Principle and design of varied line-space plane gratings[J]. *Acta Optical Sinica*, 1999,19 (9):1158-1562. (in Chinese)
- [3] 朱向冰,何世平,付绍军,等.纹语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 SH P, FU SH J, et al.. Measurement of the line-density of a varied line-space grating by Moiré ringe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(3):285-289. (in Chinese)

- [4] 陈镛,王秋平. 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. The groove density measurement of VLS plane grating by diffraction method[J]. *Nuclear Techniques*, 2001, 24(7):557-563. (in Chinese)
- [5] 陈镛,胡中文. 变间距光栅刻线密度测试系统的性能评价[J]. 核技术, 2004, 27(1):9-13.
CHEN Q, HU ZH W. Performance of a grating groove density measuring system by diffraction method[J]. *Nuclear Techniques*, 2004, 27(1):9-13. (in Chinese)
- [6] SPILLMAN JR W B, LACLAIR R D, RUDD R E, *et al.*. Wavelength encoding long stroke fiber optic linear position sensor for actuator control applications[J]. *SPIE*, 1995, 2467:187-194.
- [7] IACLAIR R D, SPILLMAN W B, KUHNS W W. Long stroke optical fiber linear position sensor for the FLASH program[J]. *SPIE*, 1996, 2840:137-141.
- [8] 楼俊,付绍军,刘正坤,等. 全息平面变间距光栅位移传感器研究[J]. 光子学报, 2007, 36(4):655-658.
LOU J, FU SH J, LIU ZH K, *et al.*. Study on position sensor of holographic variable line-space plane gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4):655-658. (in Chinese)
- [9] 楼俊,徐向东,刘颖,等. 全息平面变间距光栅刻线弯曲程度分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):12-15.
LOU J, XU X D, LIU Y, *et al.*. Study on line-profiles of variable line-space plane gratings with holographic recording[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):12-15. (in Chinese)
- [10] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社, 1984:11-12.
ZHAO K H, ZHONG X H. *Optics*[M]. Beijing: Peking University Press, 1984:11-12. (in Chinese)

作者简介:刘正坤(1981—),男,河南潢川人,在读博士研究生,研究方向为衍射光学,微细加工技术和光学传感器。E-mail:zhkliu@mail.ustc.edu.cn

付绍军(1952—),男,吉林人,教授,博士生导师,研究方向为短波光学,二元光学,衍射光学,微细加工技术。E-mail:sjfu@ustc.edu.cn

● 下期预告

光学镜面离子束加工材料去除效率

焦长君,解旭辉,李圣怡,周 林

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

分析了离子束加工材料去除效率、不同材料之间的相对去除效率与工艺参数的关系。基于 Sigmund 溅射理论,建立表征去除效率的指标—法向去除率、体积去除率和溅射产额与束能、束流以及入射角度之间的关系模型。以石英、微晶和 K4 等为样件,实验分析了去除效率与工艺参数的关系,验证了模型的正确性。分析结果表明材料去除效率随束流线性增大;约与束能平方根呈线性关系;随着入射角度先缓慢增大,约在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 达到最大值,然后迅速降为 0。不同材料之间的相对去除效率与束流无关;与束能的关系较弱,可以忽略;随角度变化较为明显。