

变栅距衍射光栅的原理及应用

时 轮¹, 郝德阜²

(1. 吉林工学院机电学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 变栅距衍射光栅(VLS)在像差校正等方面具有突出优点,采用不同的栅距变化规律的变栅距光栅具有不同的光谱特性,因而在众多的高技术领域获得了广泛应用。本文从VLS的像差校正原理出发,较全面地阐述了VLS在真空紫外和软X射线、高分辨率光电探测器、表面干涉计量以及光纤通讯等领域的应用,并针对其技术特点指出了它的发展趋势。

关键词: 变栅距; 衍射光栅; 像差校正; 应用

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

1 引 言

传统的衍射光栅都是等栅距光栅,它们是各种光谱仪器的核心元件。但随着科学技术的进步,变栅距光栅(VLS)所具有的像差校正、高分辨率及平焦场等独特优点日益突出,使其在空间光谱仪、等离子体诊断、同步辐射单色仪、光纤通信等领域广泛应用。变栅距衍射光栅已经成为光栅领域又一个研究热点。

早在1875年,Comu就曾注意到,如果光栅刻槽的栅距不相等,而是按照一定规律变化时,光栅会变得像透镜一样,具有聚焦性能。借助一个线性栅距的变化(由早期的刻划机所固有的运行误差引起),他能够对具有大的线性栅距变化的刻划光栅进行一些聚焦能力的预测。但Comu的发现没有被深入研究,因为当时人们的注意力都放在如何减小栅距误差上了。

由于凹面光栅具有自聚焦特性,消除了平面光栅由于引入准直镜和聚光镜带来的能量损失,因此工作在真空紫外波段和极紫外波段的光谱仪广泛采用凹面光栅,但是凹面光栅存在严重的像差,为了减少这一像差,Comu关于变栅距的思想又得到了人们的关注。

2 VLS 的分类

光栅的分类方法有多种,这里以光栅刻槽的

变化对VLS进行分类。

2.1 直的、平行的刻槽

这种光栅的刻槽是直的且平行的,它是在光栅毛坯表面和金刚石刀具之间在刻划机上往复运动的相互作用下形成的,现代的光电式刻划机可以通过精确地测定单个刻槽的位置来加工这种VLS。这是最早的VLS,也是目前应用最多的一种,其典型产品有日本Hitachi公司中央研究所等刻划的VLS。

2.2 非线性刻槽

这种光栅的刻槽是弯曲的或同心弯曲的,虽然在刻划机上进行曲线刻划具有很大难度,但曲线刻槽的球面光栅比单独的变栅距或采用非球面的光栅存在着一个更大的像散校正区间。1982年,Perkin-Elmer公司已经开始刻划具有单侧弯曲的同心刻槽的平面VLS^[1]。目前,非线性光栅的刻划也普遍采用全息方法^[2]。

2.3 扇形刻槽

这种光栅的刻槽是直的,但刻槽向刻划中心会聚,其栅距沿着刻槽的长度方向变化,衍射光波沿着锥体传播,这种VLS可以用于校正相对于谱像作线性变化的焦距。对扇形刻槽的刻划是很有挑战性的,因为沿着每条刻槽,其深度是连续变化的,这就需要有一种可以连续改变金刚石刀具负载的方法,由于既要满足大闪耀角的要求,又要在刻槽之间完成栅距的变化,所以,具有扇形刻槽的VLS可能是最难加工的^[3]。

3 VLS 的像差校正原理

VLS 最突出的优点是具有像差校正能力。众所周知, 等栅距凹面光栅具有自聚焦的特点, 但其像散明显, 特别是在大衍射角的条件下, 这限制了凹面光栅的进一步应用。变栅距凹面光栅则可以较好地解决这一问题。

等栅距凹面光栅在子午面内和弧矢面内的聚焦成像条件一般不能同时满足, 因此像散是子午焦线与弧矢焦线相分离而产生的一种像差。但是光栅栅距的变化会改变子午光线焦点的位置, 其变化量决定了焦线的形状和位置。

若光栅的栅距按线性规律变化: $d(Y) = d(1 + bY)$, 则子午焦线的方程为^[4]:

$$\frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} + b \sin i = - \left[\frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} + b \sin \theta \right]$$

其中: Y —— 垂直于光栅刻槽且沿其宽度方向的坐标;

- d —— 光栅中点处栅距,
- b —— 栅距变化系数,
- i —— 入射角,
- θ —— 衍射角,
- R —— 光栅曲率半径,
- r, r' —— 狭缝及其像点到光栅顶点的距离。

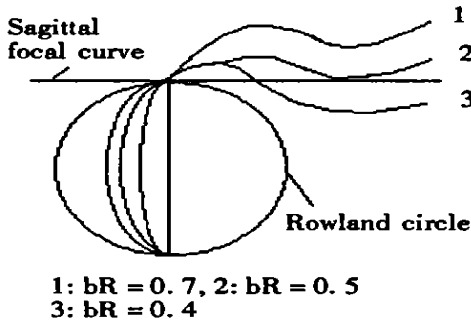


Fig. 1 Focal curve of the concave VLS

由此看到, 光栅栅距的变化会改变子午光线焦线的形状。如图 1 所示, 引入变栅距之后, 子午焦线为不封闭的曲线 (图中的曲线 1, 2, 3), 在它和弧矢焦线 (图中罗兰圆的切线为其最简解) 的交点可以完全消像散。因此, 对于给定的波长, 当入射角和衍射角一定时, 通过改变栅距的变化规律, 即可达到消除像散的目的。

平面 VLS 亦具有相似的像差校正功能。

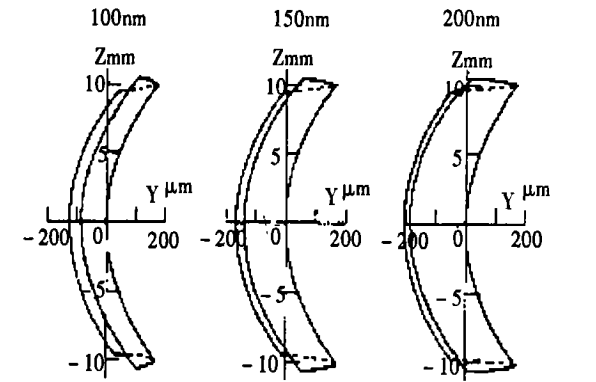
4 VLS 的应用领域

由于 VLS 在像差校正、高分辨率及平焦场等方面的独特优点, 其应用场合十分广泛, 并且其应用领域还在不断扩大。

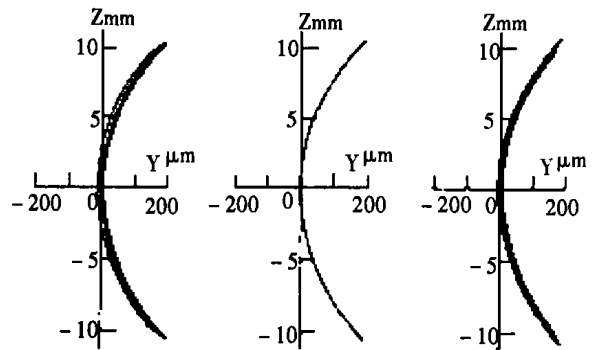
4.1 真空紫外和软 X 射线

VLS 推动了真空紫外和软 X 射线领域的发展, 这是光谱学研究的一个重要成就。

在真空紫外领域的一个主要应用是空间探测器上的光栅光谱仪^[5,9]。VLS 在空间天体物理上的首次应用是在 1992 年发射的 EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer) 上, 其光谱仪采用了加州大学伯克利分校空间科学实验室设计的三块 VLS, 用于在深空探测望远镜的焦平面上聚焦光谱像, 其刻划宽度均为 200mm, 栅距变化范围分别是 1675~3550g/mm, 830~1750g/mm, 415g/mm~875g/mm, 工作波长为 7nm~70nm。VLS 其他的成功应用还包括在 1993 年发射的 ORFEUS (Orbiting Retrievable Far and Ultraviolet Spectrometer) 等, 都获得了令人满意的效果。



(a) Conventional concave grating



(b) VLS concave grating

Fig. 2 Ray-traced spectral images obtained with Seya Namioka monochromator

图2为采用真空紫外单色仪获得的谱像对比图^[10], (a)图系统采用等栅距光栅, (b)图采用VLS凹面光栅, 可以看出, VLS使谱像分辨率显著提高。

VLS在软X射线方面的典型应用包括等离子体诊断以及同步辐射用仪器等^[11-12]。

以VLS为主组成的平焦场光谱仪和高分辨率光谱仪在激光等离子体诊断中获得了广泛应用, 它们是等离子体软X射线诊断中最有效的工具之一, 可用于测量X射线的发射线宽并确定时间相干长度, 由于其焦面为平面, 因此对记录介质的限制大大降低, 很容易就可以获得较高的分辨率, 例如, Lawrence Berkeley Lab的一种平焦场VLS光谱仪, 摄谱范围8nm~25nm, 在13nm处分辨率为 $M \Delta\lambda = 30000$, 16nm处为35000。

由于以VLS为核心的单色仪分辨率较高, 因此在同步辐射中应用较多, 我国合肥国家同步辐射实验室在光电子能谱光束线中使用VLS单色仪后, 在分辨率、光通量以及消除谱线弯曲等方面都有显著提高^[13]。

4.2 高分辨率的光电探测器

一些新型的高分辨率光电探测器如微通道板、超高速扫描摄像机等, 它们所需的光谱应成像在一个平展的探测表面, 但普通的等栅距光栅光谱仪很难直接与之相连, 而利用VLS平焦场的特点, 掠入射光栅上变化的栅距可以使不同波长的衍射光都聚焦在一个平直的焦面上, 用以获得要求的平展视场的图像。

4.3 表面干涉计量



Fig. 3 Interferogram of optical testing using VLS flat grating

VLS可用于光学表面(特别是非球面)干涉计量的波面发生器。例如Perlir-Elmer公司已经在平面光栅中采用了变栅距技术, 用于产生要求

的波前。在光栅刻槽是直的、平行的情况下, 这些波前是柱形的, 可以被用来对圆柱形的镜片轮廓进行精确的干涉测量, 图3即为采用平面变栅距光栅对光学表面干涉计量时获得的一幅表面干涉图; 而当刻槽是单侧弯曲的同心圆时, 则可用于对球面或非球面的弯曲表面进行干涉测量^[14]。

4.4 光纤通讯

VLS可用于光纤通讯中的波分复用技术。波分复用是指将多路不同波长的光波信号在一根光纤上进行多路复用, 这可使传输容量成倍增加。其工作原理是: 在发送端将不同波长的调制光信号, 经过复用器耦合后送入光纤进行传输, 在接收端通过解复用器, 把不同波长的调制光信号分开, 分别送到各自的光接收机。

用光栅做复用器和解复用器具有波长间隔小、复用路数多等优点, 而为了克服普通平面光栅需要准直和聚焦元件以及普通凹面光栅像散大的缺点, VLS的应用前景广阔。

5 VLS应用的发展趋势

- 具有像差校正功能的VLS, 在掠入射条件下可以获得高分辨率, 这一特点在单色仪和光谱仪中将得到进一步开发和利用, 这对软X射线和极紫外辐射具有重要意义。

- 随着VLS研究的深入, 色散系统将更加简化, 原来的光学组件有可能被新型的单块式元件所替代, 使光学系统进一步小型化。

- 随着光电式刻划机性能的提高^[15-16], 特别是全息光栅的日益发展, 具有曲线刻槽的VLS将逐步实用化, 由于它们有着更大的像散校正区间, 其应用前景也更广阔。

- VLS用于干涉计量尚处于起步阶段, 今后将会获得更大发展。

6 结束语

VLS具有优良的像差校正能力, 其应用已不仅仅局限于真空紫外、软X射线等光谱仪器领域, 它在光纤通讯、非球表面干涉计量等方面的潜力正在展现, 应用前景十分广阔, 对其进行深入的应用开发具有重要意义。

参考文献:

- [1] Marshall H W, Hirst G E. Diffraction gratings and replication[J]. Perkin Elmer Tec. Note, 1985, 2(1): 22
- [2] Wilkinson Erik, Green James C. First generation holographic recording solutions for grazing incidence systems[C]. Proc. SPIE, 1994, 2279: 165.
- [3] Hettrick Michael C. Varied line space gratings: past, present and future[C]. Proc. SPIE, 1985, 560: 96.
- [4] 李全臣, 等. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [5] Bowyer Stuart. The unique variable line space spectrometers on the EUVE satellite: in flight performance and selected scientific results[C]. Proc. SPIE, 1995, 2517: 97.
- [6] Friedman Scott D, et al. Instrument description and science performance of the far ultraviolet spectroscopic explorer[C]. Proc. SPIE, 1994, 2283.
- [7] Green James C, et al. The design of the far ultraviolet spectroscopic explorer spectrograph[C]. Proc. SPIE, 1994, 2283: 12.
- [8] Hurwitz Mark, Bowyer Stuar. The Berkeley spectrometer for ORFEUS: laboratory and in flight performance[C]. Proc. SPIE, 1995: 2517: 116.
- [9] Bar toe J D, Buckner G E, Purcell J D, et al. Extreme ultraviolet spectrograph ATM experiment S082B[J]. Appl. Opt, 1997, 16(4): 879.
- [10] Harada Tatsuo, Kita Toshiak. Mechanically ruled aberration corrected concave gratings[J]. Appl. Opt, 1980, 19(23): 3987.
- [11] Hettrick M C, Underwood J H, Baston P J. Resolving power of 35, 000(5mÅ) in the extreme ultraviolet employing a grazing incidence spectrometer[J]. Appl. Opt, 1988, 27(2): 200.
- [12] Underwood J H, Gullikson E M, Koike M. Beam line for metrology of X ray/EUV optics at the advanced light source[C]. Proc. SPIE, 1997, 3113: 214.
- [13] 余小江, 等. 变刻槽间距光栅在光电子能谱光束线的应用[A]. 全国第二次同步辐射光束线工程、束线光 and 新技术研讨会论文集[C]. 湖南: 中国物理学会同步辐射专业委员会, 1997, 24.
- [14] Hirst George E. Some recent development in the fabrication of variably spaced linear and circular diffraction gratings[C]. Proc. SPIE, 1985, 560: 64.
- [15] 樊叔维. 任意槽形光栅衍射特性的矢量理论分析与计算[J]. 光学 精密 工程, 2000, 8(1): 5- 10.
- [16] 王炜. 程控放大器及其典型应用的实例[J]. 光学 精密 工程, 1998, 6(2): 89.

Theory and applications of varied line space gratings

SHI Lun¹, HAO De-fu²

(1. Department of Mechatronics, Jilin Institute of Technology, Changchun 130012, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
 Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Varied line space gratings (VLS) have great advantages in aberration correction, and the different spectral properties will be gained using the VLS with different rules of spacing. In this paper, the aberration correction principles of the gratings and their applications in the areas of vacuum ultraviolet, soft X ray, high resolution photoelectric detectors, surface metrology and optical fiber communication is described. Finally, the potential of the gratings in the future is discussed.

Key words: varied line space gratings(VLS); aberration correction; applications

作者简介: 时 轮(1968-), 男, 吉林省长春市人。1996 年获得硕士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士生, 主要从事光学超精密加工的研究工作。