

用拼接法获取大面积衍射光栅

赵 博, 郝德阜

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光谱技术研究部, 吉林 长春 130021)

摘要:近年来大面积衍射光栅已成为许多大型高技术工程项目的关键元件, 它的获取方法也一直是光栅界探求的目标, 本文简要回顾衍射光栅研制技术的发展历史, 介绍了衍射光栅的发展趋势以及国内外研制大面积衍射光栅的技术现状, 说明了拼接光栅的原理、方法以及利用这种方法来获取大面积衍射光栅的诸多优点。目前拼接光栅中各小光栅的衍射波阵面的位相还没有做到完全一致, 要做到一致还需做很多工作, 但用拼接手段来获取大面积光栅已是一种非常有效的方法。

关键词: 衍射光栅; 拼接光栅; 大面积衍射光栅

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

1 引 言

衍射光栅是一种精密的分光元件, 它通常是采用在玻璃毛坯上每毫米制作出几十到几千条刻线来获取的。目前衍射光栅已不再仅仅应用于光谱分析上了, 已广泛地扩展应用于光通信、精密计量、集成光学、信息处理以及激光核聚变等诸多方面。当今光栅的发展趋势正朝着高效率、大面积、新品种的方向发展。

衍射光栅的制造历史已逾百年。1823年, Fraunhofer 制作出世界上第一块衍射光栅, 半个多世纪后 Rowland 制作出世界上第一块性能优良的光栅(刻划宽度 152mm、分辨率超过 15 万), 并建立了光栅理论。Rowland 还首先制成了凹面光栅和既简单而象差又小的分光仪。凹面光栅对紫外光谱的研究起着很大的推动作用。但是, Rowland 是在铜锡合金上刻划光栅的, 这种合金在可见光区域的反射率较高, 而在近紫外区域反射率会下降到 10% 以下, 在真空紫外区域就更低了。后来, Wood 将光栅刻划在镀有金属薄膜的玻璃表面上, 使光栅的衍射效率有所提高。Anderson 和 Wood 还研究了光栅模型对光强分布的影响, 并且提出了“闪耀光栅”理论, 大大地提高了衍射效率。由于光栅刻划很费时间又需要昂贵的设备, 并且对刻划条件要求也很苛刻, 所以人们提出了光栅的复制方法, 这一方法使得光栅的制造成本大大降低。

这以后, 光栅制造技术的进步经历了几次大

的改进, 每次大的改进都依赖于理论上的突破和技术上的进步。其中最重要的当属两件事: 其一为 20 世纪 50 年代, Harrison 将干涉光电技术用于控制光栅刻划过程, 使得刻制更高质量衍射光栅成为可能, 现在利用带有这种干涉反馈控制装置的刻划机已成功地刻制出用于天文上的尺寸大至 $308 \times 408\text{mm}$ 的衍射光栅。与 Rowland 时期相比, 色散和集光效率均大大提高, 而鬼线和杂散光也减小了几个数量级。其二为 20 世纪 60 年代末, 随着激光技术的发展而发明的全息光栅制作技术, 它是采用记录激光干涉条纹来制取光栅的, 用这种方法制取的光栅具有无鬼线、杂散光强度低、制作周期短以及校正象差(凹面光栅)等诸多优点^[1]。后来通过采用离子刻蚀的方法使全息光栅的闪耀效率得到提高, 达到了与刻划光栅相同的水平, 这样全息离子刻蚀光栅技术就成为光栅制作的主流技术。

为了满足研制新一代大型天文望远镜、研究激光核聚变等方面的需要, 超大面积衍射光栅的制取就向光栅专家们提出了严峻的挑战。例如: 美国 University of Texas 计划要研制 300 英寸的天文望远镜, 其附属耐氏焦点光谱仪所需的光栅尺寸为 $600 \times 900\text{mm}$ ^[2]; 美国 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL) 在激光核聚变项目上使用大面积光栅来对激光脉冲进行压缩, 他们使用的光栅面积更是达到 $940 \times 750\text{mm}$ ^[3]。能否获取大面积的衍射光栅已经成为这些项目成败的关键之一。

2 方法的比较

若想获得大面积衍射光栅,人们很自然会想到研制大光栅刻划机,因为只要研制出大光栅刻划机就有可能刻划出大光栅来。我国目前能刻划出的最大面积光栅为 $300 \times 300\text{mm}$,若想刻划出近 5 倍于目前最大面积的光栅,首先要加工出行程近一米的高精密度丝杠,这不但要投入大量的资金、大量的人力,而且加工周期也很长,难度会很大。即使研制出大光栅刻划机,还保证不了一定能刻划出大光栅来,还要解决大面积镀膜均匀性的问题,因为要在近 1m^2 的面积上镀出厚度均匀性误差小于 1% 的膜层,也是很难实现的。另外,要刻出这么大的光栅,相当于刻刀要往复行走 800 多公里,金刚石刀具的磨损会很严重,因此用一把刀具是无法刻出高质量的光栅的,必须用几把刀具才行。这就要解决高精度自动换刀的问题,每把刀具不但要保持相同的角度,同时还要保证纳米级定位精度的自动换刀,困难会更大^[4]。

全世界的光栅制作专家们在探索研制大光栅刻划机的同时,也在不断探索其他制取大光栅的方法,人们开始设想能否用几块小光栅来拼成一块大光栅。因为用几块小光栅来拼接大光栅不但可以避开研制大光栅刻划机的诸多困难,而且还有如下优点:

- (1) 小光栅的制取比大光栅的制取相对要容易很多;
- (2) 多块小光栅的制造成本要比一块大光栅的制造成本低;
- (3) 小面积光栅比大面积光栅更易于获得高的质量。

在 20 世纪 50 年代初,美国 Palomar Observatory 把四块尺寸相同的 $140 \times 178\text{mm}$ 的小光栅,利用可调式结构拼接成了一块大光栅,并且用在当时刚建成的五米望远镜折轴光谱仪上。每次使用前必须调整,来校对各小光栅的相对几何位置,使各小光栅产生的相应谱线的几何位置重合在底片分辨率之内,但并没有要求相邻小光栅的衍射波阵面彼此同位相。加拿大 Dominion Astrophysics Observatory (DAO) 于 1966 年也用四块尺寸相同的 $165 \times 190\text{mm}$ 的小光栅拼接出一块大光栅,并用于科得摄谱仪上,其结构也为可调式,类同于美国 Palomar Observatory 的那一块^[5]。美国 Richardson Grating Laboratory 于

1995 年为 European Southern Observatory (ESO) 制作了一块 $840 \times 214 \times 125\text{mm}$ 的拼接光栅,并用于其 8 米大型天文望远镜附属光谱仪上。他们先把光栅拼接好,然后再把拼接好的光栅复制在一块大玻璃基底上,从而构成一块大光栅,也没有要求相邻小光栅的衍射波阵面同位相。Richardson Grating Laboratory 还于 1999 年 8 月为 National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) 制作了三块拼接光栅,其中两块为: $650 \times 420 \times 110\text{mm}$, 重量是 77kg; 另一块为: $850 \times 320 \times 130\text{mm}$, 重量是 90kg。如下图所示:

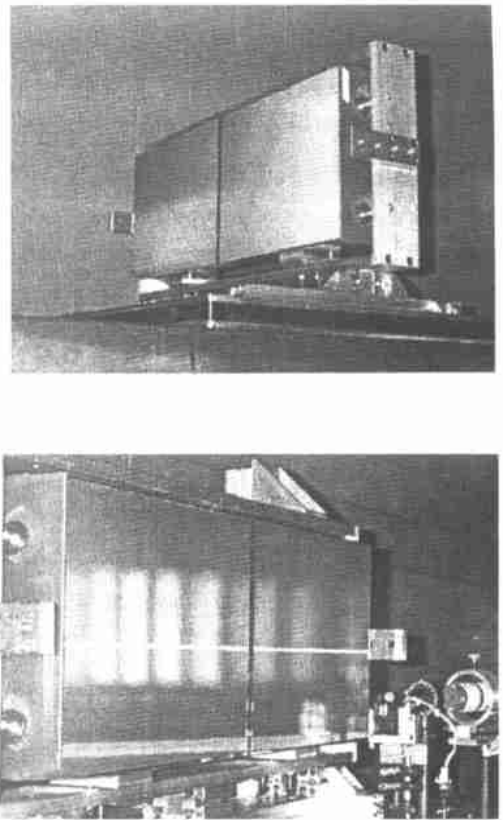


Fig. 1 The mosaic gratings made by Richardson grating laboratory

这些采用拼接方法获得的光栅已经在天文方面发挥了很大的作用。虽然构成拼接光栅的各小光栅的衍射波阵面位相还没有做到完全一致,但拼接方法已经成为制取大面积光栅的一种很有效的方法。

3 拼接光栅的原理

3.1 衍射光栅的机械式拼接

所谓的光栅拼接是指把两块或几块衍射光栅

放在一起,并使相互间衍射波阵面的位相差足够小,相当于一块完整光栅的精度,进而当作一块光栅来使用。原理如下图所示。在 Fig. 2 中,光栅 G_1 和 G_2 之间存在间隔 B, S , 一平面波以角 α 入射到光栅 G_1 和 G_2 上,若想使光线 1 和 2 以相同的角 β 衍射出,必须使光栅 G_1 和 G_2 的表面平行而且栅线也要平行。设这时某同一衍射级次的衍射光线 1 和光线 2 之间存在位相差 δ :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [S \cdot (\sin\beta + \sin\alpha) - B \cdot (\cos\beta + \cos\alpha)] \quad (1)$$

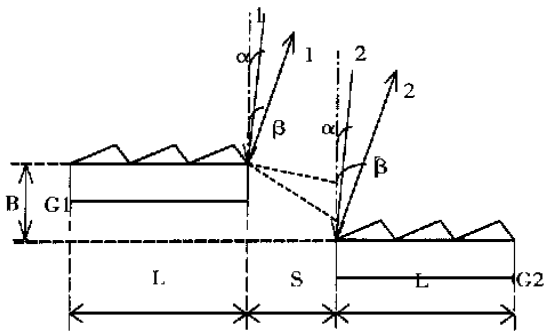


Fig.2 Phase matching of the diffraction gratings

根据不同的使用要求,有如下几种情况:

1) 对于只使用单色光时,只要上式的值为 2π 的整数倍,就说明此时的拼接光栅在这一衍射级次上已经达到位相一致,即可以当作一块光栅来使用。

2) 对于一般天文上的使用时,拼接光栅中各小光栅并不要求衍射波阵面之间的位相一致,因为单就每一块小光栅来说,它们的分辨率已经满足使用要求,用它们拼接大光栅只是为了提高光强。因此只要保证一定的共面精度,即使得(1)式中 B 的值越趋近于零越好,就可以达到增加光强的目的。但这时 S 的值不能太大,否则会造成光能的过大损失。

3) 对于位相精度有较高要求时,为了保证拼接光栅中各小光栅的衍射波阵面间的位相一致,不但要使各小光栅共面(即 $B = 0$),而且还须保证下式的值为 2π 的整数倍:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot S \cdot (\sin\beta + \sin\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta l \quad (2)$$

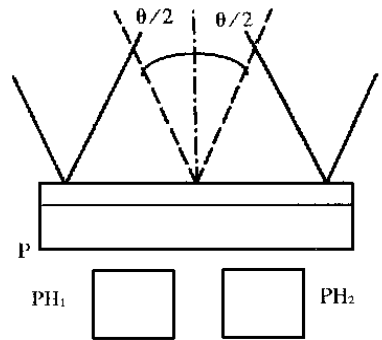
也就是说不但要做到 $B = 0$,而且还要做到 $S = Nd$,即间隔 S 为光栅常数的整数倍。(其中: N 为

一正整数, d 为待拼接小光栅的光栅常数。)

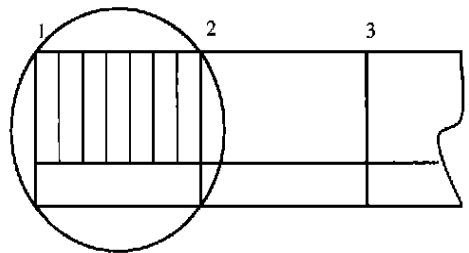
由于拼接光栅必须要设计相应的机械结构,这样必然要存在一定的间隔 S ,一般应保证: $S \leq L/10$ (L 为待拼接小光栅的刻划宽度),使得光能不致损失过大。

3.2 全息衍射光栅的拼接

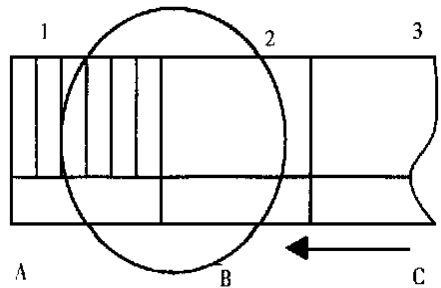
1995年,俄罗斯 Leningrad Nuclear Physics Institute (LNPI) 的光学专家们采用全息技术拼接出面积几倍于干涉场口径的全息大光栅,其原理是通过对干涉场的位相结构进行高精度的检测,利用自适应干涉仪对干涉场的位相分布进行相应的调制,从而达到对光栅拼接过程的自动控制^[6]。如 Fig. 3 所示:



(1)



(2)



(3)

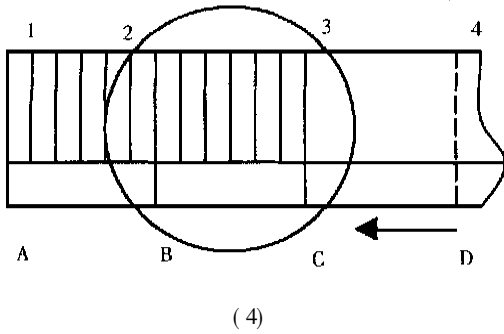


Fig. 3 Phase synthesis of holographic metrological diffraction grating

在 Fig. 3(1) 中, 两束相干平行光的夹角为 θ , P 为照相底片, PH₁ 和 PH₂ 分别为光学探头(由光电二极管和电子学系统组成的用以记录莫尔条纹的位相差别)。Fig. 3 中(2)、(3)、(4) 为具体拼接过程, 其中 1、2、3、4 分别为待拼接的部分, A、B、C、D 处为参考标准光栅。1 处曝光完毕, 沿着箭头方向移动并将 2、3、4 等处曝光。其原理是用一块基准光栅与干涉场的周期条纹结构形成莫尔条纹, 并用光电探测器进行实时记录 1 处的标准信号, 以这个信号为标准来确定 2、3、4 等处的曝光位置, 进而制作出大面积全息拼接光栅来。

用这种方法获取全息拼接光栅的累积误差与待拼接的光栅长度存在以下关系:

$$\Delta S = \pm (0.03 + 0.4L) \mu\text{m} \quad (3)$$

式中: L 为待拼接光栅的总长度, 单位为米。

这种大面积全息拼接光栅可以达到一定的位相精度, 因此用此种方法来获取的大面积光栅比用前述的机械拼接方法更接近于理想的一块光栅。LNPI 的科技人员已用这种方法制取了长度为 1.1 米的大面积全息光栅, 并成功地用于天文方面。

4 实现拼接大光栅的技术关键及对未来的展望

4.1 实现拼接大光栅的技术关键

参考文献:

- [1] Stroke G W. Diffraction Gratings, Encyclopedia of Physics[M]. Academic Press, 1967. 12- 23.
- [2] Richardson E H. The Journal of The Royal Astronomical Society of Canada, 1968, 62(6): 313- 331.
- [3] Shore B W, Perry M D, Boyd R D, Li Lifeng. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings[J]. J. Opt. Soc. Am., 1997, 14(5): 1124- 1136.
- [4] Hoose John, Lowen Erwin, Wiley Robert, Blasiak Thomas. A new generation of larger telescopes presents an unprecedented challenge to optics manufactures[J]. Photonics Spectra, 1995, (12): 118- 120.

从衍射光栅的拼接原理可以看出, 大面积拼接光栅实现的关键在于:

(1) 待拼接的各光栅间共面精度的实现, 以及各个光栅栅线间平行性的实现。通常各光栅间的共面精度应保证在十几个 nm 的数量级, 而各个光栅栅线间平行性精度应保证在 $0.1s$ 之内。

(2) 拼接光栅中各光栅衍射波阵面间的位相差要做到不低于各小光栅本身所具有的位相精度, 这样才能保证所拼接出的光栅能当作一块完整的光栅来用。

4.2 对未来的展望

现在应用在天文上的拼接光栅对各小光栅的衍射波阵面位相没有要求完全一致, 因此还不能算是一块完美的大光栅, 也就是说这种拼接光栅还不能应用在对位相精度要求很高的场合。我们如果利用拼接光栅构成一个自适应干涉仪, 对各小光栅间的位相进行实时调整校对, 实现自动控制, 这样拼接光栅的应用范围就会更广。在拼接光栅方面美国、日本与俄罗斯已取得很大的成果^[7-15], 我国在光栅拼接技术的研究工作方面, 目前还基本上处于空白阶段, 一些工程项目所需的大光栅还得依赖于从国外进口, 有些项目所需的大光栅的进口还受到国外的限制。我们应该尽快开展这方面的研究工作, 解决大光栅依赖进口的状况, 使我国光栅研制达到国际先进水平。

5 结 论

随着科学技术的高速发展, 衍射光栅的应用越来越广, 对大面积衍射光栅的需求也越来越多, 我国陆续开展的激光核聚变、LAMOST 天文望远镜等一些大工程项目都迫切需要大面积衍射光栅, 而且能否获取大面积衍射光栅已经成为影响这些项目成败的关键元件。由前述可知, 用拼接方法来制取大光栅不但可以避免研制大光栅刻划机所面临的一些困难, 而且投入的资金相对也较少、周期也短。因此, 用拼接方法是目前制取大面积衍射光栅的重要途径。

- [5] Brealey G A, Fletcher J M, Grundmann W A, Richardson E H. Adjustable mosaic grating mounts[J]. Proc. SPIE, 1994, 240: 225– 228.
- [6] Turukhano B G, Gorelik V P, Kovalenko S N, Turukhano N. Phase synthesis of a holographic metrological diffraction grating of unlimited Length[J]. Optics & Laser Technology. 1996, 28(4): 263– 268.
- [7] Gordeev S V, Turukhano B G. Investigation of the interference field of two spherical waves for holographic recording of precision radial diffraction gratings[J]. Opt Laser Technol. 1996, 28: 255– 261.
- [8] Gorelik V P, Kovalenko S N, Turukhano B G. Phase measurements in an interference fringe pattern by two-frequency sinusoidal phase modulation[J]. Opt Commun. 1988, 69: 98– 100.
- [9] Gordeev S V, Gorelik V P, Turukhano B G, Turukhano N. Investigation of interference field phase distribution with moving holographic diffraction grating[J]. Opt Commun, 1982, 43: 85– 88.
- [10] Mazzacurati V, Ruocco R. The super gratings: how to improve the limiting resolution of grating spectrometers [J]. Opt Commun, 1991, 76: 185– 190.
- [11] Dodorico S, Morewood A. Instrumentation for the ESO very large telescope[J]. Journal of Optics, 1992, 22: 85 – 98.
- [12] Hutley M C. Diffraction grating[M]. Academic Press, 1982. 11– 40.
- [13] Loewen E G, Wiley R S. Large diffraction grating ruling engine with nanometer digital control system[J]. Proc. SPIE, 1987, 815: 88– 95.
- [14] Takada Yutaka. Super-accurate positioning technique using diffracted moire signals[J]. Proc. SPIE, 1990, 1332: 571– 576.
- [15] Uchino K. Recent development of piezoelectric actuators for adaptive structures[J]. Proc. SPIE, 1993, 2040: 245 – 257.

Manufacturing large-size grating by mosaic way

ZHAO Bo, HAO De-fu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: The large-size diffraction gratings have become the key unit of some major engineering. All of grating experts around the world are searching the way to produce the large size gratings. This paper reviewed the history of grating manufacturing and introduced the trend of grating development, meanwhile, described the principle of the mosaic gratings. By analyzing the way which foreign country made mosaic gratings, we found the diffraction wave front of every grating is out of phase in a large one and there are a lot of things to do for it to be in-phase. But there are many advantages for manufacturing large-size gratings by mosaic way. We come to a decision, at present, the way of mosaic gratings is a very effective method for manufacturing large-size gratings.

Key words: diffraction gratings; mosaic gratings; large-size diffraction gratings

作者简介: 赵 博(1967–), 男, 黑龙江五常市人。1990年毕业于长春光学精密机械学院光学工程系, 获学士学位。1996年毕业于中国科学院长春光机所, 获光学仪器专业硕士学位。现在长春光机所攻读机械制造及其自动化专业博士学位。主要从事光谱仪器、精密计量仪器的设计研究工作。