

文章编号: 0258-7025(2003)05-0405-04

亚波长光栅用于实现宽光谱消色散 1/4 波片的研究

伊德尔, 严瑛白, 谭峭峰, 刘海涛, 金国藩

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 基于严格耦合波理论, 分析了共振区域矩形位相光栅的衍射特性: 位相延迟与光栅周期、占空比、槽深的关系, 并设计出在 400~800 nm 范围内的消色散 1/4 波片光栅, 可以实现较为平坦的衍射效率和位相延迟曲线, 其中位相延迟可保持在 90°左右, 最大偏差小于 9%, 达到甚至优于普通二元复合消色散波片。通过对加工及安装误差的讨论, 得到了影响消色散波片光栅性能的主要加工误差是槽深误差和占空比误差。

关键词 光电子学; 亚波长光栅; 严格耦合波理论; 消色散波片

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Study on Broadband Achromatic Quarter-wave Plate by Subwavelength Gratings

YI De-er, YAN Ying-bai, TAN Qiao-feng, LIU Hai-tao, JIN Guo-fan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology
and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Based on rigorous coupled-wave theory, the relationship between diffraction property of rectangular phase gratings in resonant region and grating period, duty cycle, thickness is analyzed. An achromatic quarter-wave grating for 400~800 nm is designed. In the broadband, the grating has smooth efficiency and phase retardation. Specially, the phase retardation could maintain about 90°, and the maximum retardation deviation is less than 9%. Its performance is even better than some normal binary achromatic wave-plates. With the analysis of fabrication error, it is noted that thickness error and duty cycle error affect the grating's performance greatly.

Key words optoelectronics; subwavelength gratings; rigorous coupled-wave theory; achromatic wave-plate

1 引言

亚波长光栅由于其特殊的衍射特性越来越受到人们的关注, 它可以实现偏振^[1~3]、增透(高反)、窄带滤波等功能, 而一些亚波长光栅衍射的偏振相关性类似单轴晶体的双折射效应, 因此可以用于替代普通波片。

Flanders 通过 X 射线光刻和反应离子刻蚀在 SiN 上制作了矩形位相 1/4 波片光栅^[1]; Enger 等和 Cescato 等则利用全息方法制作了正弦型 1/4 波

片光栅^[2,3], 它们均处于静态光栅区域(即光栅周期 $d \ll \lambda$), 位相延迟的色散非常严重, 只能用于单波长系统。共振区域光栅(即光栅周期 $d \sim \lambda$) 相比静态区域光栅而言, 不仅周期的增加大大降低了加工难度, 而且适当选择参数可以减小位相延迟的色散, 可作为宽光谱范围内的消色散波片光栅^[4~7]。

根据王植恒等的分析^[8], 在单色平面波入射情况下(相干长度无限大), 由于共振区域光栅基底厚度有限, 基底平面会影响光栅的衍射行为, 使其产生密集的高反射或全反射峰。本文针对普通半导体激

收稿日期: 2002-02-08; 收到修改稿日期: 2002-04-08

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目(G19990330)及国家高技术项目 863-804-2 资助。

作者简介: 伊德尔(1978—), 男, 蒙古族, 清华大学精密系博士研究生, 主要从事衍射光学、光存储的研究。E-mail: yidcer99@mails.tsinghua.edu.cn

光器(LD)设计,由于其相干长度一般小于1 mm,而实际光栅的基底厚度非常容易做到超过相干长度,因此可不考虑基底厚度的影响,在设计中使用半无限大基底模型。

2 设计原理

矩形位相光栅结构如图1所示,由于位于共振区域,设计过程基于严格耦合波理论^[9,10]。首先,沿

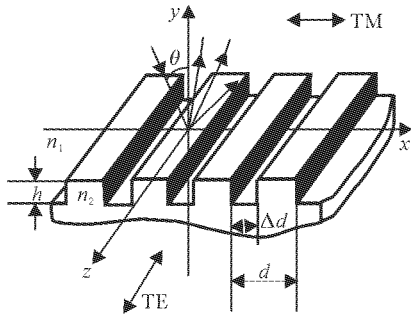


图1 矩形亚波长光栅结构图

Fig.1 Sketch of rectangular sub-wavelength grating

光栅的上下边界将整个空间分成三个区域:入射介质区($y > 0$)、光栅位相调制区($-h < y < 0$)和透射区($y < -h$)。将每一区域的光场分解为一系列平面波的叠加,在光栅区使用麦克斯韦方程组,并结合位相匹配和 Floquet 条件得到矢量耦合波方程,最后使用光栅边界条件,通过适当的数值计算方法,求得第 m 级透射波的振幅系数 \vec{E}_m ^[6]

$$\vec{E}_m = |\vec{E}_{TE_m}| \exp[j(\vec{k}_m \cdot \vec{r} - \omega t + \Phi_{TE_m})] \hat{n}_{//m} + |\vec{E}_{TM_m}| \exp[j(\vec{k}_m \cdot \vec{r} - \omega t + \Phi_{TM_m})] \hat{n}_{\perp m} \quad (1)$$

式中 $\hat{n}_{//}$ 和 \hat{n}_{\perp} 分别为沿着 z 和 x 方向的单位矢量,并且

$$\Phi_{TE_m} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{imag}(\vec{E}_{TE_m})}{\text{real}(\vec{E}_{TE_m})} \right] \quad (2)$$

$$\Phi_{TM_m} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{imag}(\vec{E}_{TM_m})}{\text{real}(\vec{E}_{TM_m})} \right] \quad (3)$$

则光栅第 m 级衍射光引入的位相延迟量 $\Delta\Phi_{TE-TM}$ 为

$$\Delta\Phi_{(TE-TM)m} = \Phi_{TE_m} - \Phi_{TM_m} \quad (4)$$

以光束垂直入射为例,即 $\theta = 0^\circ$,光栅材料选用熔石英玻璃,计算表明材料折射率色散对设计结果影响较小,在此忽略其影响,取折射率 $n = 1.4584$ (可见光光谱中心 $\lambda = 600 \text{ nm}$),因此需要确定的参数有:光栅周期 d ,占空比 $\alpha = \Delta d/d$,光栅槽

深 h 。

针对 400~800 nm 可见光范围内的三个波长 400 nm,630 nm 和 780 nm 复消色散进行设计,以达到在整个光谱范围消除位相延迟色散。在设计中为描述光栅位相延迟的色散程度,定义光栅分别对 400 nm,630 nm,780 nm 三个波长光束产生的位相延迟色散 ϵ 如下

$$\epsilon = \sqrt{(90^\circ - \phi_{400})^2 + (90^\circ - \phi_{630})^2 + (90^\circ - \phi_{780})^2} \quad (5)$$

其中 $\phi_{400}, \phi_{630}, \phi_{780}$ 分别为 400 nm,630 nm 和 780 nm 三个波长对应的位相延迟量。

下面分别分析占空比 α ,光栅周期 d 及光栅槽深 h 对光栅波片色散 ϵ 的影响,并以此为依据确定消色散 1/4 波片光栅的结构参数。

2.1 光栅占空比 α ,槽深 h 对位相延迟色散 ϵ 的影响

一般定义共振区域为 $0.1 \frac{\lambda}{n} \sim 10 \frac{\lambda}{n}$,对于 400~800 nm 光谱范围的中心波长 600 nm 而言,即 $0.04 \sim 4 \mu\text{m}$ 。选取共振区域的中间参数,即光栅周期为 $d = 0.40 \mu\text{m}$ 的光栅为例,从 0.5~0.8 改变光栅的占空比 α ,得到三波长位相延迟均方根误差 ϵ 与光栅槽深 h 的关系曲线如图 2 所示。

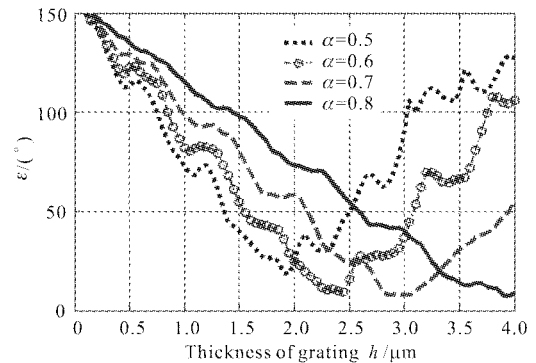


图2 $d = 0.40 \mu\text{m}$ 时,不同占空比 α 下,位相延迟色散 ϵ 同光栅槽深 h 的关系

Fig.2 Relationship between phase retard dispersion ϵ and grating depth h at different duty cycle α when $d = 0.40 \mu\text{m}$

由图 2 可知,当 $d = 0.40 \mu\text{m}$,占空比 α 从 0.5~0.8 变化时,其对应的位相延迟色散 ϵ 的最小值越来越小,也就是光栅色散的最小值越来越小;但所对应的光栅深度 h 也不断增加,增加了加工难度。

2.2 光栅周期 d ,槽深 h 对位相延迟色散 ϵ 的影响
光栅周期的大小,影响着光栅加工的难度,因此

寻找周期对光栅衍射特性的影响是很重要的。由上面对占空比影响的分析,选取光栅的占空比为 0.7,光栅周期从 $0.35 \mu\text{m}$ 变化到 $0.55 \mu\text{m}$,得到的计算结果如图 3 所示。

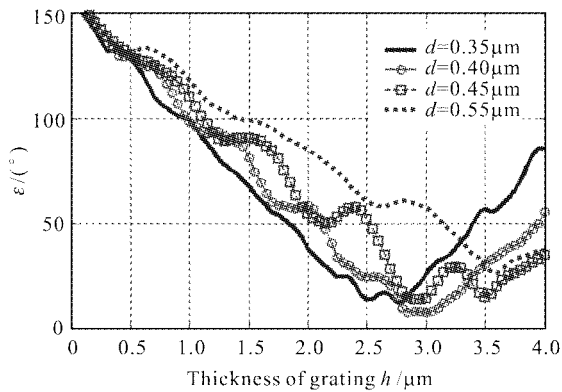


图 3 $\alpha = 0.7$ 时,不同周期 d 下,位相延迟色散 ϵ 同光栅槽深 h 的关系

Fig. 3 Relationship between phase retard dispersion ϵ and grating depth h at different period d when $\alpha = 0.7$

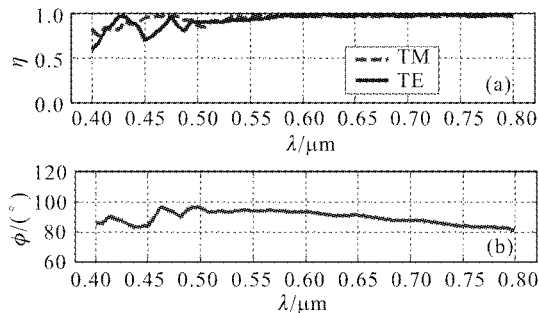


图 4 亚波长矩形位相光栅的衍射效率(a)及位相延迟(b)

Fig. 4 Transmission efficiency (a) and phase retard ϕ (b) of rectangular sub-wavelength grating

由图 3 可知,当光栅周期分别为 $0.35 \mu\text{m}$, $0.40 \mu\text{m}$, $0.50 \mu\text{m}$ 和 $0.55 \mu\text{m}$ 时,曲线的最小值不断向右移动,表明光栅周期越大,槽深要求越深才可以达到消色散的目的。

综合考虑消色散要求、衍射效率及加工难度,最终确定光栅的结构参数为:矩形位相光栅周期 $0.40 \mu\text{m}$,槽深 $2.82 \mu\text{m}$,占空比为 0.7,其衍射效率及位相延迟 ϕ 如图 4 所示。

从图中可以看出,器件在 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内具有比较平坦的性能,衍射效率大于 60%,位相延迟 $\phi = 90^\circ \pm 8^\circ$,其消色散性能达到甚至优于普通二元复合消色散波片^[11]。

3 误差分析

由于亚波长光栅加工对加工工艺要求很高,因此在实际加工中会引入许多误差,实用过程中也会引入其他安装误差,下面对加工以及安装误差对亚波长光栅衍射性能的影响进行分析,通过计算发现误差对光栅的衍射效率影响很小,在此仅给出误差对位相延迟色散的影响。

按目前的加工水平,光栅槽深控制难度较大,一般可以认为其误差控制在 $\Delta h = \pm 100 \text{ nm}$ 左右^[12]。下面分别对 $h = h - \Delta h = 2.72 \mu\text{m}$ 和 $h = h + \Delta h = 2.92 \mu\text{m}$ 进行计算,可得到槽深加工误差在 $\pm 100 \text{ nm}$ 左右时对光栅位相延迟 ϕ 的影响,如图 5 所示。

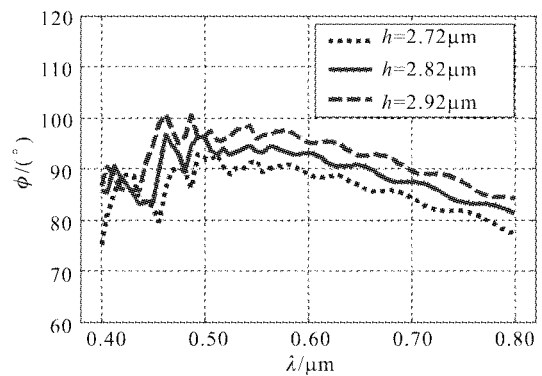


图 5 槽深误差对光栅位相延迟 ϕ 的影响

Fig. 5 Effect of depth error on grating's phase retard ϕ

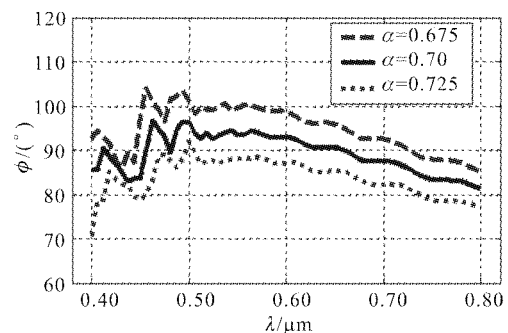


图 6 占空比误差 $\Delta\alpha$ 对光栅位相延迟 ϕ 的影响

Fig. 6 Effect of duty cycle error on grating's phase retard

占空比误差 $\Delta\alpha$ 同样会影响到光栅的衍射性能,其误差一般可控制在 $\pm 10 \text{ nm}$ ^[9]。对于周期为 $0.40 \mu\text{m}$ 的光栅,其占空比变化范围为 $\alpha = 0.7 \pm 0.025$,占空比误差对光栅位相延迟 ϕ 的影响如图 6 所示。

从图 5 和图 6 中可知,槽深误差及占空比误差均对位相延迟影响较大,对短波长的影响更为明显。

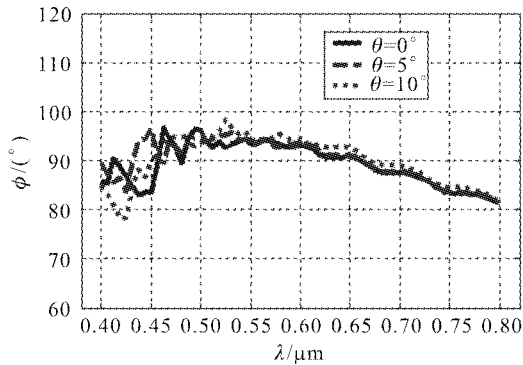


图 7 入射光角度误差 $\Delta\theta$ 对光栅位相延迟 ϕ 的影响
Fig. 7 Effect of incident angle error on grating's phase retard

实际器件使用时,安装误差会导致入射光束非垂直入射到光栅表面,即 $\theta \neq 0^\circ$ 。假设安装误差 $\Delta\theta = \pm 10^\circ$ 。计算入射角为 $\theta = 0^\circ \pm 10^\circ$, 其影响如图 7 所示。

由图 7 可知,安装误差对位相延迟的影响相对较小,同样地,主要影响短波长部分。

4 结 论

1) 基于严格耦合波理论计算分析了共振区亚波长光栅在实现可见光区域消色散 1/4 波片的可能。通过研究分析,得到了亚波长矩形位相光栅的衍射特性与光栅周期、占空比、槽深的关系。

2) 基于上面得到的关系,设计出可应用在可见光范围内的消色散 1/4 波片光栅,能够在宽光谱内达到较为平坦的位相曲线和较高的衍射效率。具体指标为 400~800 nm 范围内位相延迟均可保持在 90° 左右,最大偏差小于 9%,衍射效率高于 60%。性能达到甚至优于普通二元复合消色散波片。

3) 通过对加工过程及安装调试过程中可能引入的误差进行讨论,得到了影响消色散 1/4 波片光栅最终性能的主要误差是光栅的槽深误差和占空比误差,这在下一步的器件加工中需要注意。另外,通过对测试过程光线入射倾角的分析,得出倾斜入射对衍射特性的影响主要在短波长区域。

致谢 感谢清华大学精密仪器系光栅实验室的李立峰教授提供了光栅矢量计算软件 Kappa 以及对作者工作的指导。

参 考 文 献

- 1 Dale C. Flanders, Submicrometer periodicity grating as artificial anisotropic dielectrics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**(6):492~494
- 2 R. C. Enger, S. K. Case, Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(20):3220~3228
- 3 Lucila H. Cescato, Ekkehart Gluch, Norbert Streibl, Holographic quarterwave plates [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(22):3286~3290
- 4 Hisao Kikuta, Yasushi Ohiro, Koichi Iwata, Achromatic quarter-wave plates using the dispersion of form birefringence [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7):1566~1572
- 5 Gregory P. Nordin, Panfilo C. Deguzman, Broadband form birefringent quarter-wave plate for the mid-infrared wavelength region [J]. *Opt. Expr.*, 1999, **5**(8):163~168
- 6 Nandor Bokor, Revital Shechter, Nir Davidson *et al.*, Achromatic phase retarder by slanted illumination of a dielectric grating with period comparable with the wavelength [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(13):2076~2080
- 7 Panfilo C. Deguzman, Gregory P. Nordin, Stacked subwavelength gratings as circular polarization filters [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31):5731~5737
- 8 Wang Zhiheng, Fu Kexiang, Wen Jun *et al.*, The property and application of reflectivity of subwavelength phase gratings [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(3):270~274 (in Chinese)
- 9 Zhang Guoping, Ming Hai, Xie Jiaping *et al.*, Antireflection properties of crossed binary phase gratings [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(8):699~702 (in Chinese)
- 10 Tae Jin Kim, Gene Campbell, Raymond K. Kostuk, Volume holographic phase-retardation elements [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(19):2030~2032
- 11 Jin Guofan, Li Jingzhen, *Laser Metrology* [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- 12 P. Blair, M. R. Taghizadch, W. Parkes *et al.*, High-efficiency binary fan-out gratings by modulation a high-frequency carrier grating [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14):2406~2413