

文章编号: 0253-2239(2004)05-668-5

# 基于共振异常的消偏振型窄带滤波器分析\*

唐雄贵<sup>1</sup> 杜春雷<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学物理系, 成都 610064  
<sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

**摘要:** 亚波长光栅因光栅参量的不同而具有不同的衍射特性, 通过对亚波长光栅参量的合理设计来实现消偏振窄带滤波是一种新的方法与途径。首先分析了基于共振异常的窄带滤波的物理机制及存在条件, 讨论了二维亚波长光栅实现消偏振窄带滤波的可能性。然后, 利用严格模式理论进行了计算模拟, 其计算结果与导波理论所得结果基本吻合, 其衍射特性表现出周期性共振异常、敏感的角度依赖性和波长依赖性。最后, 讨论了由工艺误差对滤波特性所带来的影响, 为具体工艺制作提供了一定的指导。

**关键词:** 衍射光学; 严格模式理论; 共振异常; 窄带滤波; 消偏振

中图分类号: TN256 文献标识码: A

## Analysis of Nonpolarizing Narrow-Band Filters Based on Resonant Anomaly

Tang Xiongui<sup>1</sup> Du Chunlei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Optical Technology for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 10 March 2003; revised 2 June 2003)

**Abstract:** Subwavelength gratings with different grating parameter have different diffractive properties, and realization of nonpolarizing narrow-band filtering by reasonably designing the parameter of subwavelength grating is a novel method and approach. Based on resonant anomaly, physical mechanism of narrow-band filtering and its condition was analyzed, and probability for realization of nonpolarizing narrow-band filtering in two-dimensional subwavelength gratings was discussed. Using rigorous modal theory, its simulation results were consistent with those of guided-wave theory, in which location of resonant anomaly appear periodically and diffraction efficiency is very sensitive to not only incidence angle but also wavelength. At last, fabrication errors effecting diffractive properties were analysed, which, to some degree, are useful to concrete fabrication.

**Key words:** diffractive optics; rigorous modal theory; resonant anomaly; narrow-band filtering; nonpolarizing

## 1 引 言

窄带滤波器是指具有窄带、高衍射效率、低旁带

及体积很小的光学元件, 它们在光学集成(如半导体激光器的纵、横模的选择)、光纤通信(如解波分复用)等领域中将会有广泛的应用前景。传统滤波是在光学元件直接镀上一层薄膜以实现增透或增反, 若要实现窄带、高效率的滤波, 则要涂覆很多层, 而实际工艺中很难控制, 并且传统介质薄膜存在合适材料十分有限的缺点, 从而其材料选择受到一定的

\* 国家自然科学基金(60276018)、中国科学院光电所微细加工技术国家重点实验室资助课题。

E-mail: txgjly@sohu.com

收稿日期: 2003-03-10; 收到修改稿日期: 2003-06-02

限制<sup>[1]</sup>；利用亚波长一维各向同性光栅在共振位置产生共振异常可实现窄带滤波，但是由于亚波长光栅的 TE 波和 TM 波所支持的导波模不一致，导致 TE 波和 TM 波的共振位置的不一致<sup>[2,3]</sup>，因而很难实现其消偏振型窄带滤波。

然而，在很多实际的光学系统中，希望对 TE 波和 TM 波具有相同的角度敏感性和波长敏感性的窄带滤波器，即消偏振型窄带滤波器。根据共振异常产生的物理机制，要用光栅来实现消偏振型窄带滤波，则光栅对 TE 波和 TM 波所支持的导波模一致，这样才有可能实现在相同的共振位置产生共振异常，从而实现消偏振型窄带滤波<sup>[4]</sup>。

本文首先讨论了亚波长微结构产生共振异常的机理及存在条件，分析了二维亚波长光栅对 TE 波和 TM 波存在相同共振异常位置的可能性，然后利用严格模式理论<sup>[5~7]</sup>进行计算模拟，以获得为实现消偏振型窄带滤波器的结构参量，计算表明，二维亚波长光栅能够实现消偏振型窄带滤波，并讨论了由工艺误差对滤波特性所带来的影响。

## 2 共振异常

共振异常<sup>[2]</sup>是指亚波长光栅在一定的光栅参量条件和入射条件下出现的一种独特的衍射现象。在物理机制上可认为是外部传播的衍射场与受调制波导所支持的“泄漏波”之间的匹配耦合而导致衍射光场的突变，表现出窄带、高衍射效率、很强的波长敏感性和入射角度的敏感性。文献[2]用内全反射的几何光学概念阐述了共振异常产生的原因，发现了共振异常位置与基底厚度存在周期变化关系；由于 TE 波和 TM 波在光栅所支持的波导内全反射相位延迟不同，导致其产生共振异常位置不同。我们知道，对于介质平板波导，其波导内的导波模不需要外部的激励来维持，其能量不能泄漏于波导外部，其导波模须满足波导内全反射条件和横向驻波条件<sup>[8]</sup>，即

$$\Delta\phi_u + 2\Delta\phi + \Delta\phi_d = 2j\pi, \quad (j = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

(1) 式表示其导波在上、下分界面处因反射带来的相位延迟  $\Delta\phi_u$ 、 $\Delta\phi_d$  与在波导内传播所引起相位延迟  $2\Delta\phi$  之和须等于  $2\pi$  的整数倍，只有以上两个条件同时满足才会在波导中存在稳定的导波模。周期光栅可以被看成是受周期调制的平板波导，但与平板波导的不同点是：平板波导内的导波模稳定存在且不向外泄漏；而波导光栅内的导波模不能约束于其波导光栅内，最终要泄漏出去。光栅的存在实质上破坏

了波导的约束条件，使其导波模成为一个泄漏波，从而其泄漏模与光栅区的模式就会发生耦合，导致其共振异常的出现。对满足一定的参量条件下的亚波长光栅，其共振异常的出现要求光栅区内除了零级波还须有高级次子波存在，而入射和透射区只存在零级波衍射；并且衍射第  $m$  级次子波波矢在光栅上的投影分量  $k_{xm}/k_0$ ，与其光栅所支持的泄漏模的传播常数  $\beta$  匹配<sup>[4]</sup>，即

$$|k_{xm}|/k_0 = |\beta|, \quad (2)$$

其中  $k_{xm} = (k_0 \sin \theta + m\lambda/T)x$ ， $\theta$  与  $T$  分别表示入射角与光栅周期。由(1)式、(2)式可求出把光栅当成平板介质波导处理时导波传播常数  $\tilde{\beta} \approx \beta$ ，从而在  $\tilde{\beta}$  的附近可以搜索到光栅所支持的泄漏模传播常数  $\beta$ ，即共振异常产生的位置。对于结构参量确定的一维光栅，由于 TE 波和 TM 波的边界条件的不同，导致内反射相位延迟  $\Delta\phi_u$ 、 $\Delta\phi_d$  大小与光的偏振态有关，这决定了出现共振异常时对应泄漏模的传播常数  $\beta$  的不同，因而其共振异常的位置不同。由于二维光栅结构在  $x$ 、 $y$  两个方向上都受到周期性调制，其光栅区的 TE 波和 TM 波互相耦合，通过适当地调整其结构参量，使衍射场第  $(m, n)$  级次在不同偏振态时其波矢分量与其二维光栅所支持的泄漏模的传播常数同时匹配，这样实现了 TE 波和 TM 波在相同位置出现共振异常，从而达到了消偏振型窄带滤波。即

$$|k_{xm} + k_{ym}|/k_0 = |\beta|, \quad (3)$$

其中

$$k_{xm} = (k_0 \sin \theta \cos \phi + m\lambda/T_x)x,$$

$$k_{ym} = (k_0 \sin \theta \sin \phi + n\lambda/T_y)y,$$

$\theta$  与  $\phi$  分别表示入射角与方位角， $T_x$  与  $T_y$  分别表示二维光栅  $x$ 、 $y$  方向的周期。所以，对于二维光栅，可以利用(1)式、(3)式得到其光栅结构所支持的泄漏模的近似值，然后利用严格模式理论<sup>[5]</sup>对此光栅的衍射进行计算，可以得到其发生共振异常的确切位置。

## 3 计算模拟与分析

严格模式理论是广泛适用于光栅结构衍射计算的矢量方法，它不仅不受光栅模型、几何结构、介质性质影响而具有普遍适用性，而且其物理概念清晰、公式简洁、计算速度快，数值计算结果的稳定性和收敛性都很好<sup>[5]</sup>，这对于二维光栅的复杂计算是非常有用的。其基本思路是：首先对求解区域进行水平

分层,然后对每一分层求解麦克斯韦方程组。用傅里叶模展开来表示每一分层基本模式场的横向坐标 $(x,y)$ 解,就得到本征矩阵方程,求解此矩阵方程,得到其本征值与对应的本征矢,然后就得到了每一分层的基本模式场,其待定未知振幅系数利用电磁场边界条件和反射透射系数阵算法可以求得<sup>[9]</sup>,再由入射波的已知条件求出整个电磁场的分布。考虑到本文的篇幅,其详细理论分析此处不再累赘,请参看相关文献[5,9,10]。

图1为二维光栅结构图,周期为 $T_x, T_y$ ,基底和光栅区厚度分为 $d, h$ ,对应折射率分为 $n_s$ 与 $n_h, n_l$ ,其反射区与透射区介质为空气,光栅的填充系数为 $f_x = \Delta_x / T_x, f_y = \Delta_y / T_y$ 。入射层为空气,透射层折射率为1.47的介质。入射光与轴的夹角为 $45^\circ$ ,入射平面在 $xz$ 平面内,入射光波长为 $\lambda = 0.6872 \mu\text{m}$ 。

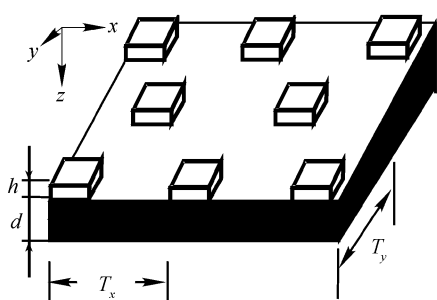


Fig. 1 Sketch of grating structure

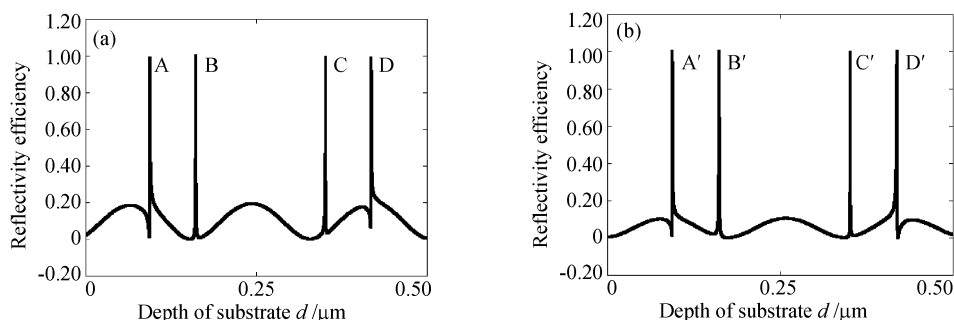


Fig. 2 Location of resonant anomalies. (a) TE wave; (b) TM wave

现在考察在基底厚度 $d = 0.3515 \mu\text{m}$ 时该光栅的衍射特性随入射波长的变化关系,如图3(a)、图3(b)所示,TE波和TM波的衍射效率具有相同的很强的波长敏感性,其半峰全宽(FWHM)小于1 nm,从而实现了消偏振型窄带滤波。同样,当改变光波入射角时,其衍射效率急剧变化,对不同的波长表现出很强的角度敏感性,如图4(a)、图4(b)所示(图中自左向右共振峰所对应波长 $\lambda = 0.6867 \mu\text{m}, 0.6872 \mu\text{m}, 0.6877 \mu\text{m}$ )。目前,全光通讯与光网络

其他参量为: $n = 2.1$ ,光栅区不同介质折射率为 $n_h = 1.56, n_l = 1$ ,厚度为 $h = 0.121 \mu\text{m}$ ,周期为 $T_x = 0.372 \mu\text{m}, T_y = 0.602 \mu\text{m}$ ,对应方向占空比系数为 $f_x = f_y = 0.465$ ,现考察光栅反射特性随基底厚度 $d$ 的变化情况。

利用严格模式理论进行计算,其计算模拟结果如图2所示,TE波和TM波的反射率曲线略有不同,但其共振异常的位置完全一致,从而实现消偏振型窄带滤波。由严格模式理论得到TE波和TM波发生共振异常时所对应的基底厚度 $d = 0.0945 \mu\text{m}, 0.1615 \mu\text{m}, 0.3515 \mu\text{m}, 0.4185 \mu\text{m}$ ;利用(1)式、(3)式进行计算,光栅衍射的第 $(-1, \pm 1)$ 级波矢分量与光栅所支持的波导模传播常数匹配而导致共振异常,其对应的基底厚度为 $d' = 0.0986 \mu\text{m}, 0.1700 \mu\text{m}, 0.3540 \mu\text{m}, 0.4280 \mu\text{m}$ ;可以看出,这两种计算所得结果相差很小,导致差异的原因是由于利用平板波导条件所支持的传播常数 $\beta$ 来替代由光栅所调制的波导所支持的泄漏模传播常数所致。另外,由于在二维光栅区的TE波和TM波互相耦合,对于入射的TE波或TM波偏振光,在光栅区会出现TE波和TM波,因TE波和TM波的边界条件不同,所以会出现两组间隔相同的共振异常位置,正是由于这种耦合,才会出现消偏振型窄带滤波。如图2中共振异常位置存在周期关系(即 $\Delta d_{AC} = \Delta d_{BD}$ 与 $\Delta d_{A'C'} = \Delta d_{B'D'}$ )。

是人们的研究热点,其目标是将微光学、微电子和微机械元件有机地集成在一块芯片上以实现器件的微型化、集成化和智能化。而通过对多自由度的光栅结构参量的适当设计,使该光栅元件具有很强的波长敏感性和角度敏感性,将其集成在光电子芯片上,用来实现消偏振窄带滤波或波长的密集选择(如光纤通信中的密集波分复用、固体激光器的纵模选择等),所以,该消偏振窄带滤波元件将可能会有广泛的应用前景。

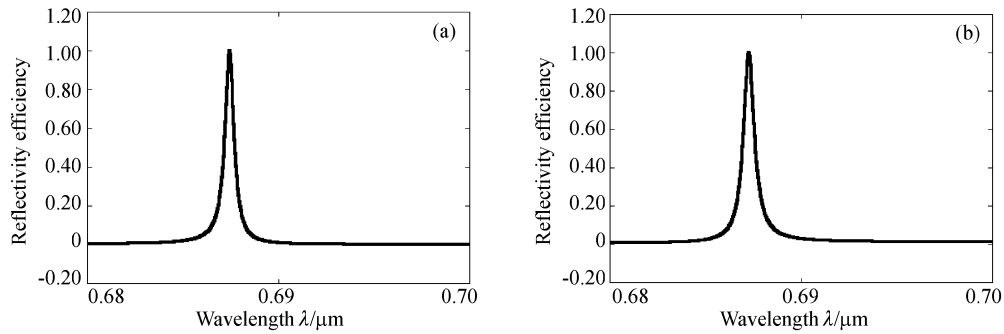


Fig. 3 Relationship between efficiency and wavelength ( $d=0.3512 \mu\text{m}$ ). (a) TE wave; (b) TM wave

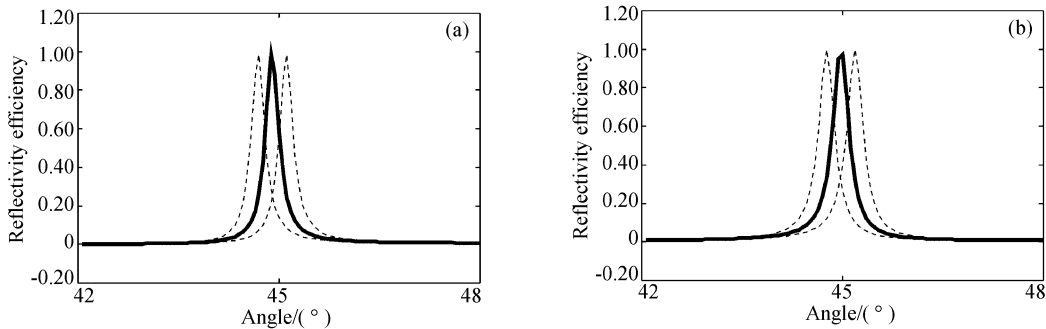


Fig. 4 Relationship between efficiency and incidence angle ( $\lambda=0.6872 \mu\text{m}$ ). (a) TE wave; (b) TM wave

### 4 工艺误差分析

在光学元件的制作工艺过程中,实际光学元件总是与所设计元件存在一定的差异,而这种差异对亚波长光学元件的衍射效率的影响是不能忽略的。如图 2 可知,在一定的参量条件下,共振峰的出现对基底厚度的要求甚为严格,这就使得制作极为困难,但是利用其共振峰对入射角度的敏感性,通过微调入射角以使该波长的共振峰位置漂移到实际光栅所对应的基底厚度,表 1 表示在不同入射角下四个共振峰位置所对应的基底厚度,其它参量与图 2 一致。

Table 1 Relationship between incidence angle and substrate thickness

Angle / (°)	Substrate thickness / $\mu\text{m}$			
41	0.0990	0.1670	0.3595	0.4275
44	0.0955	0.1625	0.3529	0.4205
45	0.0945	0.1615	0.3515	0.4185
46	0.0935	0.1605	0.3500	0.4170
49	0.0900	0.1560	0.3440	0.4099

现考察光栅结构的光栅槽深与占空比的工艺误差对衍射共振峰值的影响,结果如图 5、图 6 所示(其它参量同图 2),可以看出,其槽深误差对衍射共振峰值的影响不大,而占空比则影响很大。图 6 表示  $x$ 、 $y$  方向的占空比系数的同步变化对衍射效率

的影响。可以看出,其槽深误差对衍射共振峰值的影响不大,而占宽比的变化对其衍射效率影响很大。

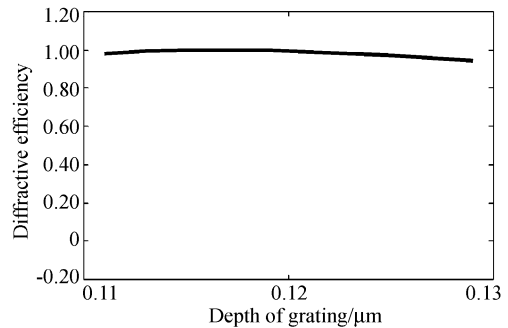


Fig. 5 Relationship between efficiency and depth of grating

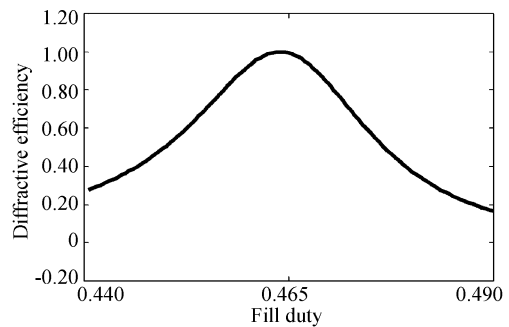


Fig. 6 Relationship between efficiency and fill duty

对于可见光区的亚波长微光学元件,由于其光栅周期小,因而对其占空比的工艺误差的严格控制是相当困难的,但是在工艺制作上不是没有可能,例

如可以在基片上通过薄膜生长依次得到基底层和光栅层膜,其厚度可由椭偏测量进行实时控制,其精度为纳米级,然后通过电子束刻蚀和干法刻蚀实现光栅图形。元件的参量如周期、线宽与槽深等可以通过原子力显微镜来测量,从而知道元件结构参量与所设计参量的差异。当然,对于使用波长为近、中红外区的光学元件,其制作难度将会大大降低。

**总结** 消偏振型窄带滤波器在光通讯领域将可能会有广泛的应用前景。本文讨论了消偏振型窄带滤波的物理机制及存在条件,分析了二维亚波长光栅对 TE 波和 TM 波有相同共振异常位置的可能性,然后利用严格模式理论进行计算模拟,其计算结果与导波理论所得结果相当接近,并讨论了工艺误差对滤波特性所带来的影响,为工艺具体制作提供了一定的指导。

#### 参 考 文 献

- 1 Tibuleac S, Magnusson R. Narrow-linewidth bandpass filters with diffractive thin-film layers. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9):584~586
- 2 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Qizhi *et al.*. The resonance peak theory of reflection guided-mode resonance filters. *Chin. J. Laser* (中国激光), 1999, **8**(3):313~321 (in Chinese)
- 3 Nie Ya, Wang Zhiheng, Fu Kexiang *et al.*. Polarizing beamsplitter based on the effects of birefringent and resonance anomaly. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(3):674~679
- 4 Zhou Chuanhong, Wang Lei, Nie Ya *et al.*. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric grating. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **51**(1):68~73 (in Chinese)
- 5 Tang Xiongui, Fu Kexiang, Wang Zhiheng *et al.*. Analysis of rigorous modal theory for arbitrary dielectric gratings made with anisotropic materials. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):73~78 (in Chinese)
- 6 Zeng Yangsu, Tang Xiongui, Fu Kexiang *et al.*. Vector diffractive analysis for two-dimensional relief gratings made with anisotropic medium. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1):96~100 (in Chinese)
- 7 Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Design consideration of two-dimensional anti-reflective subwavelength periodic gratings. *Optics and Precision Engineering* (光子和精密工程), 2002, **10**(6):537~541 (in Chinese)
- 8 Duguay M A, Kokubun Y, Koch T L. Antiresonant reflecting optical waveguide in SiO<sub>2</sub>-Si multilayer structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(1):13~15
- 9 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. A modal theory and recursion RTCM algorithm for gratings of deep grooves and arbitrary profile. *Science in China (A)* (中国科学), 1999, **42**(6):636~645 (in Chinese)
- 10 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Jing *et al.*. Fast processing of Fourier modal method for perpendicularly crossed surface-relief binary-period gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(2):236~241 (in Chinese)