

# 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性

王振华 吴永刚 桑 田 王占山 彭东功 焦宏飞 陈乃波 曹 鸿

(同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

**摘要** 将均质多层膜系设计中的缓冲层概念引入到反射导模共振滤光片的设计中,以研究缓冲层的增加对导模共振滤光片反射光谱特性的影响。设计并通过严格的耦合波理论计算了一、二、三、四通道导模共振反射滤光片光谱特性。在膜系设计中增加缓冲层后,随着其厚度的逐渐增加,反射光谱中依次出现二、三、四个窄带反射峰;缓冲层厚度为 796.35 nm 时,当滤光片光栅层占空比在 0.2~0.9 范围内、光栅深度在 100~200 nm 变化时,共振峰的位置、反射率峰值高度几乎不变,保持了很好的多通道滤光片特性。

**关键词** 薄膜光学; 导模共振; 光栅; 反射滤光片; 缓冲层

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1425

## Reflection Spectra Properties of Guided-Mode Resonance Filters with Buffer Layer

Wang Zhenhua Wu Yonggang Sang Tian Wang Zhanshan Peng Donggong  
Jiao Hongfei Chen Naibo Cao Hong

(*Precise Optical Engineering and Technical Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

**Abstract** Guided-mode resonance reflection filters are presented by adding a buffer layer in designing homogeneous thin-film reflection filters for studying the influence of buffer layer on reflection spectra of the guided-mode resonance filters. With the thickness increase of buffer layer, the reflection spectra of guided-mode resonance filters with one, two, three and four channels are calculated with the rigorous coupled-wave theory, two, three and four narrowband reflection peaks are found. When the buffer layer is chosen as 796.35 nm, the filling factor from 0.2 to 0.9, and the depth of grating between 100 nm and 200 nm, the resonant wavelength location and reflection ratio are nearly invariable, showing good characteristic of the filters.

**Key words** thin films; guided-mode resonance; grating; reflection filter; buffer layer

## 1 引 言

导模共振现象是由入射光与光栅所支持的泄漏模发生耦合而产生的异常现象,据此设计的导模共振滤光片由亚波长光栅层与均匀介质波导层所组成,在满足相位匹配条件的波长处产生高衍射效率的反射或者透射峰。在以往的研究中,通过将光栅层视为与其等效折射率相等的均质膜层<sup>[1~3]</sup>,利用简单的减反膜设计可以得到共振波长处的高反射率,并且实现旁通带的深度截止。采用折射率与光

栅层的等效折射率相等的均质波导层<sup>[4,5]</sup>,实现了布儒斯特角多通道反射特性。利用缓冲层的折射率等于已镀膜系与基底的等效折射率,在导纳图上以实轴上的一个点表示的特点,可以应用于均匀介质减反射膜系设计中。将缓冲层插入初始膜系,在不影响中心波长处的光谱特性的条件下,可以改善其他波长位置处的光谱特性<sup>[6,7]</sup>。本文提出将反射导模共振滤光片膜系中的光栅层视为与其等效折射率相等的均质层,在整个减反射膜系设计中增加一层

收稿日期: 2007-11-22; 收到修改稿日期: 2008-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(10576021)资助课题。

作者简介: 王振华(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: wzh4411255@163.com

导师简介: 吴永刚(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事低维光子晶体,真空紫外、极紫外、软 X 射线滤光薄膜和物理气相法制备高效能电磁波屏蔽织物等方面的研究。E-mail: ygwu@mail.tongji.edu.cn(通信联系人)。

缓冲层,通过改变缓冲层厚度等参量分析了缓冲层对导模共振滤光片反射特性的影响。

## 2 设计原理

多层膜导模共振滤光片的结构示意图如图 1 所示,  $\epsilon_c$ 、 $\epsilon_s$  分别为覆盖层和基底的相对介电常量,光栅层的厚度为  $d_g$ ,光栅周期为  $\Lambda$ ,光栅占空比为  $F$ ,所用材料的高、低折射率分别为  $n_h$  和  $n_l$ 。缓冲层的厚度为  $d_b$ ,折射率为  $n_b$ 。均质层的厚度为  $d_1, d_2, \dots$ ,折射率分别是  $n_1, n_2, \dots$ 。

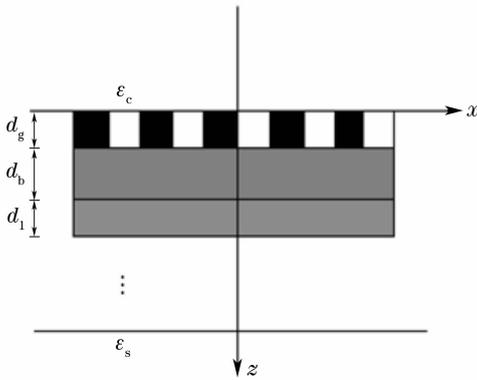


图 1 带有缓冲层的导模共振光栅滤光片

Fig. 1 Guided-mode resonance grating filter with a buffer layer

在光栅层范围内,周期性的相对介电常量可展成傅里叶级数的形式<sup>[8]</sup>。对于简单光栅结构,平均折射率为  $n = \sqrt{n_h^2 F + n_l^2 (1-F)}$ 。对于利用严格耦合波理论<sup>[9,12]</sup>的可靠性,本文对参考文献[1~4]中的结果进行了验证计算,比较光谱曲线结果是一致的。

## 3 计算结果及分析

图 1 中以横电(TE)偏振光正入射,可以通过严格的耦合波理论精确计算其反射光谱特性。在四层膜系结构中,光栅层位于第一层,层中材料的高、低折射率分别是  $n_h = 1.673, n_l = 1$ ,光栅层厚度  $d_g = 128.6 \text{ nm}$ ,光栅周期为  $433 \text{ nm}$ 。第三层、第四层分别为高、低折射率层,折射率分别为  $n_1 = 1.97, n_2 = 1.76$ ,厚度分别为  $d_1 = 80.7 \text{ nm}, d_2 = 100.9 \text{ nm}$ 。缓冲层位于第二层,  $n_b = 1.904$ ,其厚度分别取  $242.1 \text{ nm}, 524.55 \text{ nm}$  和  $796.35 \text{ nm}$ 。设计的中心波长为  $710 \text{ nm}$ 。膜系的反射率光谱曲线如图 2 所示。作为比较,图 3 为未插入缓冲层,或缓冲层厚度为零时膜系的反射率光谱曲线。由图 2 可见,增加缓冲层后,能得到多通道的反射导模共振滤光片;保持其他膜层参量不变,随着缓冲层厚度的增加,波导层支持的传播模式增加,并且在均质膜层设计中可以实现除中心波长外其他波长位置处的减反射效果,所以可以得到二、三、四通道的高反射峰。在计算过程中,设定缓冲层厚度变化的计算步长,当缓冲层厚度增加到某个值时,出现了新的反射峰,随着缓冲层厚度的继续增加,其峰值反射率也逐渐增大;继续增加缓冲层的厚度,又会出现新的反射峰,而且其峰值反射率同样随着缓冲层厚度的增加而逐渐增大。在反射光谱分别出现二、三、四通道时,再通过适当缩小计算步长,可寻找到合适的缓冲层厚度,获得光谱特性比较好的反射导模共振滤光片。但是当缓冲层厚度增加到一定程度时(例如  $d_b > 1.6 \mu\text{m}$ ),会引起反射峰边带反射率的升高,此时仅靠改变缓冲层厚度并不能得到很好的反射光谱曲线。

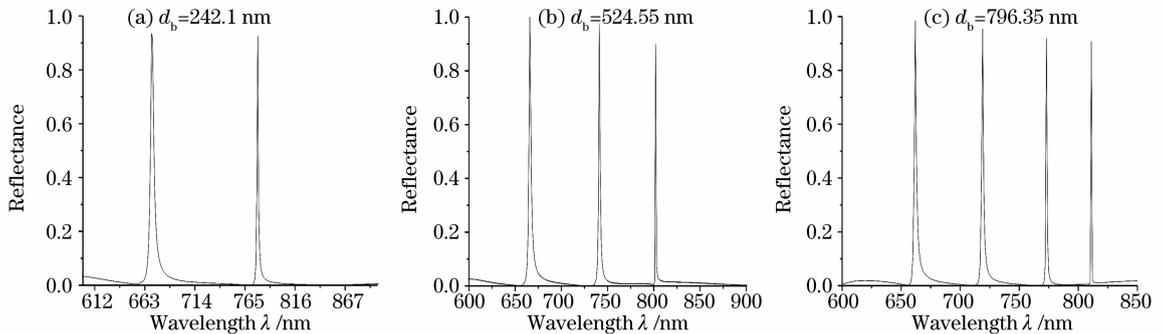


图 2 增加缓冲层后的反射导模共振滤光片反射光谱特性

Fig. 2 Reflectance of the reflected guided-mode resonance filters with a buffer layer

在图 2 给出的膜系结构中,在保持其他膜层参量不变时,增加缓冲层厚度,可得到多通道的反射导模共振滤光片。图 2(b)和图 3 中,保持其他各层参量不变而仅改变光栅层占空比参量,反射导模共振

滤光片的反射光谱变化如图 4 所示。

由图 4(a)可见,在增加缓冲层之后,光栅占空比在较大范围内(0.2~0.9)改变时,滤光片各反射共振峰位置偏移,第一个通道在  $665 \sim 671 \text{ nm}$  范

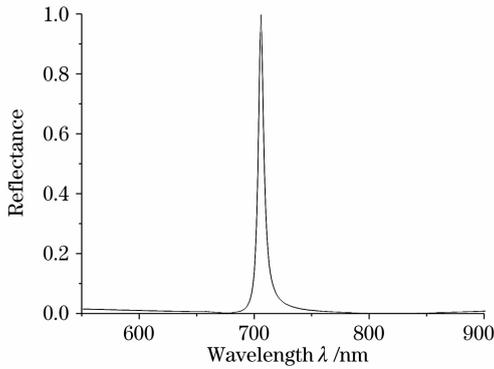


图 3 没有缓冲层时反射导模共振滤光片反射率

Fig. 3 Reflectance of the reflected guided-mode resonance filters without a buffer layer

围,第二个通道在 740~744 nm 范围,第三个通道仍在 802 nm 处没有偏移,光栅占空比影响各通道峰值偏移量分别为 6 nm、4 nm 和 0 nm。图 4 (b) 中

的反射光谱曲线峰位偏移由 703 nm 移动到 717 nm,偏移量为 14 nm。与图 4(a)相比,峰位偏移量大大增大。

图 5 为光栅层厚度由 100 nm 增加到 200 nm 时对应图 2(b)和图 3 结构的导模共振滤光片的光谱反射曲线。

由图 5(a)可见,在光栅深度由 100 nm 增加到 200 nm 时,含有缓冲层的反射导模滤光片的通道位置同样没有产生明显的改变,峰值高度随着光栅深度增加改变也很小;虽然在短波长峰值两边的低反射带也随着光栅层厚度的增加而逐渐增大,但在长波长峰值两边的低反射带随着光栅层厚度的增加而仅有很小的增加。从图 5(b)可见,当光栅层厚度变化时,共振峰位及峰值没有明显改变,但峰值两边低反射带随着光栅层厚度的增加而逐渐增大。

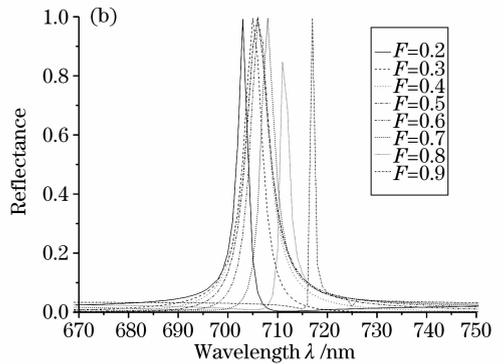
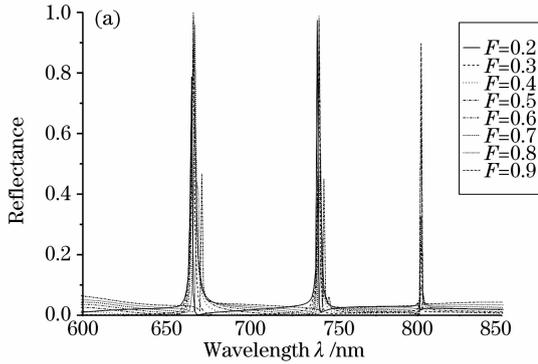


图 4 不同光栅占空比下导模共振滤光片的反射光谱。(a) 图 2(b)结构,(b) 图 3 结构

Fig. 4 Reflection spectra of a guided-mode resonance filter at different grating filling factors. (a) Fig. 2(b), (b) Fig. 3

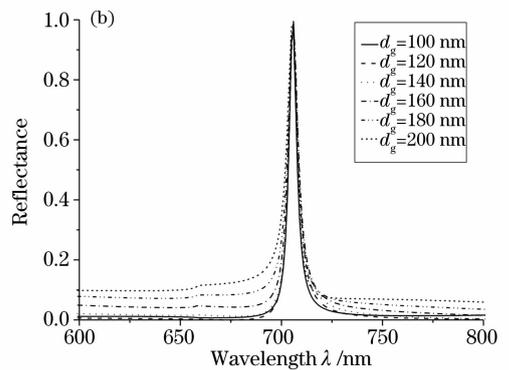
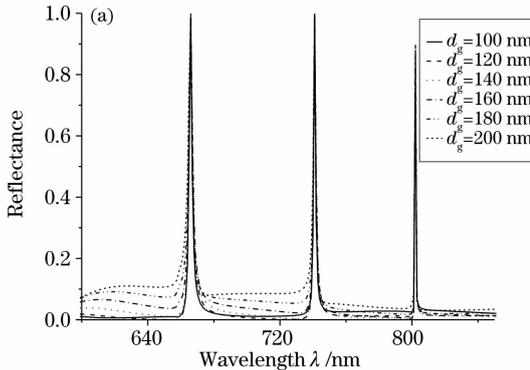


图 5 光栅深度不同时导模共振滤光片的反射光谱。(a) 图 2(b)结构,(b) 图 3 结构

Fig. 5 Reflection spectra of a guided-mode resonance filter at different grating depths. (a) Fig. 2(b), (b) Fig. 3

根据以上计算,在三层导模光栅结构中,当增加缓冲层之后可获得多通道的反射导模共振滤光片。当光栅占空比、光栅厚度在较大范围内有偏差时,对滤光片的光谱特性影响相对比较小,这样在刻蚀光栅过程中,滤光片对光栅刻蚀的容许误差有很大提

高,有利于光栅滤光片的制作<sup>[13~16]</sup>。

### 3 结 论

将均质多层膜系设计中的缓冲层概念引入到三层反射式导模共振滤光片的设计中,采用严格的耦

合波理论,计算了滤光片的反射光谱曲线。在膜系设计中增加缓冲层之后,获得了多通道反射的光谱特性,当光栅层占空比在 0.2~0.9 范围内、光栅深度在 100~200 nm 变化时,共振峰的位置、反射率峰值几乎不变,保持了很好的多通道反射滤光片特性。

### 参 考 文 献

- 1 Sang Tian, Wang Zhanshan, Wu Yonggang *et al.*. Reflected properties analysis of thin-film waveguide-grating filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1461~1465  
桑 田,王占山,吴永刚等. 薄膜波导光栅滤光片反射特性研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1461~1465
- 2 S. Tibuleac, R. Magnusson. Reflection and transmission guided-mode resonance filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1617~1626
- 3 S. S. Wang, R. Magnusson. Multilayer waveguide-grating filters[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2414~2420
- 4 Zhanshan Wang, Tian Sang, Jingtao Zhu *et al.*. Double-layer resonant Brewster filters consisting of a homogeneous layer and a grating with equal refractive index [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 24119-1~24119-3
- 5 Zhanshan Wang, Tian Sang, Jingtao Zhu *et al.*. Guided-mode resonance Brewster filters with multiple channels [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 25115-1~25115-3
- 6 Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters* [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2001. 144~152
- 7 Jacques Mouchart. Thin film optical coatings. 5: Buffer layer theory[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1): 72~75
- 8 M. G. Moharam, Eric B. Grann, Drew A. Pommet. Formulation for atable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 9 Thomas K. Gaylord, M. G. Moharam. Analysis and applications of optical diffraction by gratings[J]. *IEEE*, 1985, **73**(5): 894~937
- 10 Zhou Chuanhong, Wang Lei, Nie Ya *et al.*. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 68~73  
周传宏,王 磊,聂 娅等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(1): 68~73
- 11 Andrew Greenwell, Sakoolkan Boonruang, M. G. Moharam. Control of resonance separation over a wide spectral range in multiwavelength resonant grating filters[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(25): 6355~6361
- 12 Andrew Greenwell, Sakoolkan Boonruang, M. G. Moharam. *Effect of Loss or Gain on Guided Mode Resonant Devices* [M]. Optical Society of America, 2006
- 13 Zhan Liang, Li Chengfang, Zhang Fei. Diffractive characteristics of 1D metal gratings with subwavelength periodic structure[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **6**(33): 805~808  
张 亮,李承芳,张 飞. 一维金属亚波长周期光栅的衍射特性[J]. *中国激光*, 2006, **6**(33): 805~808
- 14 Kong Weijin, Liu Shijie, Shen Zicai *et al.*. Laser induced damage thresholds of multi-layer dielectric gratings and multi-layer dielectric mirrors[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **4**(33): 552~556  
孔伟金,刘世杰,沈自才等. 多层介质膜光栅和介质膜反射镜抗激光损伤阈值研究[J]. *中国激光*, 2006, **4**(33): 552~556
- 15 Liu Shijie, Kong Weijing, Shen Zicai *et al.*. Rigorous vector analysis of multi-layer dielectric film pulse compression gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 652~656  
刘世杰,孔伟金,沈自才等. 多层介质膜脉宽压缩光栅的严格矢量分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 652~656
- 16 Kong Weijin, Shao Jianda, Zhang Weili *et al.*. Design and character analysis of multi-layer dielectric film used in pulse compressed gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 701~706  
孔伟金,邵建达,张伟丽等. 脉宽压缩光栅用的多层膜设计和性能分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 701~706