

文章编号: 0253-2239(2009)03-0849-04

缓冲层对导模共振滤光片反射光谱截止特性的影响

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 提出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(GMR)滤光片的设计中,通过严格的耦合波理论精确计算,研究了加入缓冲层对改善导模共振滤光片反射峰边带截止深度及截止宽度的作用。双层导模共振滤光片结构中,入射光为 TE 偏振光时,设计增加 97.5 nm 缓冲层后,能够明显地展宽反射光谱范围。由原来的 192.4 nm 展宽到 345.6 nm,并且在 650~1250 nm 波长范围内的边带截止度均比不含缓冲层结构的要深。入射光为 TM 偏振光,以类似 TE 结构的滤光片在布儒斯特角入射时,在 700~1300 nm 波长范围内,较不含缓冲层的结构,也能够获得更宽的截止带反射光谱和更深的截止度。在提出的膜系结构中,经过优化膜系、选择合适的光栅参数等,可以使反射光谱具有更好的截止特性,同时保证设计的共振峰位置不变。

关键词 薄膜; 导模共振; 光栅; 缓冲层; 反射滤光片; 截止特性; 布儒斯特角

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0849

Impact of Buffer Layer on Cut-Off Properties of Reflection Spectra for Guided-Mode Resonance Filters

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 (GMR) reflection filter is presented by adding a buffer layer which is used in design of homogeneous thin-film reflection filters. We use the rigorous coupled-wave theory for studying the improvement of buffer layer to cut-off properties of reflection spectra. For the double layers structures under a TE-polarized plane wave illumination, the width of reflection spectra is broadened obviously from 192.4 nm to 345.6 nm by adding a buffer layer 97.5 nm, and the reflected sideband depressed more than the structure without buffer layer in the wavelength range of 650~1250 nm. Analogously, the similar structure under a TM-polarized plane wave illumination at the Brewster angle can obtain wider cut-off spectral range and lower reflectance than the one without buffer layer in the range of 700~1300 nm. By optimizing the structures and choosing the compatible parameters of grating, we can get better cut-off properties of reflection spectra and hold the line on the resonant wavelength.

Key words thin films; guided-mode resonance; grating; buffer layer; reflection filter; cut-off property; Brewster angle

1 引 言

导模共振现象是由入射光与光栅所支持的泄漏波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。通过将光栅层视为与其等效折

射率相等的均质膜层,利用简单的减反膜设计可以得到共振波长处的高反射率,并且实现共振峰边带的深度截止^[1~3]。采用折射率与光栅层的等效折射率相等的均质波导层^[4,5],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

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

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: wzh0821@live.cn

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)

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^[6,7]。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平面波导层,在整个减反射膜系设计中增加一层缓冲层,通过严格的耦合波计算,研究了缓冲层对改善导模共振滤光片反射光谱截止特性的作用。

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。图中 ϵ_c, ϵ_s 分别是覆盖层和基底的相对介电常数,光栅层的厚度是 d_g ,光栅周期是 Λ ,光栅占空比为 F ,所用材料的高、低折射率分别是 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, d_i ,折射率分别是 n_1, n_2, \dots, n_i 。

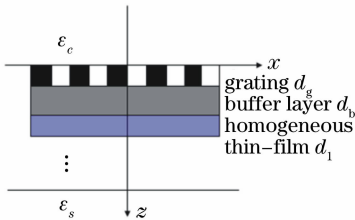


图 1 带缓冲层的导模共振光栅结构

Fig. 1 Schematic structure of a guided-mode resonance grating filter consisting of a buffer layer

在光栅层范围内,周期性的相对介电常数可以展成傅里叶级数的形式^[8]:

$$\epsilon(x) = \sum_p \epsilon_p \exp\left(j \frac{2\pi P}{\Lambda}\right),$$

式中 ϵ_p 为光栅层相对介电常数的第 p 级傅里叶级数系数项。对于简单光栅结构,分别以 TE, TM 偏振光入射时,平均折射率可以表示成

$$\begin{aligned} n_{\text{eff, TE}} &= \sqrt{n_h^2 F + n_l^2 (1 - F)}, \\ n_{\text{eff, TM}} &= \sqrt{n_h^2 n_l^2 / [n_l^2 F + n_h^2 (1 - F)]}, \end{aligned} \quad (1)$$

在设计过程中,可以通过调节光栅周期 Λ 和占空比 F 来获得需要的光栅层等效折射率及共振峰波长位置。将光栅层看作具有等效折射率 n_{eff} 的有周期调制扰动的平面波导,此时其传播常数变成复数, $\beta \rightarrow \tilde{\beta} = \beta_R + j\beta_I$, β_R 为传播常数, β_I 为衰减常数。对于弱调制光栅结构, β_R 近似等于具有相同折射率、没有调制的波导的传播常数 β 。当光栅第 m 级子波的波矢分量 k_{xm} 与光栅所支持的某一导波模传播常数接近时就会出现导模共振效应,即

$$\beta = k_{xm} = k_0 \left(\sin \theta - \frac{\lambda}{\Lambda} m \right), \quad (2)$$

式中 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $k_0 = 2\pi/\lambda$, θ 为入射角度。将均匀介质减反射膜系设计中采用的缓冲层引入到导模共振滤光片的设计中^[9],利用缓冲层来改善中心波长以外位置处的光谱特性,以求获得反射光谱更深的截止度。

3 计算结果及分析

图 1 中示出了带有缓冲层的导模共振膜系结构。当取 $i=1$ 的三层膜系结构,以 TE 偏振光正入射时,可以通过严格的耦合波理论精确计算其反射光谱特性。在三层膜系结构中,光栅层位于第一层。其中两种材料的高、低折射率分别是 $n_h = 1.78$ 和 $n_l = 1.38$,光栅层厚度 $d_g = 143.9$ nm,光栅周期为 564.4 nm。第三层为均匀折射率材料, $n_1 = 1.78$,厚度分别为 $d_1 = 119.4$ nm。缓冲层位于第二层, $n_b = 2.18$ 。 $\epsilon_c = 1.0$, $\epsilon_s = 2.11$,设计中心波长位于 850 nm。图 2 所示即是该结构反射光谱曲线,当插入厚度为 97.5 nm 的缓冲层之后,滤光片共振峰边带的反射率小于 1% 的波长宽度,由原来的 192.4 nm 展宽到 345.6 nm。此时的导模共振波长偏离原来设计的 850 nm,这是因为紧接光栅的均质层折射率由原来的 1.78 增加到 2.18,在保持光栅周期结构不变的同时,如仍满足(2)式的导模共振条件,则要求共振波长相应往长波方向偏移。通过调整膜系设计中光栅层的参数就可以将共振峰位置调整至原设计波长处,并且保持在 650~1250 nm 的波长范围内,优化后反射峰的边带截止度均比不含缓冲层的结构深。将图 2 采用的膜系结构中的光栅层分别用与其等效折射率相等的均质层代替,保证共振波长均为 850 nm 的反射光谱曲线如图 3。当不含缓冲层的

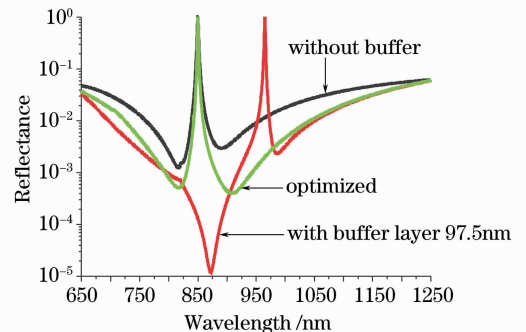


图 2 带缓冲层及不带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of the reflected guided-mode resonance filters with and without a buffer layer

导模共振滤光片光栅层用等效均质层代替后,对波长 850 nm 为减反射膜系结构;加入缓冲层后,可以看到,在保持设计波长处减反射的同时还降低了其他波长处的反射率。图 4 是在直接加入缓冲层的结构中利用此方法表示的共振峰的偏移。在导模共振滤光片设计中,利用缓冲层可以调节中心波长以外位置的反射光谱特性,从而获得更宽的反射截止带。通过调节光栅周期、占空比等因素可以进一步优化滤光片的光谱特性,获得不同波长处的导模共振反射峰。

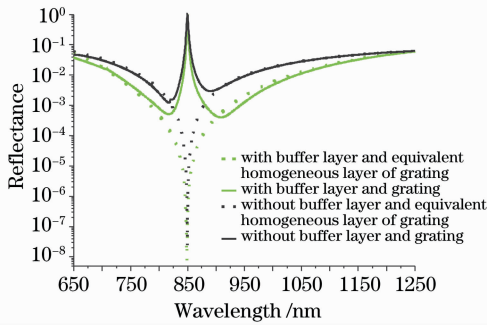


图 3 图 2 中滤光片对应的反射光谱。点划线表示的是光栅以等效均质层代替后带缓冲层及不带缓冲层时的光谱

Fig. 3 Reflection spectra of the reflected filters used in Fig. 2. The dot-and-dash curves show the response of the equivalent homogeneous layer of grating with and without a buffer layer, respectively

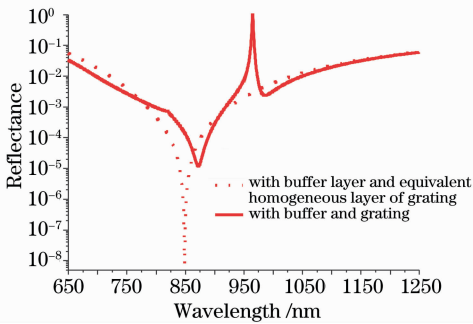


图 4 图 2 中含有 97.5 nm 缓冲层的反射滤光片结构。点划线表示的是光栅以等效均质层代替后的光谱

Fig. 4 Reflection spectra of the reflected filters used in Fig. 2 with buffer layer 97.5 nm. The dot-and-dash curve shows the response of the equivalent homogeneous layer of grating

图 5 表示的是在双层布儒斯特滤光片中间插入缓冲层的结构,以 TM 偏振光入射时计算得到的反射率随入射角度的变化,以此可以确定出布儒斯特角。当 TM 偏振光以该布儒斯特角入射时,再通过严格的耦合波理论精确计算滤光片的反射光谱曲

线。据(2)式加入缓冲层和改变入射角度均会对导模共振波长位置产生影响,因此同样可以通过调整光栅结构将共振峰位置调整到原设计波长。图 6 表示的即是含有缓冲层的滤光片经过膜系优化之后以及不含缓冲层的结构,分别以布儒斯特角 55.46°和 61.4°入射时的光谱曲线。可以看出,在 700~1300 nm 的波长范围内,加入缓冲层能极大地展宽反射峰边带的截止带宽,并且截止深度更深。

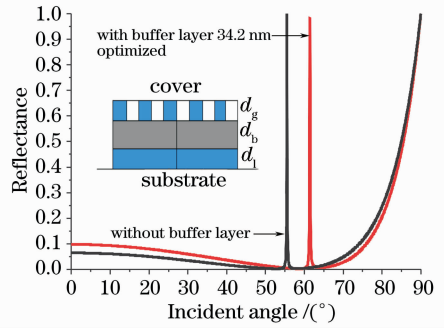


图 5 以 850 nm TM 偏振光入射时布儒斯特导模共振滤光片角度对应关系。滤光片参数为 $n_c = 1, n_s = 1.453, n_h = 1.78, n_l = 1.78, d_g = 50 \text{ nm}, d_1 = 269.3 \text{ nm}, f = 0.57, \Lambda = 361.5 \text{ nm}, n_b = 2.18$

Fig. 5 Angular response of a Brewster GMR filter for an incident TM-polarized wave at 850 nm wavelength. The parameters are $n_c = 1, n_s = 1.453, n_h = 1.78, n_l = 1.78, d_g = 50 \text{ nm}, d_1 = 269.3 \text{ nm}, f = 0.57, \Lambda = 361.5 \text{ nm}, n_b = 2.18$

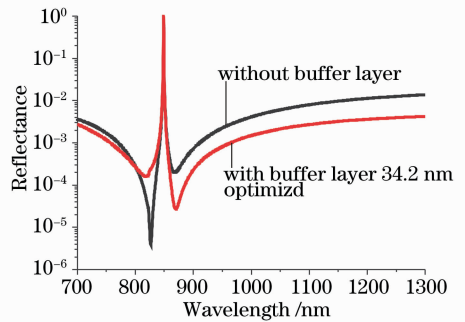


图 6 布儒斯特导模共振滤光片反射光谱。光栅周期为 354 nm;占空比为 0.4; d_1 为 261.9 nm;其他参数与图 3 中使用的相同

Fig. 6 Reflection spectra of a Brewster GMR filter. The period of grating is 354 nm; the filling factor is 0.4; $d_1 = 261.9 \text{ nm}$; the other parameters were the same as that used in Fig. 3

4 结 论

将均质多层膜系设计中的缓冲层概念引入到导模共振滤光片的设计中,能够明显地展宽反射光谱

截止范围。采用严格的耦合波理论计算了滤光片的反射光谱曲线^[10~16]。在本文给定的双层滤光片结构中,以 TE 光正入射时,加入缓冲层能使滤光片共振峰边带的反射率小于 1% 的波长宽度,由原来的 192.4 nm 展宽到 345.6 nm。相似的含有缓冲层的膜系结构,以 TM 光在布儒斯特角入射时,在 700~1300 nm 的波长范围内可以获得具有更宽、更深截止带的反射光谱,并且经过膜系优化,选择合适的光栅参数,可以保证共振峰位置不变。

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 H. A. Macleod. *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 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428
王振华,吴永刚,桑 田等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1425~1428
- 10 Thomas K. Gaylord, M. G. Moharam. Analysis and applications of optical diffraction by gratings[J]. *proc. IEEE*, 1985, **73**(5): 894~937
- 11 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
- 12 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
- 13 Andrew Greenwell, Sakoolkan Boonruang, M. G. Moharam. Effect of loss or gain on guided mode resonant devices [C]. *Nanophotonics (NANO)*, Uncasville, Connecticut, April 26, 2006
- 14 Zhan Liang, Li Chengfang, Zhang Fei. Diffractive characteristics of 1D metal gratings with subwavelength periodic structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 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
- 15 Kong Weijin, Liu Shijie, Shen Zicai *et al.*. Laser induced damage thresholds of multi-layer dielectric gratings and multi-layer dielectric mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 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, **33**(4): 552~556
- 16 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