

反射型导模共振滤波器设计

麻健勇^{1)2)†} 刘世杰¹⁾²⁾ 魏朝阳¹⁾²⁾ 许程¹⁾²⁾

晋云霞¹⁾ 赵元安¹⁾ 邵建达¹⁾ 范正修¹⁾

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

2)(中国科学院研究生院, 北京 100039)

(2007 年 4 月 14 日收到; 2007 年 5 月 23 日收到修改稿)

导模共振滤波器由于其高峰值反射率, 低旁带反射, 窄带以及带宽可控等优良特性引起了人们极大的关注, 采用亚波长光栅的导模共振效应可以实现传统基于高低折射率介质的多层膜滤波器所无法实现的特殊功能, 在弱调制模式下, 其共振带宽可以被压缩到零点几纳米, 但是由于介质表面和空气层的菲涅耳反射, 使得偏离或者远离共振区时的反射率偏高, 根据等效介质理论, 亚波长光栅在远离共振区可以被看为均匀的薄膜, 本文通过对导模共振光栅进行单层、双层以及三层抗反射设计, 有效的降低了导模共振光栅的旁带反射率, 从而在可见光波段获得了性能优良的共振滤波器。

关键词: 导模共振, 平面波导, 傅里叶模式理论, 窄带滤波

PACC: 4110H, 4225

1. 引言

采用共振异常特性^[1]的波导光栅具有独特的滤波特性, 其工作原理是在光栅的共振波长处, 波导所支持的导模(泄漏模)与高级次的传播波发生强烈的耦合, 从而在反射谱上出现一个急剧的跃变, 即产生一个共振峰, 特别地, 对于亚波长波导光栅可以实现 100% 的反射或者透射, 利用这一特性我们可以制作各种高效的窄带滤波器或者光开关^[2-4], 但是如果仅仅采用单层导模共振滤波器, 由于覆盖层与波导层折射率的不匹配将会导致在偏离或者远离共振区域时仍然具有较高的反射率, 这大大限制了导模共振光栅在一些对旁带反射率要求较高领域的应用, 例如在强激光系统的应用。

在偏离或者远离共振区时, 波导光栅可以看作均匀的薄膜, 因此可以将光栅的共振和薄膜的干涉结合起来, 采用薄膜光学中广泛采用的抗反射设计在不影响共振峰峰值反射的情况下, 有效地降低旁带的反射率, 从而设计出窄带, 低旁带, 线型对称的共振滤波器。本文首先采用多层平面介质波导理论, 将弱调制的光栅近似为平面波导, 通过求解波导的

本征方程获取共振峰的位置以及波导的关键参数, 然后采用矢量衍射理论——傅里叶模式理论^[5-7](FMM)严格求解共振峰的位置, 从而获得宽广谱反射率曲线。

2. 理论基础

将光栅看作被调制的平面波导, 采用波导理论分析光栅的衍射特性, 从而近似预测导模共振光栅的共振峰位置。图 1 是多层次平面波导光栅, 平面波以与 z 轴 θ 角入射, 覆盖层和基底层的折射率分别为 n_c , n_s , 并且有 $n_c < n_s$, 均为无限大各向同性介质, 该结构共有 M 层, 除一层为光栅层外, 其余各层均为均匀膜层。并且该结构中至少有一层(可以为光栅层, 也可以为均匀膜层)的折射率大于覆盖层和基底层的折射率。光栅层可被近似处理为一均匀膜层, 折射率为光栅层介质的等效折射率。根据文献[4], 对于 TE 偏振的入射波, 多层波导光栅的本征方程为

$$P_e A + P_e P_s B + C + P_s D = 0, \quad (1)$$

其中 A, B, C, D 分别为特征矩阵的四个分量:

† E-mail: mgy6000@163.com

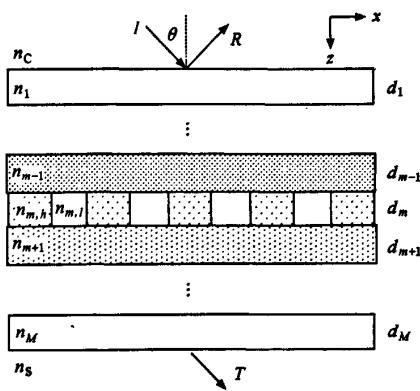


图 1 多层周期性平面波导光栅

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{m=1}^M \begin{bmatrix} T_{11,m} & T_{12,m} \\ T_{21,m} & T_{22,m} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

特征矩阵各个元素定义如下：

$$\begin{aligned} T_{11,m} &= \cos \gamma_m, \\ T_{12,m} &= (-j \sin \gamma_m) / P_m, \\ T_{21,m} &= -j p_m \sin \gamma_m, \\ T_{22,m} &= \cos \gamma_m, \end{aligned} \quad (3)$$

其中， j 是虚数单位， $\gamma_m = k_0 d_m P_m$ ， $k_0 = 2\pi/\lambda$ ， d_m 为第 m 层的厚度， P_m ， P_c ， P_s 分别为

$$\begin{aligned} P_m &= [n_m^2 - (\beta_m/k_0)^2]^{1/2}, \\ P_c &= [n_c^2 - (\beta_m/k_0)^2]^{1/2}, \\ P_s &= [n_s^2 - (\beta_m/k_0)^2]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中，第 m 层的模传播常数 β_m 对所有膜层而言为一固定值。对于 TM 波，其本征值方程与 TE 波的方程类似，只需将 P_m ， P_c ， P_s 替换为 TM 波的 $P_{m,TM}$ ， $P_{c,TM}$ ， $P_{s,TM}$ ，分别为

$$\begin{aligned} P_{m,TM} &= P_m/n_m^2, \\ P_{c,TM} &= P_c/n_c^2, \\ P_{s,TM} &= P_s/n_s^2, \end{aligned} \quad (5)$$

同时 γ_m 保持不变。共振时存在关系：

$$\beta_m = \beta_{i,s}/k_0 = n_m \sin \theta_m - i\lambda/\Lambda, \quad (6)$$

其中， i 是光栅的衍射级次 ($i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)， v 是第 m 层的导模级次 ($v = 0, 1, 2, \dots$)， $v = 0$ 对应于基模 (TE0 或 TM0)， Λ 是光栅的周期。等效折射率 n_{av} 是在亚波长量级和弱调制模式的二级近似表达式：

$$n_m = n_{m,av} = [fn_{m,h}^2 + (1-f)n_{m,l}^2]^{1/2} \quad TE, \quad (7)$$

$$n_m = n_{m,av} = [n_{m,h}^2 n_{m,l}^2 / fn_{m,l}^2]^{1/2} \quad TM, \quad (8)$$

光栅层由高低折射率介质 n_h 和 n_l 构成， $f = n_h/n_l$

是光栅层的填充系数。根据导模共振的必要条件，光栅层的等效折射率 n_{av} 满足：

$$\begin{aligned} \max(n_c, n_s) &< \beta_m \\ &< \max(n_{m,av}, m = 1, 2, 3, \dots), \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式说明至少有一层的折射率必须大于基底层和覆盖层折射率的最大值，而且这一层可以是调制的，也可以是非调制的。特别地，对于单层导模共振光栅，即 $m = 1$ ，并且这一层是光栅调制的，(1) 式简化为最常见的形式：

$$\begin{aligned} \tan(\kappa_{i,s} d) &= \kappa_{i,s} (\gamma_{i,s} + \delta_{i,s}) \\ &/ (\kappa_{i,s}^2 - \gamma_{i,s} \delta_{i,s}) \quad TE, \end{aligned} \quad (10)$$

其中，

$$\begin{aligned} \kappa_{i,s} &= (n_{av}^2 k_0^2 - \beta_{i,s}^2)^{1/2}, \\ \gamma_{i,s} &= (\beta_{i,s}^2 - n_c^2 k_0^2)^{1/2}, \\ \delta_{i,s} &= (\beta_{i,s}^2 - n_s^2 k_0^2)^{1/2}, \end{aligned}$$

TM 偏振波具有相似的表达式。

为了得到高质量的滤波器，导模共振光栅一般工作在亚波长情况下，即 $\lambda > \Lambda$ ， λ 为入射平面波的工作波长，此时无论是反射层（覆盖层）还是透射层（基底层）所有高级次的衍射级次都转化为倏逝波，仅存在直流分量（零级）。如果光栅调制度增强或者空间频率降低时，采用(1)式计算的偏差也随之增大，要精确的求解，就需要采用严格的矢量衍射理论进行处理。FMM 是被广泛采用的处理光栅衍射的矢量方法，这种方法的基本思路是首先对任意面型的光栅结构进行等宽或者等厚分层，然后在每一分层内对电磁场做傅里叶级数展开，在每一分层的上下界面匹配电磁场的边界条件，最后采用递推算法计算出远场的衍射效率或者近场分布，已有相当多的文献报道了这种方法，本文不再赘述，需要指出的是，在递推运算时，我们采用反射、透射系数矩阵算法 (RTCM)^[8-10]，这种方法不仅可以克服一般算法所存在的数值不稳的问题，而且物理概念清晰、公式简洁。

3. 反射型导模共振滤波器

3.1. 单层反射型滤波器

对于单层光栅结构，覆盖层和基底层的折射率分别取 $n_c = 1$ 和 $n_s = 1.52$ ，光栅层高低折射率分别为 $n_h = 2.1$ 和 $n_l = 1.9$ ，其厚度是一个很重要的参数，它决定了旁带反射率，反射谱线型等滤波器的特

性,如果光栅层的厚度取为 $1/2$ 波长的整数倍,即 $d = m\lambda/(2n_{av})$, $m = 1, 2, 3, \dots$,就可获得对称的光谱线型。如果 $m = 1, f = 0.5$,求解平面波导的本征方程(10)可得峰值波长 $\lambda \approx 512 \text{ nm}$, $d = 125 \text{ nm}$, $\Lambda = 300 \text{ nm}$,然后采用 FMM 可以精确的计算导模共振光栅的光谱响应曲线,如图 2 所示。

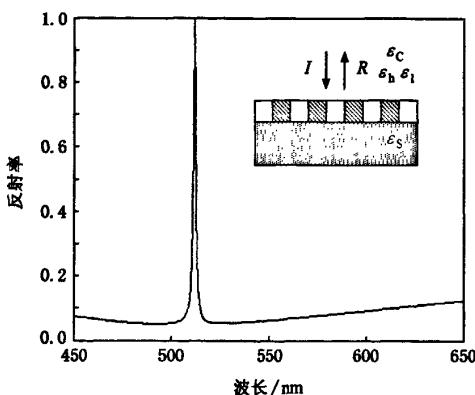


图 2 单层导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线 $n_c = 1, n_s = 1.52, n_b = 2.1, n_l = 1.9, \Lambda = 300 \text{ nm}, \theta = 0^\circ$

由于光栅周期小于共振波长,因此无论是透射层还是反射层只有零级,从图 2 可以看出,在可见光谱范围出现一个很窄的反射峰,理论上其反射效率达到 100%,峰值的带宽(FWHM)小于 1 nm,旁带的反射率虽然在 450—650 nm 的范围内总体上小于 10%,但反射率还是有点偏高,原因在于覆盖层和透射层折射率的不匹配造成的,如果取 $\epsilon_c = \epsilon_s$,则可以提高导模共振滤波器的性能,可见光波段的光谱响应曲线如图 3 所示,在 450—650 nm 的光谱范围内,旁带的反射率小于 5%,极大的改善了共振滤波

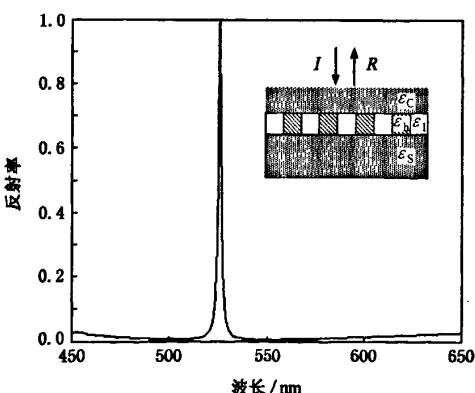


图 3 单层导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线 $n_c = 1.52, n_s = 1.52, n_b = 2.1, n_l = 1.9, \Lambda = 300 \text{ nm}, \theta = 0^\circ$

器的性能。光栅的周期性调制使得共振现象的发生成为可能,当倏逝波与波导所支持的导模的位相匹配时,引起反射场能量的重新分配,从而出现尖的共振峰。

3.2. 双层反射型滤波器

如果在单层导模共振滤波器上加一层薄膜,使之满足抗反射条件,就可以设计出旁带反射率更低,带宽更宽的共振滤波器。要设计双层导模共振滤波器,一般有两种方法,第一种方法是在光栅层和覆盖层之间加入一层低折射率的抗反射膜,根据薄膜光学的原理,该层的光学厚度和光栅的光学厚度满足抗反射条件,如果我们采用最简单的宽带抗反射膜 $\lambda/4-\lambda/2$ 结构,即 $d_1 = 100 \text{ nm}, d_2 = 134 \text{ nm}$,可以得到双层导模共振滤波器的反射光谱曲线,如图 4 所示,在可见光谱范围内,旁带保持较低的水平,相对于图 3 共振峰的带宽要窄的多,这是因为双层导模共振光栅的调制强度 $\epsilon = 0.02$ 小于单层波导光栅的调制强度,也可以利用这一点通过改变光栅的调制强度来改变其共振峰的带宽,进一步使弱调制波导向波导结构转化。

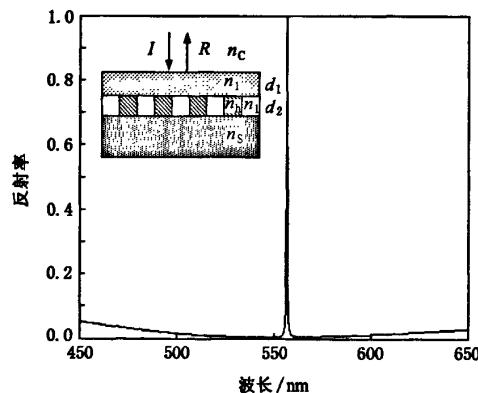


图 4 双层导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线 $n_c = 1, n_1 = 1.38, n_s = 1.52, n_b = 2.1, n_l = 2, \Lambda = 314 \text{ nm}, d_1 = 100 \text{ nm}, d_2 = 134 \text{ nm}, \theta = 0^\circ$

双层波导光栅的另一种实现方案是采用表面浮雕型光栅,在高折射率介质上直接制作光栅,这样光栅层与下面的薄膜层具有相同的折射率,根据薄膜光学的原理,各层的折射率需满足双层抗反射条件,即各层的光学厚度为 $1/4$ 中心波长,相对折射率满足式子: $n_2^2/n_{av}^2 = n_s/n_c$,其中 n_2 是光栅底层薄膜的折射率, n_{av} 是光栅层的平均折射率,如果取 $n_s = 1.52, n_c = 1.38, n_{lb} = 1.8, n_{ll} = 1.6, n_2 = 1.8$,那么折

射率满足抗反射条件: $n_2^2/n_{av}^2 = n_s/n_c \approx 1.1$, 共振峰值约为 572 nm, $\Lambda = 360$ nm, 各层的物理厚度选为 $d_1 = 84$ nm, $d_2 = 79.4$ nm(1/4 中心波长), 浮雕型光栅在可见光的光谱曲线如图 5 所示。

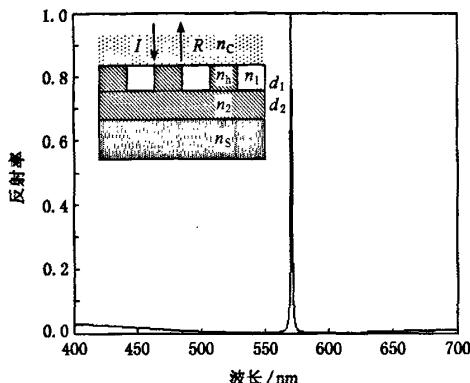


图 5 浮雕型导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线
 $n_c = 1.38$, $n_2 = 1.8$, $n_s = 1.52$, $n_b = 1.8$, $n_1 = 1.6$, $\Lambda = 360$ nm,
 $d_1 = 84$ nm, $d_2 = 79.4$ nm, $\theta = 0^\circ$

在 400—700 nm 的光谱范围内, 旁带的反射谱得到了有效的压缩, 反射率的最大值小于 5%, FWHM 是 1 nm, 此时光栅的调制强度 $\epsilon = 0.06$, 因此带宽非常窄, 而且是对称的, 如果选取另外一组参数, 使其折射率和厚度仍然满足双层抗反射条件, 只是增大光栅的调制强度, 抗反射条件 $n_2^2/n_{av}^2 = n_s/n_c \approx 2.3$, 依然满足, 每一层的物理厚度 $d_1 = 94$ nm, $d_2 = 75.5$ nm, 此时调制强度 $\epsilon = 0.29$ 远远大于弱调制波导结构, 如图 6 所示, 其共振峰得到了很大的展宽, FWHM 为 5.2 nm, 同时共振峰的对称性也被破坏, 与图 5 比较而言, 其旁带的反射率要高很多, 由

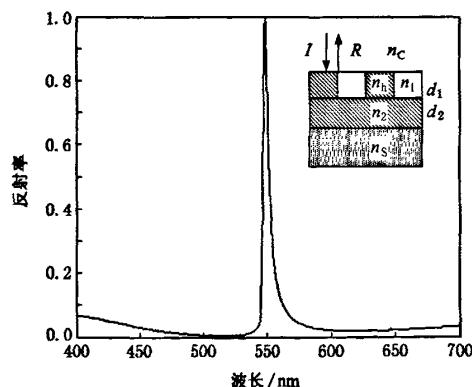


图 6 强调制浮雕型导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线
 $n_c = 1$, $n_2 = 1.8$, $n_s = 1.52$, $n_b = 1.8$, $n_1 = 1$, $\Lambda = 360$ nm,
 $d_1 = 94$ nm, $d_2 = 77.5$ nm, $\theta = 0^\circ$

此可见在强调制模式下, 抗反射膜层对旁带反射率的抑制进一步的减弱, 一般情况下, 为了使抗反射条件发挥有效的作用, 光栅的调制强度应该小于 0.1.

3.3. 三层反射型滤波器

在遵循抗反射条件的基础上再增加一层, 使其成为三层导模共振滤波器, 以进一步提高滤波器的性能: 降低旁带值, 拓宽反射带宽范围。

以图 4 所示的双层导模共振滤波器为基础, 在光栅层和基底层层之间加入一层介质, 从而构成三层导模共振滤波器, 各层的折射率满足三层宽带减反射膜的条件, 即 $(n_3/n_1)^2 = n_s n_c$, 光学厚度满足 $\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$ 结构, 图 7 是三层宽带导模共振滤波器的反射率的曲线。与两层共振滤波器比较, 旁带的反射率得到进一步的降低, 在 450—700 nm 的范围内, 反射率不超过 0.3%, 因此滤波器的性能得到进一步的提高, 其他参数不变, 仅仅改变光栅的调制强度, 使其由 0.02 增加到 0.07, 其反射率曲线如图 8 所示, 当调制强度增加时, 共振峰被展宽, 但是旁带的反射率依然维持在很低的水平, 由于调制强度小于 10%, 抗反射膜层抑制旁带的效果比较明显, 因此如果想有效的抑制旁带, 光栅层的调制强度必须维持在较低的水平。

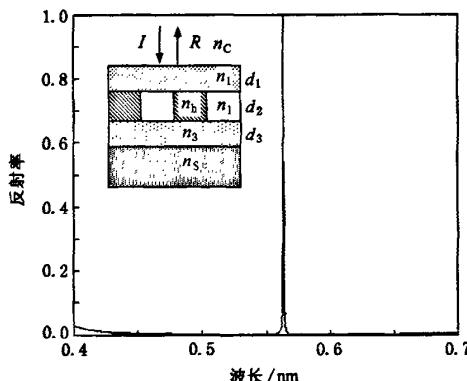


图 7 三层导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线
 $n_c = 1$, $n_1 = 1.38$, $n_s = 1.52$, $n_b = 2.1$, $n_1 = 2$, $n_3 = 1.7$, $\Lambda = 314$ nm, $d_1 = 100$ nm, $d_2 = 134$ nm, $d_3 = 80.9$ nm, $\theta = 0^\circ$

采用传统的多层介质薄膜的方式制作高性能的窄带反射型滤波器, 膜层的数目会大大增加, 由于薄膜材料之间物理、化学以及热学特性的不同, 将会影响膜层之间的附着力和稳定性, 尤其在膜层数目增加的情况下, 这种情况尤为明显, 因此采用较少的膜层结合光栅的导模共振特性制作高性能的滤波器具

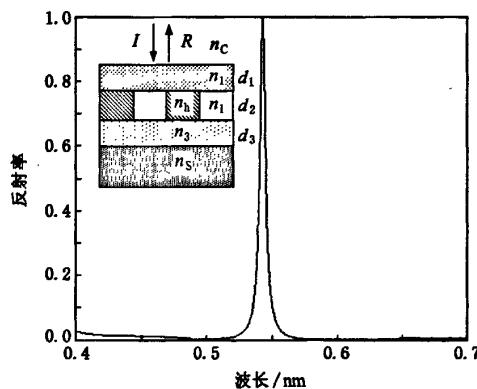


图8 三层导模共振光栅在可见光范围内的光谱响应曲线
 $n_c = 1, n_1 = 1.38, n_s = 1.52, n_2 = 2.1, n_3 = 1.8, n_4 = 1.7, \Delta = 314 \text{ nm}, d_1 = 100 \text{ nm}, d_2 = 134 \text{ nm}, d_3 = 80.9 \text{ nm}, \theta = 0^\circ$

有十分重要的实用价值,另外,在可见光的范围,透

明薄膜材料的折射率范围很窄,只有1.3—2.6左右,如果采用导模共振光栅,通过控制填充系数的方式调节折射率,可以大大增加折射率的取值范围,增加了设计的灵活性。

4. 结 论

基于多层平面波导和傅里叶模式理论,本文将光栅的导模共振效应和薄膜光学的抗反射设计方法结合起来,通过设计单层、双层以及三层导模共振滤波器,说明采用简单的抗反射膜,导模共振光栅的旁带反射率可以得到有效的抑制,带宽可以得到进一步的拓宽,另外,光栅的调制强度是限制导模共振光栅旁带反射的重要因素,这是由于随着调制强度的增加,不能简单的由光栅的等效折射率代替光栅的衍射行为。

- [1] Wood R W 1902 *Philos. Mag.* **4** 396
- [2] Sharon A, Rosenblatt D, Friesem A 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 2985
- [3] Tibuleac S, Magnusson R 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1617
- [4] Wang S S, Magnusson R 1995 *Appl. Opt.* **34** 2414
- [5] Li L F 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 2581
- [6] Kong W J, Liu S J, Shen J, Shen Z C, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1143 (in Chinese) [孔伟金、刘世杰、沈健、沈自才、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 1143]
- [7] Noponen E, Turunen J 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 2494
- [8] Fu K X, Wang Z H, Zhang D, Zhang J, Zhang Q Z 1999 *Sci. China A* **42** 636
- [9] Tang X G, Fu K X 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 774 (in Chinese) [唐雄贵、傅克祥 2002 光学学报 **22** 774]
- [10] Liu S J, Shen J, Shen Z C, Kong W J, Wei C Y, Jin Y X, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4588 (in Chinese) [刘世杰、沈健、沈自才、孔伟金、魏朝阳、晋云霞、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 4588]

Design of reflection resonant grating filters

Ma Jian-Yong^{1)2)†} Liu Shi-Jie¹⁾²⁾ Wei Chao-Yang¹⁾²⁾ Xu Cheng¹⁾²⁾
Jin Yun-Xia¹⁾ Zhao Yuan-An¹⁾ Shao Jian-Da¹⁾ Fan Zheng-Xiu¹⁾

1)(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China*)

2)(*Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(Received 14 April 2007; revised manuscript received 23 May 2007)

Abstract

Resonant grating filters based on grating abnormality have attracted much attention in recent years owing to their high peak reflectivity, low sideband reflection and controllable line width of central wavelength. Some special characteristics which are hard to be achieved by multilayer stack alternated with high and low refractive indices can be realized with guide-mode resonance of sub-wavelength gratings whose line width of central wavelength can be compressed to less than one nanometer under the condition of weak modulation of gratings. However, the sideband reflections near or far from the central wavelength are still somewhat high due to Fresnel reflection between air and material. According to the effective medium theory (EMT), sub-wavelength waveguide gratings can be viewed as thin films. In this paper, the sideband reflections of resonant grating filters are effectively reduced through antireflection design based on thin film theory and narrow band resonant filters are attained in the range of visible wavelength with good characteristics.

Keywords: waveguide resonance, planar waveguide, Fourier modal method, narrow-band filtering

PACC: 4110H, 4225

† E-mail: mjj6000@163.com

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>