

带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器设计与分析*

桑田¹⁾²⁾³⁾ 蔡托²⁾ 刘芳²⁾ 蔡绍洪^{3)†} 张大伟¹⁾

1) (上海理工大学, 上海市现代光学系统重点实验室, 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

2) (黔南民族师范学院, 物理与电子科学系, 都匀 558000)

3) (贵州财经大学, 贵州省经济系统仿真重点实验室, 贵阳 550004)

(2012年5月3日收到; 2012年8月25日收到修改稿)

提出带虚设层的抗反射导模共振滤波器结构及设计方法, 该方法适用于任意角度入射带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器设计与分析. 得到带虚设层的导模共振滤波器抗反射结构所满足的关系式. 指出在维持虚设层光学厚度不变的情况下, 可以通过不同选材, 在低反射旁带中实现等带宽不同波长的选择. 此外, 由于结构的抗反射特性在低角范围内具有较大的角度容差, 改变入射角, 可以实现滤波波长及光谱带宽在宽光谱范围内的准线性可调谐.

关键词: 虚设层, 抗反射, 导模共振, 滤波

PACS: 42.79.Ci, 42.25.Fx, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps/62.024215

1 引言

导模共振效应是波导光栅所支持的导模(泄漏模)受到光栅衍射级次的激发, 从而引起衍射光场能量的重新分配, 使光场相对于入射角或波长等物理量的微小变化产生突变^[1,2]. 基于导模共振效应的亚波长光栅是一种新型的衍射光学元件, 具有衍射效率高、共振波长和带宽可控以及在宽光谱范围内具有极高反射率等特性^[3]. 利用导模共振条件下的高反射率和窄带性质, 亚波长光栅主要用作反射滤波器^[4-6]、可调滤波器^[7,8]、偏振光学元件^[9,10]等. 近年来, 随着微纳科学技术的不断发展, 基于导模共振效应的亚波长光栅在电光器件^[11,12]、微机电系统^[13,14]、高反射器件^[15-17]、带通滤光^[18,19]等方面的研究引起了人们的重视.

为了提高导模共振滤波器的滤波特性, 通常采用抗反射结构^[20]. 但大部分抗反射导模共振滤波器的设计主要针对正入射情形. 1998年, Magnusson等^[21]指出利用布儒斯特效应可以实现导模共振抗反射滤波. 随后, Shin等^[22]指出利用虚设层可以进一步抑制反射旁带提高导模共振的抗反射特

性. 此外, 斜入射情形抗反射导模共振滤波器的设计方法也能实现良好的滤波性能^[23]. 但上述方法主要针对 TM 模入射导模共振在布儒斯特角附近滤波情形. 本文针对 TE 模入射情形, 提出带虚设层的抗反射导模共振滤波器结构及设计方法, 该方法适用于任意角度入射带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器设计与分析. 得到带虚设层的导模共振滤波器抗反射结构所满足的关系式. 结合设计方法, 对这类滤波器的相关特性开展分析探究.

2 结构与设计方法

图 1 为带虚设层的抗反射导模共振滤波器结构模型. 入射媒质和基底的折射率分别为 n_c 和 n_s , 光栅层由折射率分别为 n_H 和 n_L 的材料交替构成, 光栅深度为 d_g , 光栅填充系数为 f , 光栅周期为 Λ . 虚设层为设计波长的 $\lambda/2$ 光学厚度膜层, 同时为波导层, 其折射率与厚度分别为 n_a 和 d_a . 根据有效媒质理论^[24], 对于亚波长光栅结构, TE 模(电场矢量垂直入射面)入射情形, 光栅层的等效折射率可以

* 国家自然科学基金(批准号: 60908021, 11264005, 10647005, 11064010)、贵州省科学技术基金(批准号: 20112097)和贵州省教育厅自然科学基金项目(20111029)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: caish@mail.gzufe.edu.cn

表示为

$$n_{\text{eff}} = [n_{\text{H}}^2 f + n_{\text{L}}^2 (1-f)]^{1/2}. \quad (1)$$

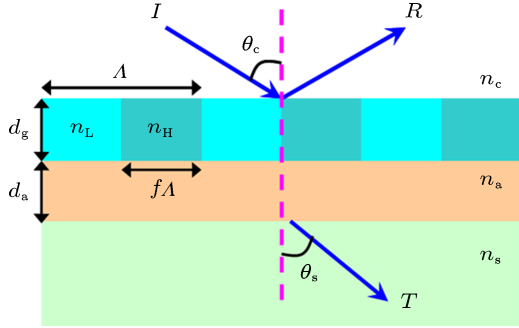


图1 带虚设层的抗反射导模共振滤波器结构模型

根据斯涅耳折射定律, 入射角 θ_c 与光栅层、虚

$$Y = \frac{C}{B} = \frac{\eta_s (\cos \delta_1 \cos \delta_2 - \eta_1 \sin \delta_1 \sin \delta_2 / \eta_2) + i(\eta_1 \sin \delta_1 \cos \delta_2 + \eta_2 \cos \delta_1 \sin \delta_2)}{\cos \delta_1 \cos \delta_2 - \eta_2 \sin \delta_1 \sin \delta_2 / \eta_1 + i\eta_s (\cos \delta_1 \sin \delta_2 / \eta_2 + \sin \delta_1 \cos \delta_2 / \eta_1)}. \quad (4)$$

双层膜系的反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_c - Y}{\eta_c + Y} \right) \left(\frac{\eta_c - Y}{\eta_c + Y} \right)^*, \quad (5)$$

其中, η_c 为入射媒质的光学导纳, $\eta_c = n_c \cos \theta_c$. 为了实现良好的抗反射导模共振滤波, 此时需要旁带的反射率最小, 即 $R = 0$.

对于任意厚度的光栅层, 将虚设层厚度 $d_a = \lambda / (2n_a \cos \theta_a)$ 代入 (5) 式及抗反射条件 $R = 0$, 得到

$$(\eta_c \eta_1 \cos \delta_1 - \eta_s \eta_1 \cos \delta_1)^2 + (\eta_c \eta_s \sin \delta_1 - \eta_1^2 \sin \delta_1)^2 = 0, \quad (6)$$

此时抗反射条件为 $\eta_c = \eta_1 = \eta_s$, 即 $n_c = n_{\text{eff}} = n_s$. 这要求入射媒质与基底折射率相等, 这在实际应用中存在一定难度.

假设光栅层为 $\lambda/4$ 光学厚度, 即 $d_g = \lambda / (4n_g \cos \theta_{\text{eff}})$, 此时带虚设层的导模共振滤波器抗反射条件为 $\eta_1^2 = \eta_c \eta_s$, 即

$$(n_{\text{eff}} \cos \theta_g)^2 = (n_c \cos \theta_c)(n_s \cos \theta_s). \quad (7)$$

将 (1) 式代入 (7) 式, 可得抗反射条件下填充系数所满足的解析式

$$f = \frac{(n_c \cos \theta_c)(n_s \cos \theta_s) + n_c^2 \sin^2 \theta_c - n_L^2}{n_{\text{H}}^2 - n_L^2}. \quad (8)$$

设层及基底中的折射角满足如下关系:

$$\begin{aligned} n_c \sin \theta_c &= n_{\text{eff}} \sin \theta_g \\ &= n_a \sin \theta_a = n_s \sin \theta_s, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, θ_g , θ_a 与 θ_s 分别代表光栅层、虚设层与基底中的折射角.

此时, 图 1 结构可以等效为一个双层膜系, 其特征矩阵方程为 [25]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & (i \sin \delta_1) / \eta_1 \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & (i \sin \delta_2) / \eta_2 \\ i \eta_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{\text{rms}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

这里, δ_1 与 δ_2 分别为光栅层与虚设层的相位, $\delta_1 = 2\pi d_g \eta_1 / \lambda$, $\delta_2 = 2\pi d_a \eta_2 / \lambda$. η_1 , η_2 与 η_s 分别为光栅层、虚设层与基底的光学导纳, $\eta_1 = n_{\text{eff}} \cos \theta_g$, $\eta_2 = n_a \cos \theta_a$, $\eta_s = n_s \cos \theta_s$. 其有效导纳为

可见, 带虚设层的导模共振滤波器抗反射条件与虚设层结构参数无关. 导模共振激发时, 传播常数 β_0 满足相位匹配条件, 即 [26]

$$\beta_0 = k_0 (n_c \sin \theta_c - m\lambda / \Lambda), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (9)$$

其中 m 为衍射级次, $k_0 = 2\pi / \lambda$.

根据平板波导理论 [27], 图 1 结构可等效为四层平板波导, 此时 β_0 可以通过其色散方程求出, 即

$$\begin{aligned} \kappa_1 d_a &= \nu\pi + \tan^{-1}(p_0 / \kappa_1) \\ &+ \tan^{-1}(p_2 / \kappa_1), \quad \nu = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$p_2 = \alpha_2 \tanh[\tanh^{-1}(p_3 / \alpha_2) + \alpha_2 d_g], \quad (11)$$

$$\kappa_1 = (k_0^2 n_a^2 - \beta_0^2)^{1/2}, \quad (12)$$

$$\alpha_2 = (\beta_0^2 - k_0^2 n_{\text{eff}}^2)^{1/2}, \quad (13)$$

$$p_0 = (\beta_0^2 - k_0^2 n_s^2)^{1/2}, \quad (14)$$

$$p_3 = (\beta_0^2 - k_0^2 n_c^2)^{1/2}, \quad (15)$$

这里 ν 为导模数. 联立 (8)—(15) 式可确定带虚设层抗反射结构导模共振滤波器的初始光栅参数.

3 数值计算与分析

对图 1 所示结构, 对给定选材, 假设 $n_c = n_L = 1.0$ (空气), $n_H = 1.47$ (SiO_2 ^[28]), $n_a = 2.05$ (SiN_x ^[29]), $n_s = 1.48$ (石英基底^[28]). 对 $\lambda/4$ 光学厚度的光栅层, 根据带虚设层导模共振滤波器的抗反射条件, 可得填充系数随入射角变化关系, 如图 2 所示. 可以看到, 当入射角 θ_c 不断增大时, 为了实现导模共振滤波器的抗反射效应, 光栅填充系数需不断减小. 值得注意的是, 在低角范围内 ($\theta_c < 30^\circ$), 填充系数对入射角的变化不敏感, 呈现出较大的角度容差, 这在实际中具有一定的应用价值.

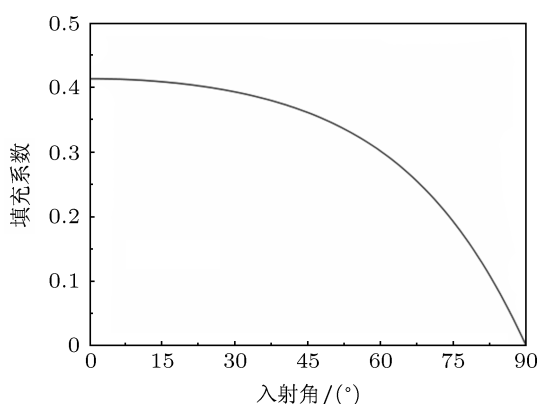


图 2 带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器填充系数与入射角关系

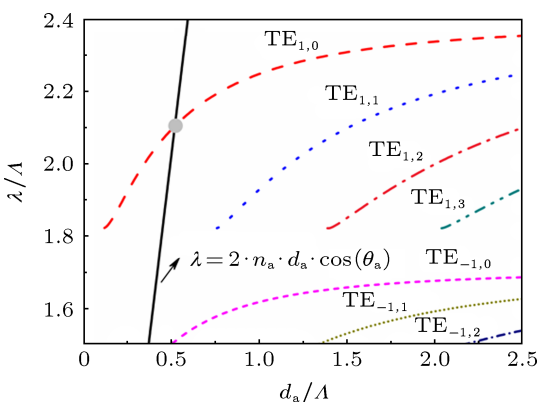


图 3 导模共振滤波器共振波长与虚设层厚度关系 (圆圈处为虚设层厚度对应的共振位置, 坐标值为 $d_a/\lambda = 0.5206$, $\lambda/\Lambda = 2.1046$)

假定入射角 $\theta_c = 20^\circ$, 抗反射条件下填充系数 $f = 0.4049$. 利用导模共振滤波器的色散关系, 可以进一步确定其他结构参数. 此时, 色散关系等效于求解形如 $f(d_a/\Lambda, \lambda/\Lambda, m, v) = 0$ 的超越方程. 图 3 为导模共振滤波器共振波长与虚设层厚度关系,

$\text{TE}_{m,v}$ 曲线表示衍射级次 m 与导模 v 之间的耦合, 对应导模共振的激发^[16]. 由于是斜入射, 导模共振的简并性被取消, 导致 ± 1 级衍射级次激发的导模共振分离. 圆圈处为虚设层厚度对应的共振位置, 坐标值为 $d_a/\lambda = 0.5206$, $\lambda/\Lambda = 2.1046$. 对设计波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 可得到其他参数为 $d_g = 333.12 \text{ nm}$, $d_a = 383.42 \text{ nm}$, $\Lambda = 736.49 \text{ nm}$.

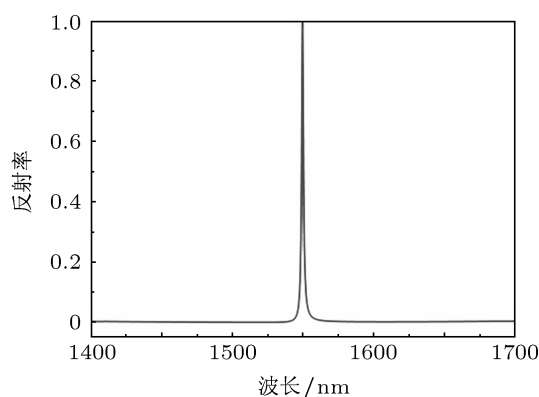


图 4 带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器反射光谱 (光栅参数为: $n_c = n_L = 1.0$, $n_H = 1.47$, $f = 0.4049$, $d_g = 333.12 \text{ nm}$, $\Lambda = 736.49 \text{ nm}$, $n_a = 2.05$, $d_a = 383.42 \text{ nm}$, $n_s = 1.48$, 入射角 $\theta_c = 20^\circ$)

对上述给定的结构参数, 采用严格的耦合波方法^[30]可以精确计算其滤波特性. 图 4 为给定参数带虚设层的抗反射导模共振滤波器的反射光谱. 可以看出, 由于采用抗反射结构, 导模共振的反射旁带被显著抑制. 在 1400–1700 nm 波长范围内, 旁带反射率均低于 4%. 共振峰出现在 1549.69 nm, 非常接近设计波长, 表明即便对表面浮雕光栅结构, 光栅调制较大 ($\Delta\epsilon = 1.161$), 光栅层也较深 ($d_g/\lambda = 0.2149$) 时, 本设计方法仍能给出可靠的初始结构参数. 这里, 滤波器反射峰形对称, 带宽极窄 $\Delta\lambda = 1.49 \text{ nm}$, 具有极高的品质因子 $Q = 1040.06$, 滤波器反射滤波性能优良. 通过微调光栅周期或入射角, 还可将共振峰精确移至设计波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处.

由于带虚设层导模共振滤波器抗反射条件与虚设层参数无关, 因而可维持虚设层 $\lambda/2$ 光学厚度不变而任意改变其厚度与折射率, 滤波器的抗反射特性不变, 这为实际选材带来便利. 图 5 为虚设层光学厚度不变时导模共振滤波器的滤波特性, 其他参数同图 4. 从图 5(a) 可见, 虚设层折射率增大导致共振峰红移, 而滤波器反射带宽与低反射旁带特性几乎不变, 滤波器滤波性能优良. 由于虚设层折射率与厚度的变化将改变导模共振滤波器共振波

长随虚设层厚度变化特性, 因而共振峰将随虚设层折射率的改变而迁移. 此外, 由于虚设层光学厚度不变, 其对导模的束缚变化甚小, 因而滤波器带宽大小几乎不变. 图 5(b) 为共振波长与虚设层厚度随虚设层折射率变化关系, 可以看到, 由于虚设层光学厚度不变, 其折射率的增大将导致其厚度的减小.

共振峰随虚设层折射率的改变呈准线性变化, 其斜率的线性拟合值为 461.86 nm. 因此, 通过不同的选材, 可在低反射旁带中实现等带宽不同波长的选择. 此外, 改变光栅周期, 可在维持反射带宽与低反射旁带几乎不变的情况下, 将不同选材的共振峰移至设计波长处.

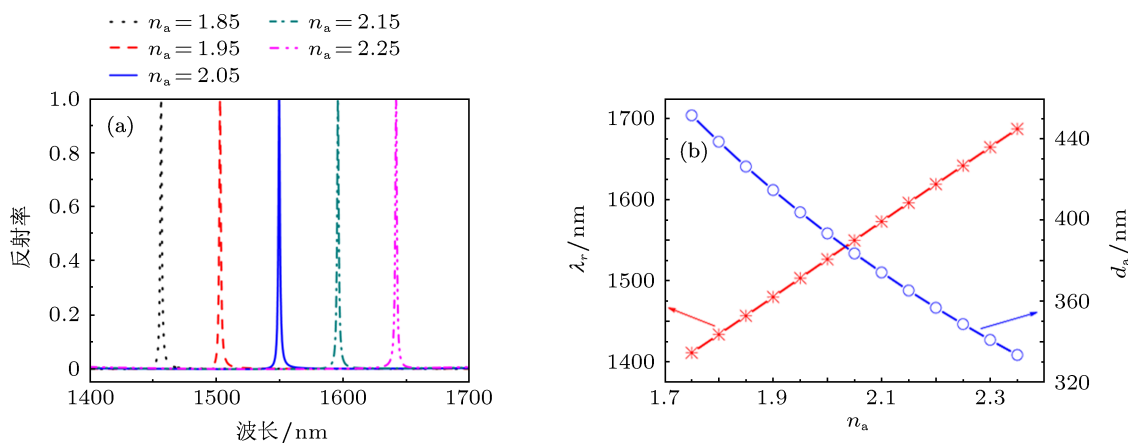


图 5 带虚设层的导模共振滤波器滤波特性 (虚设层光学厚度不变, 其他参数同图 4) (a) 反射光谱与虚设层折射率关系; (b) 共振波长与虚设层厚度随虚设层折射率变化关系

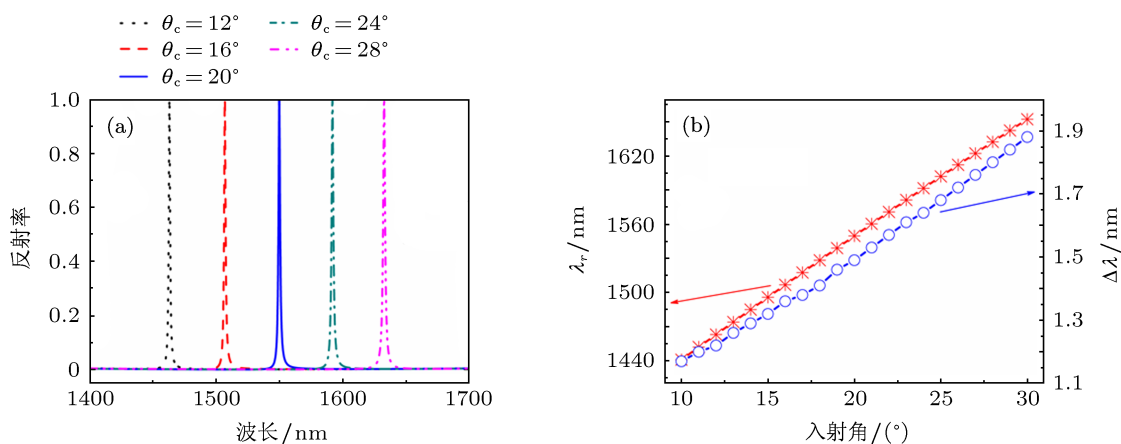


图 6 带虚设层的导模共振滤波器滤波特性 (其他参数同图 4) (a) 反射光谱与入射角关系; (b) 共振波长与反射带宽随入射角变化关系

前面已指出, 在低角范围内 ($\theta_c < 30^\circ$), 带虚设层导模共振滤波器填充系数对入射角的变化不敏感, 其抗反射特性具有较大的角度容差, 因而改变入射角, 可以实现滤波波长的选择. 图 6 为带虚设层导模共振滤波器的滤波特性, 其他参数同图 4. 从图 6(a) 可见, 共振峰随入射角的增大向长波方向移动, 在宽光谱范围内具有可调谐效应. 由 (9) 式可知, 当入射角作微小增加时, 泄漏模传播常数 β_0 可近似认为不变, 为满足相位匹配条件, 共振波长应增

大, 因而共振峰随入射角增大呈红移趋势. 此外, 反射带宽随入射角的增大略有增加, 这是由于改变入射角将影响入射光场与泄漏模之间的耦合, 进而影响光谱带宽大小. 图 6(b) 为共振波长与反射带宽随入射角变化关系, 可以看到, 共振波长与带宽大小随入射角的增大均呈准线性变化, 其斜率的线性拟合值分别为 10.59 nm/(°) 与 0.04 nm/(°), 二者均具有较好的准线性可调谐效应.

4 结 论

本文提出带虚设层的抗反射导模共振滤波器结构及设计方法,该方法适用于任意角度入射带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器设计与分析,且能给出可靠的初始参数.针对 TE 模入射,讨论任意光栅深度下带虚设层导模共振滤波器的抗反射条件,得到光栅层为 $\lambda/4$ 光学厚度填充系数所满

足的解析式.结合实际选材分析滤波器的抗反射滤波特性,指出在维持虚设层光学厚度不变的情况下,通过选材可以在低反射旁带中实现等带宽不同波长的选择.此外,由于结构的抗反射特性在低角范围内具有较大的角度容差,改变入射角,可以实现滤波波长及光谱带宽在宽光谱范围内的准线性可调谐.

- [1] Golubenko A, Svakhin A S, Sychugov V A, Tishchenko A V 1985 *Sov. J. Quantum Electron.* **15** 886
- [2] Popov E, Mashev L, Maestre D 1986 *Opt. Acta* **33** 607
- [3] Magnusson R, Wang S S 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 1022
- [4] Sun T Y, Ma J Y, Fu X Y, Wang J P, Jin Y X, Shao J D, Fan Z X 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 447
- [5] Ma J Y, Liu S J, Wei C Y, Jin Y X, Zhao Y A, Shao J D, Fan Z X 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4195 (in Chinese) [麻健勇, 刘世杰, 魏朝阳, 晋云霞, 赵元安, 邵建达, 范正修 2008 物理学报 **57** 4195]
- [6] Ye Y, Chen L S 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 2255 (in Chinese) [叶燕, 陈林森 2008 光学学报 **28** 2255]
- [7] Zhang D W, Wang Q, Zhu Y M, Huang Y S, Ni Z J, Zhuang S L 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 950 (in Chinese) [张大伟, 王琦, 朱亦鸣, 黄元申, 倪争技, 庄松林 2010 中国激光 **37** 950]
- [8] Song J Y, Feng S F, Zhang X P, Liu H M, Song Y R 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 6542 (in Chinese) [宋骄阳, 冯胜飞, 张新平, 刘红梅, 宋晏蓉 2009 物理学报 **58** 6542]
- [9] Fu X Y, Yi K, Shao J D, Fan Z X 2009 *Opt. Lett.* **34** 124
- [10] Guo C C, Ye W M, Yuan X D, Zeng C, Ji J R 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 2690 (in Chinese) [郭楚才, 叶卫民, 袁晓东, 曾淳, 季家镛 2010 光学学报 **30** 2690]
- [11] Katchalski T, Levy-Yurista G, Friesem A A, Martin G, Hierle R, Zyss J 2005 *Opt. Express* **13** 4645
- [12] Wang Q, Zhang D W, Huang Y S, Ni Z J, Chen J B, Zhong Y W, Zhuang S L 2010 *Opt. Lett.* **35** 1236
- [13] Sang T, Cai T, Cai S H, Wang Z S 2011 *J. Opt.* **13** 125706
- [14] Wang Z H, Wu Y G, Ling L J, Xia Z H, Chen N B, Liu R C 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0505002 (in Chinese) [王振华, 吴永刚, 凌磊婕, 夏子矣, 陈乃波, 刘仁臣 2011 光学学报 **31** 0505002]
- [15] Wang J P, Jin Y X, Ma J Y, Shao J D, Fan Z X 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 3119 (in Chinese) [汪剑鹏, 晋云霞, 麻健勇, 邵建达, 范正修 2010 物理学报 **59** 3119]
- [16] Sang T, Wang L, Ji S Y, Chen H, Wang Z S 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 559
- [17] Zhou Z P, Wu H M, Feng J B, Hou J, Yi H X, Wang X J 2010 *J. Nanophoton* **4** 041001
- [18] Sang T, Wang Z S, Zhou X, Cai S H 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 071107
- [19] Wang Z H, Wu Y G, Xia Z H, Liu R C, Lv G, Wu H Y, Tang P L 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 080501
- [20] Mizutani A, Kikuta H, Iwata K, Toyota H 2002 *J. Opt. Soc. Am. A* **19** 1346
- [21] Magnusson R, Shin D, Liu Z S 1998 *Opt. Lett.* **23** 612
- [22] Shin D, Liu Z S, Magnusson R 2002 *Opt. Lett.* **27** 1288
- [23] Sang T, Zhao H, Cai S H, Wang Z S 2012 *Opt. Commun.* **285** 258
- [24] Rytov S M 1956 *Sov. Phys. JETP* **2** 466
- [25] Macleod H A 2001 *Thin-film optical filter (3rd ed)* (London: IOP) P41
- [26] Wang S S, Magnusson R 1993 *Appl. Opt.* **32** 2606
- [27] Cao Z Q 2007 *Waveguide optics* (Beijing: Science Press) P40 (in Chinese) [曹庄琪 2007 导波光学 (北京: 科学出版社) 第 40 页]
- [28] Mateus C F R, Huang M C Y, Deng Y F, Neureuther A R, Hasnain C J C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 518
- [29] Wu M L, Hsu C L, Liu Y C, Wang C M, Chang J Y 2006 *Opt. Lett.* **31** 3333
- [30] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, Gaylord T K 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1068

Design and analysis of guided-mode resonance filter containing an absentee layer with an antireflective surface*

Sang Tian¹⁾²⁾³⁾ Cai Tuo²⁾ Liu Fang²⁾ Cai Shao-Hong^{3)†} Zhang Da-Wei¹⁾

1) (School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Shanghai Key Lab of Modern Optical Systems, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2) (Department of Physics and Electronic Science, Qiannan Normal College for Nationalities, Duyun 558000)

3) (Guizhou Key Laboratory of Economic System Simulation, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550004)

(Received 3 May 2012; revised manuscript received 25 August 2012)

Abstract

A design approach to guided-mode resonance filter containing an absentee layer with an antireflective surface is presented. This design approach is reliable for the design and analysis of guided-mode resonance filter containing an absentee layer with an antireflective surface at an arbitrary incidence. The antireflection condition of guided-mode resonance filter containing an absentee layer is obtained. For the absentee layer with a fixed optical thickness, the resonance wavelength can be selected, with the low-sideband features and the filter linewidth kept almost the same by using different materials. In addition, the resonance wavelength and its linewidth can be tuned almost linearly in a broad spectral band as the incident angle is varied due to high angular tolerance of the antireflection features of the filter in the range of small angle.

Keywords: absentee layer, antireflection, guided-mode resonance, filtering

PACS: 42.79.Ci 42.25.Fx 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps/62.024215

* Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 60908021, 11264005, 10647005 and 11064010), the Science and Technology Foundation of Guizhou Province (Grant. No. 20112097), and the Natural Science Foundation of the Department of Education of Guizhou Province (Grant. No. 2011029).

† Corresponding author. E-mail: caish@mail.gzife.edu.cn