

文章编号: 1001-3806(2010)01-0071-04

导模共振滤光片的研究进展

王琦, 张大伟, 陈家璧, 庄松林*

(上海理工大学 光学工程与电子信息学院, 上海 200093)

摘要: 通过对导模共振滤光片的研究与发展的介绍, 总结了其机理、优异特性及应用领域, 重点介绍的是亚波长导模共振滤光片的单层、双层和3层结构的设计。归纳了它的制作原理, 提出了制作难点和关键技术。结果表明, 导模共振滤波器具备高峰值反射率, 低旁带反射, 窄带以及带宽可控等优良特性, 具有重要的研究意义和应用价值。

关键词: 光学器件; 导模共振; 光栅; 波导

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.020

Recent progress of guided-mode resonance filters

WANG Qi, ZHANG Da-wei, CHEN Jia-bi, ZHUANG Song-lin

(College of Optics and Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The latest development of guided-mode resonance filters was reviewed. Then its mechanics, advantages and application fields were summarized. The design of single, double and triple-layer of sub-wavelength guided-mode resonance filters was described in detail. After discussing its fabrication principle, the fabrication difficulties and key technology of guided-mode resonance filters were presented. It is concluded that guided-mode resonance filters exhibit excellent characteristics with high reflectance, low sidebands, narrow band and controllable spectral width, which have important research meanings and application value.

Key words: optical devices; guided-mode resonance; grating; wave-guided

引言

导模共振滤光片(guided-mode resonant filter, GMRF)在理论和实际运用上都具有重要的物理意义和研究价值。它通常表现为介质光栅的反射异常, 即当入射波的波长、入射角或光栅结构参量作微小变化时, 光栅衍射传播能量发生剧烈变化的现象。导模共振现象自从 MAGNUSSON 于 1992 年提出以来^[1], 就一直是光学领域关注的热点^[2]。受到关注主要有 3 个方面的原因。首先, 它提供了一个新的制作新型功能光学元件的方向, 即薄膜技术、导波技术和衍射光学结合的方向。其次, 它利用的是光波在亚波长波导光栅中传播时产生导模共振的物理现象^[3]。与传统薄膜滤光片

相比, GMRF 具有以下优点^[4-5]: 极窄的带宽, 理论上可以达到 0.01 nm; 极高的反射, 理论上可以达到 100%; 相对简单的结构, 很少的层数如单层或 2 至 3 层; 不严格的薄膜层厚度误差。第 3 个原因是它优秀的光学特性, 如共振波长和带宽可控、线形对称以及在很宽的波长范围内旁带值被抑制得很低的特性使其具有非常重要的应用价值。为获得旁带衍射效率被抑制得很低的共振现象, 可以采用传统薄膜理论中的抗反射设计获得高质量的单层或多层反射型滤光片。例如 CUNNINGHAM, LIN 等人报道了该类滤光片在光学生物传感器方面的应用。当反应分子在滤光片表面吸附时, 改变了入射光的光程差而使得 GMRF 的共振峰出现漂移, 通过对漂移情况进行监测, 可获得反应分子的信息^[6-7]。此外, 利用导模共振全反射对光栅参量和入射条件极为敏感的性质, 可以设计制作高反元件, 窄带滤波及偏振分离如激光器反射镜、偏振片、光学调制器等光学器件^[8]。

1 GMRF 发展及导模共振机理的介绍

1902 年 WOOD 在研究金属反射光栅时, 首次从实验上发现了不能用普通光栅理论解释光强突变的“伍

基金项目: 上海市科委科研计划资助项目(07DZ22026; 08DZ2272800; 08ZR1415400); 上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL0801)

作者简介: 王琦(1984-), 女, 博士研究生, 现从事微纳米光学的研究。

* 通讯联系人。E-mail: slzhuangx@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-11-14; 收到修改稿日期: 2009-02-13

德异常”现象。直至1965年 HESSEL 和 OLINER 提出数学模型解释了“伍德异常”。他们指出共有 Rayleigh 型和共振型两大基本类型。Rayleigh 型指在衍射场的闪耀角上,某一衍射级次的传播波变成了倏逝波或者某一级次的倏逝波出现成为传播波而导致衍射能量在其它传播级次上的重新分布。共振型归因于入射波与该光栅结构所支持的表面模式的耦合。当由周期结构所产生的某一衍射波与波导所支持的某一泄漏模位相匹配时,共振现象就发生了。周期性的结构能够提供位相匹配的可能性,甚至是在垂直入射的条件下。对于高空间频率的波导光栅,即亚波长的波导光栅,所有的高级次衍射波均为倏逝波,这样就使得所有的能量均在0级反射波与0级透射波之间的转换成为可能。因此,在共振波长处,尖锐的反射峰出现,这就是共振型滤光片基本原理。图1所示的是亚波长导模共振光栅结构。其中, d_1 和 d_2 分别为光栅层和波导层的厚

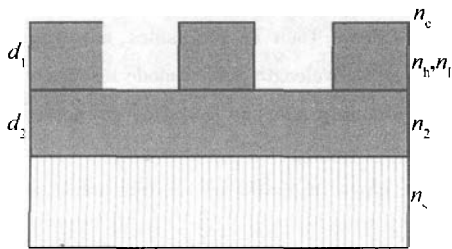


图1 亚波长 GMRF 结构

度, n_c 为光栅层上覆盖层的折射率,光栅层折射为 n_h, n_1 ,波导层折射率为 n_2 ,衬底折射率为 n_s 。

国内外学者对光栅导模共振的理论研究已做了很多工作。HESSEL 和 OLINER 通过对反射光栅导模共振的研究,指出导模共振效应是由于入射光与光栅所支持的泄漏模耦合产生。ZHOU 等人^[9]用严格耦合波方法验证了薄膜波导光栅为导模共振的原因,通过分析波导的导波模式,正确估计出弱调制介质光栅导模共振的位置,采用减反设计得到对称、低旁带的窄带共振峰值。SHARON 等人^[10]研究了导模共振的稳定性。他们大都借助严格耦合波理论来分析光栅的传播特性,靠数值计算来搜索共振位置。QIN 等人^[11]将弱调制介质光栅等效为平板波导,通过考虑到高阶子波在光栅中的光程和非涅耳相移,对导模共振的物理机制作了较清晰阐释。PENG 和 BRUNDRETT 用严格耦合波法对光栅波导的齐次问题进行求解,研究了导模共振的性质。FU 等人研究导模共振随基底厚度的变化,并用全内反射的方法确定出共振峰与基底厚度的关系^[12-13]。WANG 与 MAGNUSSON 用等效折射率的方法,把介质光栅看为平板波导,根据耦合波理论,用光学特征矩阵法^[14]求解波导中的导模,从而确定薄膜波导光栅的共振位置。

2 GMRF 的设计及分类

分析导模共振效应最基本方法是严格耦合波理论,但其严格的电磁场光栅模型使得计算量很大。如果将重点放在分析其物理过程和得到近似结果之上,就可以运用简单的模型。对于亚波长波导光栅,由于光栅层可近似为一等效均匀膜层,利用薄膜理论,可以解决非共振的情况。处理共振情况时,可结合使用衍射理论和平面介质波导理论。平面波导模型能提供简单的本征值方程,也能够较准确地预测共振峰的大致位置。

周期性波导光栅的衍射特性可以在预期的波段上获得接近100%的反射率。若结合具有抗反射特性的膜层,通过合理地选择光栅结构的参量,可得到窄带的或宽带滤波,并且在较宽的波长范围内具有任意低的、对称的旁带。

导模共振峰具有反射率高、线宽窄等特点,将光栅结构近似为等效均匀膜层,根据薄膜干涉效应,波导光栅将在很宽的光谱范围内表现为一条低值的反射率曲线,所以,波导光栅非常适合设计制作窄带反射型滤光片。利用单层或结合抗反射设计的多层周期性波导光栅结构可实现旁带抑制的窄带反射型滤波。常见类型在后面介绍。

2.1 单层波导滤光片

单层波导光栅结构可视为一个高性能的带阻滤光片,在工作波长处的反射率可达100%,并且具有对称性。这类滤光片的工作原理可归于波导光栅的共振与薄膜干涉的共同作用。在共振波长处,传播波与倏逝波发生强烈的耦合,在反射谱上产生急剧的跃变。旁带折射率由等效的均匀薄膜的性质得到。图2为单层 GMRF 可见光范围的反射率曲线。入射波垂直入射,

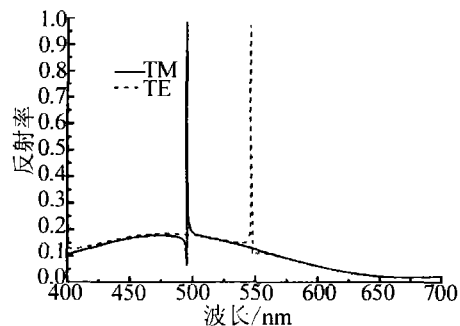


图2 TE 和 TM 偏振正入射时单层 GMRF 的反射率曲线

图中的虚实线分别为横向电场波(transverse electrical, TE)和横向磁场波(transverse magnetic, TM)偏振时反射率。GMRF 结构参量为: $n_c = 1.0, n_h = 2.1, n_1 = 2, n_s = 1.48$;占空比 $f = 0.5$;光栅厚度 $d = 134\text{nm}$,光栅周期 $\Lambda = 314\text{nm}$ 。

单层光栅的光栅层平均介电常数大于表面层和基底层的介电常数,以形成波导结构,从而有利于共振的产生。单层波导光栅在特定的波长处能使入射波全反射,并且具有对称的线形。但是,由于表面层和基底层的折射率不同,引起菲涅耳反射,因此旁带反射率不可能降得很低。利用薄膜的抗反射设计原理,可以控制旁带的反射率而获得线形对称、旁带反射率低的高效率反射型滤光片。单层膜结构的波导光栅具有设计简单,反射率特性曲线分布良好的优点,但灵活性差,减反射条件(即只有入射媒介的介电常数与基片的介电常数相等时,旁带反射率为0)在实际制作中难以做到。

2.2 双层共振滤光片

在单层结构上镀一层薄膜,使之满足抗反射条件就能够大大地提高滤光片的性能。若采用传统的多层均匀薄膜结构来设计制作高性能的窄带反射型滤光片,将会面临很多困难。首先,透明的薄膜材料的折射率在可见光区域范围很窄。其次,薄膜材料间的物理、化学及热学性质各不相同,这会影响到膜层间的附着程度和稳定性。因此,采用较少层数的、具有波导光栅的结构来设计制作滤光片是理想的选择。图3所示的是浮雕型双层GMRF在TE垂直入射使可见光范围内的反射率曲线。 d_1 和 d_2 分别为光栅层和波导层的厚度,

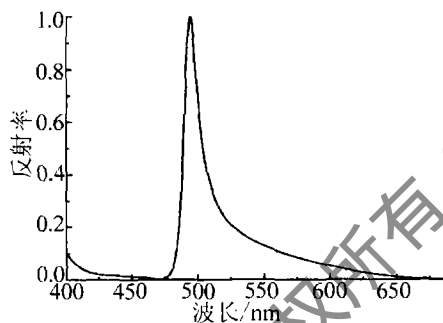


图3 TE偏振正入射时浮雕型双层GMRF的反射率曲线

GMRF结构参数为: $n_b = 1.8, n_1 = 1, n_c = 1.0, n_s = 1.52, n_2 = 1.8, f = 0.5, d_1 = 90\text{nm}, d_2 = 60\text{nm}, \Lambda = 340\text{nm}$ 。

2.3 3层共振滤光片

3层共振滤光片可以进一步提高滤光片的性能:降低旁带值,拓宽低反射率区域。旁带得到很好的抑制是3层结构优于2层结构的一个关键点。

图4是3层GMRF在TE垂直入射时可见光范围内的反射率曲线。GMRF结构参数为: $n_{2h} = 2.1, n_{2l} = 2, n_c = 1.0, n_s = 1.52, n_1 = 1.38, n_3 = 1.62, f = 0.5$,各层对应厚度为 $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$ (波长为650nm),周期分别为370nm,390nm,410nm。从图中可见,3层结构的GMRF的另一个优点是共振峰的位置会随着光栅周期值的变化而发生线性偏移,同时其它参量保持不变。

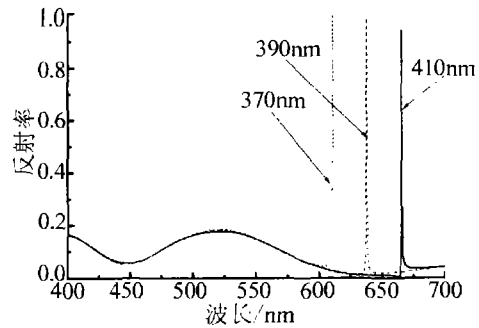


图4 TE偏振正入射时3层GMRF的不同光栅周期的反射率曲线(370nm,390nm,410nm)

3 GMRF的制备进展

GMRF制备的研究很少,特别是国内还尚无报道。SAMUEL给出了GMRF设计中控制光谱曲线的方法;DING提出运用双共振效应来设计带通滤光片,把GMRF的应用从反射拓展到透射^[15];WANG提出运用减反膜结构来得到对称光谱曲线和低旁带滤光片的思想^[16];WANG等人^[17-18]提出通过改变光栅槽深和波导层厚度等参量设计多通道GMRF的方法。LIU等人^[19]在镀有 HfO_2 的石英玻璃衬底上制作浮雕型光栅得到高反射的双层GMRF,在波长为860nm时反射峰值达到98%,正入射时带宽为2.2nm,且旁带值较低。MASHEV和POPOV^[20]利用 Ag^+ 制作波状波导结构在可见波段获得35%的衍射效率。AVRUTSKY^[21]采用同样的结构设计在 CaF_2 衬底上用 $\text{SiO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5$ 为波导将其衍射效率提高到70%。GALE等人^[22]制作的滤光片在可见波段,TE偏振得到95%的共振峰值。TIBULEAC^[23]进行了导模共振透射滤光片的光波波段实验验证。PRIAMBODO通过湿法和干法蚀刻,将光致抗蚀剂的光栅层结构信息转移到了 SiO_2 膜层,得到了带宽是1.2nm,峰值衍射效率是93%的GMRF^[24]。DOBBS进行渐变波长共振滤光片光子晶体的制备研究,提供了一种共振峰波长连续渐变器件的设计思想,所制备器件的旁带衍射效率大于20%^[25]。2007年,

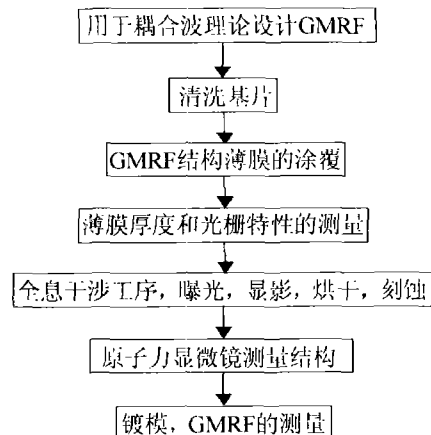


图5 GMRF制作的流程图

LEE用聚合物制备GMRF的方法,得到了共振峰值波长接近90%的GMRF^[26]。这些实验结果证明了利用合理的理论模型就能够设计出高性能的共振滤光片。制备GMRF流程图如图5所示。

得到高衍射效率的GMRF的制作关键是减小散射和材料的损耗,且GMRF应具有耐久性,热和机械稳定性等良好的光学特性。因此,滤光片应由具有低损耗,在不同的温度和应力条件下都相对稳定的材料如SiO₂,TaO₅,Y₂O₃等电介质材料制作。增加反-反射吸收层是减少光学噪声来提高反射效率的一种有效方法。

制备亚波长GMRF主要难点是对制备误差要求严格。光栅周期误差和光栅槽的槽深误差都可引起共振峰位置的漂移。其它计算结果也表明,共振峰位置与光栅的周期是线性正比关系。另外,如果光栅在反应蚀刻过程中出现光栅槽深误差,例如过蚀刻现象会导致共振峰的漂移,这些漂移对于带宽为纳米量级的亚波长GMRF造成的误差是巨大的。

波导光栅层的厚度是一个重要参量,它决定旁带反射率、反射谱线形及频谱范围等反射特性。若光栅层的光学厚度取为半波长的整数倍,就可获得具有对称性反射型共振滤光片。光栅周期的变化不会改变光栅层的平均折射率,因此它对线宽及旁带高的影响很小。但周期会严重影响共振峰的位置,周期制作精度要求也是制作的一个难点。

4 GMRF与其它滤光片的比较及应用

基于GMRF结构简单、层数少、高共振峰、窄带宽和低旁带等优异特性,大多数复杂系统如光开关、多路复用器或多路分离器等都开始把它作为一个基本组件。相比传统滤光片如F-P滤光片、Bragg光纤光栅,共振型滤光片有很多优势。表1中给出GMRF,F-P滤光片和Bragg光纤光栅滤光片性能差异。

表1 3种滤光片性能比较

| | GMRF | F-P滤光片 | Bragg光纤光栅滤光片 |
|---------|------|--------|--------------|
| 带宽/nm | 0.3 | <0.5 | 0.1 |
| 层数 | 2 | >20 | N/A* |
| 厚度 | <1μm | >8μm | 长度>1mm |
| 插入损耗/dB | <0.5 | >1 | 0.1 |

*注:N为厚度,A为周期。

这3种滤光片都具有优异的性能,但三者的结构复杂性和简洁性不一样。F-P滤光片要获得很窄的带宽,必须有很多层。GMRF结构具有独特的滤光特性,可用于设计制作窄带滤光片和波长选择反射片。GMRF的线宽可以通过调整结构参量(光栅占空比,光

栅厚度等)加以控制。为获得旁带衍射效率被抑制得很低的共振现象,可以采用传统薄膜理论中的抗反射设计,而得到高质量的单层或多层反射型滤光片,利用导模共振效应也可设计制作透过型带通滤光片,这种滤光片利用导模共振效应在工作波长处获得高的透过率,并利用具有高反射性多层膜结构达到对旁带的抑制效果。由于周期性波导结构独特的共振特性,使其具有广阔的应用潜力,运用这类结构可以设计制作窄带反射型(带阻)滤光片和透过型(带通)滤光片,激光片共振腔中的偏振镜和波长选择元件,以及波分复用装置等。

5 小 结

综述了GMRF研究的最新进展。重点介绍的是亚波长GMRF。归纳了它的制作原理,亚波长GMRF优良的光学特性使其具有重要的应用价值,但器件的制备水平限制了应用。提出了亚波长GMRF的制备研究的价值、关键制作技术和制作难点。

参 考 文 献

- [1] MAGNUSSON R, WANG S S. New principle for optical filters [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(9): 1022-1024.
- [2] WU M L, HSU C L, LAN H C. Authentication labels based on guided-mode resonant filters [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(12): 1614-1616.
- [3] HESSEL A, OLINER A. A new theory of wood's anomalies on optical gratings [J]. *Appl Opt*, 1965, 4(10): 1275-1299.
- [4] SAMUEL T T, MICHAEL M G. Controlling the spectral response in guided-mode resonance filter design [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(16): 3225-3233.
- [5] TIBULEAC S, MAGNUSSON R. Reflection and transmission guided-mode resonance filters [J]. *J O S A*, 1997, A14(7): 1617-1626.
- [6] CUNNINGHAM B, LI P, LIN B, et al. Colorimetric resonant reflection as a direct biochemical assay technique [J]. *Sensors and Actuators*, 2002, B81(2/3): 316-328.
- [7] LIN B, LI P, CUNNINGHAM B. A label-free biosensor-based cell attachment assay for characterization of cell surface molecules [J]. *Sensors and Actuators*, 2006, B114(1): 559-564.
- [8] DING Y, MAGNUSSON R. Resonant leaky-mode spectral-band engineering and device applications [J]. *Optical Express*, 2004, 12(23): 5661-5674.
- [9] ZHOU Ch H, WANG L, NIE Y, et al. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(1): 68-73 (in Chinese).
- [10] SHARON A, ROSENBLAT T D, FRIESEM A. Resonant grating-waveguide structure for visible and near infrared radiation [J]. *J O S A*, 1997, A14(11): 2895-2993.
- [11] QIN T, SHI J P, CHEN X N. Research on guided-mode resonance for sub-wavelength waveguide grating [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, 31(2): 25-27 (in Chinese).
- [12] FU K X, WANG Z H, ZHANG D Y. Modal theory and RTCM recursion algorithm of great depth random section plane shape grating [J]. *Science in China*, 1999, A29(4): 356-365 (in Chinese).

(下转第144页)

时,光强是最大的。随着湍流的加强,各种阶数拉盖尔-高斯光束光强衰减都很明显,但真空中衰减相对较慢(见图4)。

3 小 结

从 Huygens-Fresnel 原理出发,得到了在不同强度的大气湍流中受到圆孔限制的拉盖尔-高斯光束的轴上光强的分布表达式。运用 MAPLE 软件模拟了不同湍流强度、不同阶数下轴上光强的分布图形,得出了一系列的结果,对于不同光束在不同强度的大气湍流中传输有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] EYYUBOG H T, HARDALAC F. Propagation of modified Bessel-Gaussian beams in turbulence [J]. *Opt & Laser Technol*, 2008, 40 (2): 343-351.
- [2] EYYUBOG H T, BAYKAL Y. Transmittance of partially coherent cosh-Gaussian, cos-Gaussian and annular beams in turbulence [J]. *Opt Commun*, 2007, 278 (1): 17-22.
- [3] RAO R Zh. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005: 302-307 (in Chinese).
- [4] ZHANG Y X, TAO Ch K. Wave structure function of light wave propagation in turbulent atmosphere [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (4): 337-339 (in Chinese).
- [5] LIU X M, LIU L R, SUN J F, *et al.* Fine tracking in space laser communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54 (11): 5149-5156 (in Chinese).
- [6] HONG G L, ZHANG Y Ch, ZHAO Y Ch, *et al.* Raman lidar for profiling atmospheric CO₂ [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55 (2): 983-987 (in Chinese).
- [7] WANG Zh H, HE Y H, ZUO H Y, *et al.* The correction of short-range Mie scattering laser lidar returns based on the Gaussian character of laser beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55 (6): 3188-3192 (in Chinese).
- [8] LI F, GAO Ch Q, LIU Y D, *et al.* Experimental study of the generation of Laguerre-Gaussian beam using a computer-generated amplitude grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57 (2): 860-866 (in Chinese).
- [9] KANG X P, LÜ B D. Far-field divergence angle of nonparaxial rotationally symmetric Laguerre-Gaussian beams [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (2): 181-182 (in Chinese).
- [10] LUO Sh R, LÜ B D. Mfactor of truncated Laguerre-Gaussian beams [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (2): 199-201 (in Chinese).
- [11] QING Y S, LÜ B D. M^2 -factor of hard-edge apertured Laguerre-Gaussian beams self-convergent beam width method and comparison with the asymptotic analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30 (3): 231-235 (in Chinese).
- [12] COLLINS S A. Lens-system diffraction integral written terms of matrix optics [J]. *J O S A*, 1970, A60 (7): 1168-1177.
- [13] EYYUBOG H T, BAYKAL Y. Analysis of reciprocity of cos-Gaussian and cosh-Gaussian laser beams in a turbulent atmosphere [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (20): 4659-4674.
- [14] TIAN P, YUAN X H, ZHANG G Y. Axial light intensity distribution of limited Gaussian beams in atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24 (3): 352-356 (in Chinese).
- [15] SANG T, WANG Z S, WU Y G, *et al.* Research on guided-mode resonance for sub-wavelength dielectric grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35 (5): 641-644 (in Chinese).
- [16] WANG S S, MAGNUSSON R. Design of waveguide-grating filters with symmetrical line shapes and low sidebands [J]. *Opt Lett*, 1994, 19 (12): 919-921.
- [17] WEI C Y, LIU S J, DENG D. Electric field enhancement in guided-mode resonance filters [J]. *Opt Lett*, 2006, 31 (9): 1223-1225.
- [18] DING Y, MAGNUSSON R. Doubly resonant single-layer bandpass optical filters [J]. *Opt Lett*, 2004, 29 (10): 1135-1137.
- [19] WANG Z S, SANG T, WANG L. A guided-mode resonance Brewster filters with multiple channels [J]. *A P L*, 2006, 88 (25): 1115/1-1115/3.
- [20] WANG Z S, SANG T, ZHU J T. Double-layer resonant brewster filters consisting of a homogeneous layer and a grating with equal refractive index [J]. *A P L*, 2006, 89 (24): 1119/1-1119/3.
- [21] LIU Z S, TIBULEAC S, SHIN D. High-efficiency guided-mode resonance filter [J]. *Opt Lett*, 1998, 23 (19): 1556-1558.
- [22] MASHEV L, POPOV E. Zero order anomaly of dielectric coated gratings [J]. *Opt Commun*, 1985, 55 (6): 377-380.
- [23] AVRUTSKY I A, SYCHUGOV V A. High-efficiency single-order waveguide grating coupler [J]. *Opt Lett*, 1990, 24 (15): 1446-1448.
- [24] GALE M T, KNOP K, MORF R H. Zero-order diffractive microstructures for security applications [J]. *Proc SPIE*, 1990, 1210: 83-89.
- [25] TIBULEAC S, YOUNG P P, MAGNUSSON R, *et al.* Experimental verification of waveguide-Mode resonant transmission filters [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1999, 9 (1): 19-21.
- [26] PRIAMBOD P S, MALDONADO T A. Fabrication and characterization of high-quality waveguide-mode resonant optical filters [J]. *A P L*, 2003, 83 (16): 3248-3250.
- [27] DOBBS D W, GERSHKOVICH I, CUNINGHAM B T. Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal [J]. *A P L*, 2006, 89 (12): 123113/1-123113/3.
- [28] LEE K J, MAGNUSSON R. Guided-mode resonance filters fabricated in UV curable polymers [EB/OL]. [2008-11-06]. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=LS-2007-JWC38>.

(上接第74页)