

亚波长光栅反射特性研究

郭楚才 叶卫民 袁晓东 张检发 曾 淳 季家镛

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 亚波长光栅具有特殊的反射特性,可以用于各种光器件的设计。利用时域有限差分方法(FDTD)和散射矩阵方法计算了亚波长介质光栅的能带结构、本征模式以及反射谱。模拟结果显示:光栅反射谱中的共振峰是由光栅的泄漏模式引起的;在正入射和斜入射条件下,外部入射场所能激励的光栅的模式不同;通过控制光栅本征泄漏模的频率和 Q 值可以控制反射谱线型。实验利用电子束直写以及反应离子刻蚀等方法在绝缘体上硅(SOI)晶圆上制备出亚波长光栅结构,实验测量所得光栅的反射谱线型与模拟结果吻合得很好。

关键词 光栅;反射特性;时域有限差分;亚波长光栅;电子束直写;反应离子刻蚀

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3272

Research on Reflection Characteristics of Sub-Wavelength Gratings

Guo Chucai Ye Weimin Yuan Xiaodong Zhang Jianfa Zeng Chun Ji Jiarong

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Sub-wavelength gratings can be applied in the design of various optical devices for the special reflection characteristics. The band structure, eigenmodes and reflection spectra of sub-wavelength dielectric gratings are simulated with finite-difference time-domain (FDTD) method and scattering-matrix method. Simulation results show that the resonant peaks of the reflection spectra originate from the leaky modes and eigen modes excited by external incident waves are different between normal and oblique incident conditions. Further more, the reflection spectra line shape of the grating can be controlled by controlling the frequencies and Q factors of the leaky modes. In the experiments, sub-wavelength gratings in silicon-on-insulator (SOI) substrate are fabricated by electron beam lithography and reactive ion etching methods. Experimental reflection spectra of the fabricated grating agrees well with the simulation results.

Key words grating; reflection characteristic; finite-difference time-domain (FDTD); sub-wavelength grating; electron-beam lithography; reactive ion etching

1 引 言

当一个光栅的周期足够小使得只有零阶透射和反射波存在时,称之为亚波长光栅。近年来,随着微加工技术和理论研究的发展,亚波长光栅越来越受到人们的关注。亚波长光栅可以实现各种光器件的功能,同时具有体积小、设计灵活以及可单片集成的特点,和传统光学元件相比具有显著优势。2004年 Mateus 等^[1]报道了基于亚波长光栅的超宽带平顶反射镜,随后他们实验制备了带宽超过 500 nm、反射率高于 98% 的光栅结构^[2]。2007 年该小组利用

单层介质光栅代替多层分布反馈布拉格反射镜(DBR)作为腔镜,成功制备出垂直发射的激光器^[3]。除了反射镜外,亚波长光栅还可以用于抗反射结构^[4]、防伪结构^[5]、带通与带阻滤波器^[6~8]、波片^[9]以及偏振元件^[10~12]等光学元器件,因此亚波长光栅在光通信、光学成像与信息光学等领域有广泛的应用前景。

大量的研究工作利用等效介质理论^[11,12]与严格耦合波理论^[13]等方法来分析亚波长光栅的反射特性,对于光栅结构的本征模式以及色散曲线的分

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-04-21

作者简介: 郭楚才(1981—),男,博士研究生,主要从事纳米光子学方面的研究。E-mail: gcc_1981@yahoo.com.cn

导师简介: 季家镛(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: jijiarong@hotmail.com

析相对较少。本文将从光栅的色散曲线与本征模式出发,系统地分析结构本征模式对于反射谱线的影响,并讨论通过改变光栅结构参量来控制光栅的本征模式从而控制光栅反射谱的方法,为亚波长光栅器件的设计提供有益的参考。利用硅微加工技术在绝缘体上硅(SOI)晶圆上制备出亚波长尺度的光栅结构,对光栅反射谱的实验数据和模拟数据进行对比分析。

2 理论分析

亚波长光栅通常由覆盖层、光栅层以及衬底组成,本文理论部分选择覆盖层和衬底材料都为空气的光栅作为分析模型,图 1 为这种悬置在空气中的亚波长硅光栅结构示意图,其中光栅的周期为 a ,厚度为 h ,高折射率介质材料为硅(折射率为 n_{si}),宽度为 w ,光栅填充比 $F = w/a$ 。由于整个光栅结构在 y 方向无限、均匀,在 x 方向具有周期性,因此当 y 方向波数 $k_y = 0$ 时,光栅的本征模式可以分为 TE 与 TM 模,它们不为零的电磁场分量分别为 $\{E_y, H_x, H_z\}$ 和 $\{H_y, E_x, E_z\}$ 。

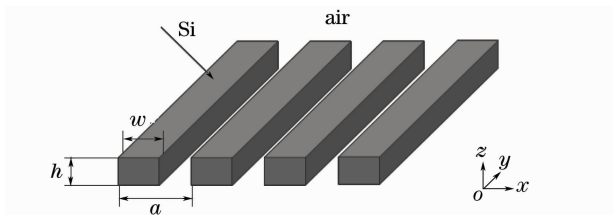


图 1 亚波长光栅结构示意图

Fig.1 Schematic of a sub-wavelength grating

从亚波长光栅的本征模式出发,分析光栅的反射特性。利用二维时域有限差分方法(FDTD)计算亚波长光栅的色散曲线和本征模式。图 2 所示为 FDTD 的计算区域,计算区域包含一个光栅周期。

在计算区域上下边界加入完全匹配层(PML)吸收边界条件,在光栅周期方向(x 方向)边界加入布洛赫(Bloch)周期边界条件,计算区域中 x 和 z 方向每一个光栅周期长度都被划分为 64 个网格。

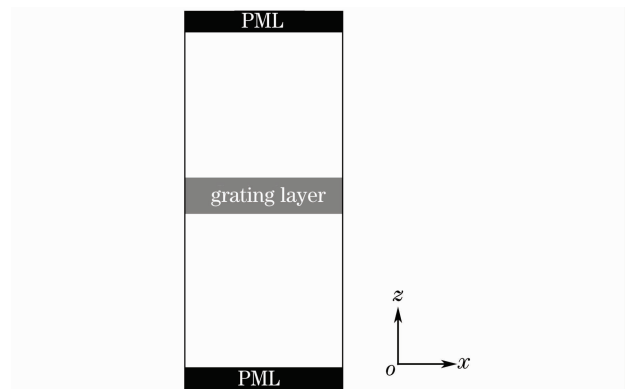


图 2 时域有限差分方法计算区域

Fig.2 Calculation domain of FDTD method

在计算结构色散曲线时,每次确定一个 Bloch 相位 $k_x a / (2\pi)$,在光栅层内加入宽频高斯脉冲点源并设置探测点,然后对探测点所探测的激励源关闭之后的电场进行傅里叶分析,计算出不同 Bloch 相位条件下结构的本征频率,由此得出结构的色散曲线。图 3(a) 和图 3(b) 分别为 $k_x a / (2\pi) = 0$ 以及 $k_x a / (2\pi) = 0.1$ 时光栅 TE 模的电场分量的傅里叶频谱图,模拟所用光栅结构参量为: $h = 0.65 a, F = 0.5, n_{\text{si}} = 3.48, n_{\text{air}} = 1$,图 4 为该光栅 TE 模的色散曲线。由于光栅中的位于光锥线以下的模式不能和光栅外的行波场耦合,所以图 4 只给出了光锥线以上的模式的色散曲线。由图 3 和图 4 可以看出,在归一化频率为 $0.3 \sim 0.8$ 范围内,该光栅结构的 TE 模存在 5 个本征模式,从低频到高频依次定义这 5 个模式为模式 A、模式 B、模式 C、模式 D 和模式 E。

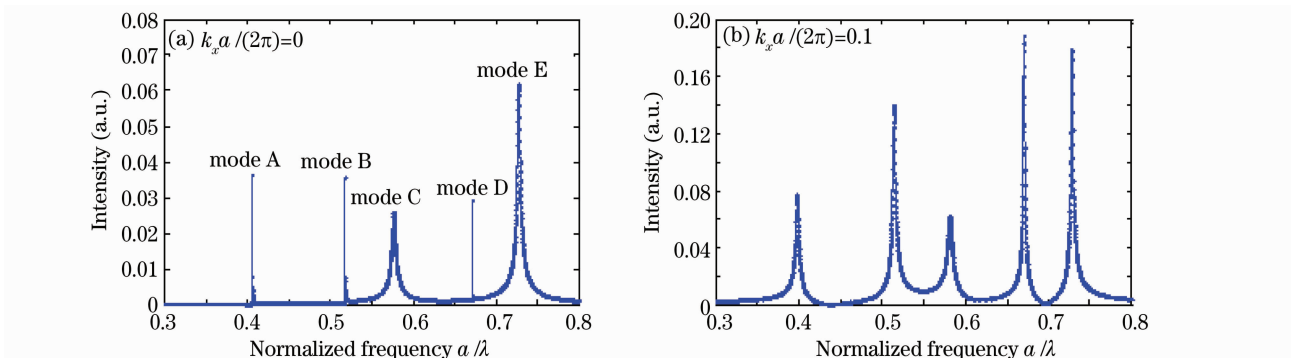


图 3 光栅 TE 模的电场分量的傅里叶频谱图

Fig.3 Fourier transformation of the electric field of TE mode

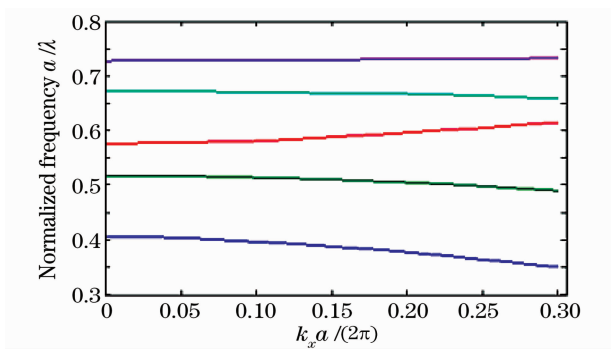


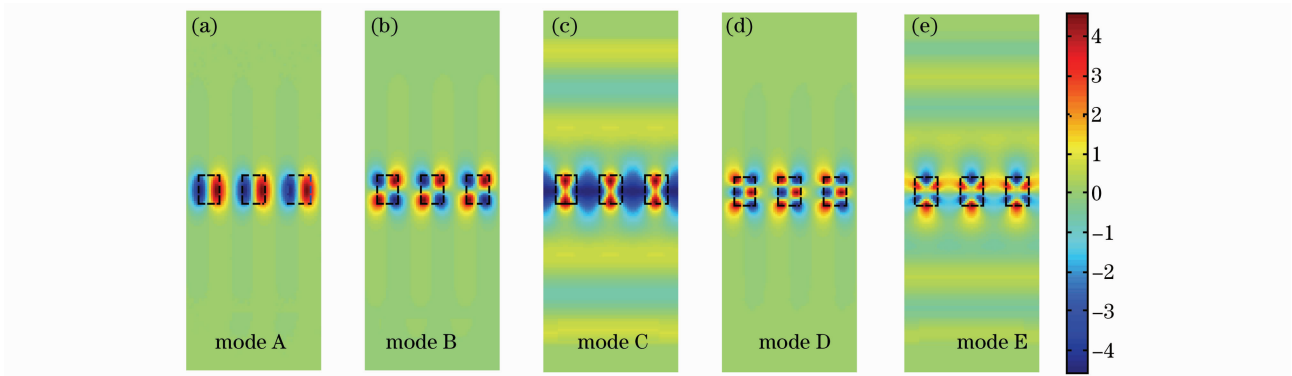
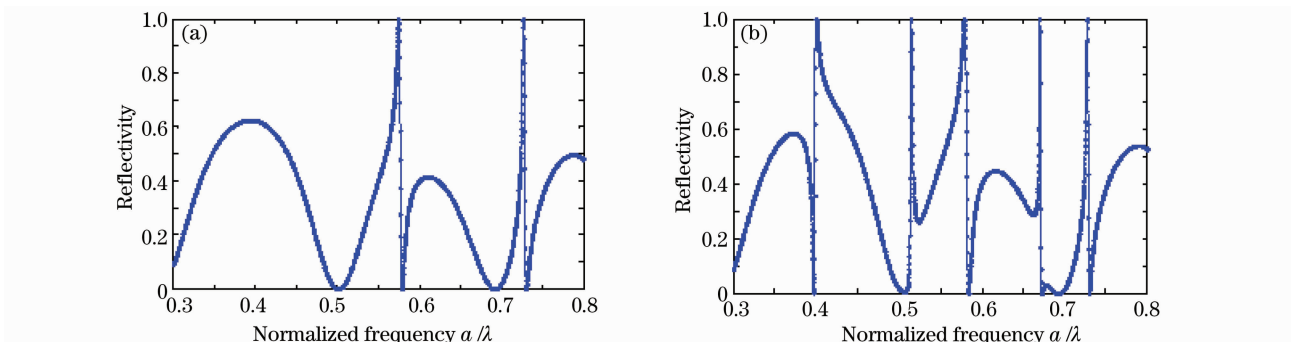
图4 亚波长光栅 TE 模的色散曲线

Fig. 4 Dispersion curves of the sub-wavelength grating for the TE mode

为了得到该光栅结构本征模式的场分布信息,利用单频点源分别激励各个模式,在关闭激励源后得到各本征模式的稳定场分布。图5给出了 $k_x a / (2\pi) = 0$ 时5个模式的电场在光栅横截面(xoz 平面)的分布,图中虚线围成的区域的介质是硅(为了便于观察,将场分布图在 x 方向扩展为3个光栅周期)。

利用散射矩阵方法^[14]计算亚波长光栅的反射谱,然后与用FDTD方法计算得到的光栅的本征模

式进行对比,分析在不同入射条件下光栅反射谱与其本征模式之间的关系。图6(a)和图6(b)分别给出了 $k_x a / (2\pi) = 0$ 和 $k_x a / (2\pi) = 0.1$ 时光栅 TE 模的反射谱曲线(模拟所用光栅结构参量与图3中所示相同)。对比图6(a)和图3(a)可以看出,在远离本征模式的频率区间,光栅与均匀介质层的反射谱相似,具有法布里-珀罗(F-P)线型,但是在模式C与模式E附近,光栅的反射谱出现从0到1的剧烈变化,在F-P反射谱线型的背景上出现了两个反射率接近100%的反射峰。这是因为外部入射场激励起这两个本征泄漏模,被激励起来的模式又与外部入射场相互作用从而改变光栅结构的反射谱。同时注意到当 $k_x a / (2\pi) = 0$ 时,光栅的其它3个本征模式的电场在 x 方向具有奇对称性(图5),这与外部入射平面波的对称性不匹配,因此它们不能被外部入射场所激励,从而对光栅的反射谱不产生影响。在斜入射条件下,即 $k_x a / (2\pi) \neq 0$ 时,光栅的本征模式在 x 方向为行波,其对称性被破坏,因此光栅的5个模式都可以被外部入射场所激励并影响光栅的反射谱,如图6(b)所示。

图5 本征模式在光栅 xoz 截面的电场分布Fig. 5 Distributions of electric fields of TE eigen modes in the xoz plane of the grating图6 (a) $k_x a / (2\pi) = 0$ 以及 (b) $k_x a / (2\pi) = 0.1$ 时光栅的反射谱Fig. 6 Reflection spectra of the grating for (a) $k_x a / (2\pi) = 0$ and (b) $k_x a / (2\pi) = 0.1$

最后,讨论光栅的结构参量对反射谱的影响,图7给出的是在正入射条件下,光栅的反射谱随光栅填充比 F 变化曲线(其它参量不变)。如图7所示,当 F 变小时,光栅的有效折射率降低,光栅本征模式的频率增大,因此由本征模式引起的反射峰向高频方向移动;与此同时由于本征模式 Q 值下降,反射峰的线宽也逐渐加大。由此可见,通过调整光栅的结构参量可以改变光栅共振模式的频率与 Q 值,从而控制光栅的反射谱线型,这是亚波长光栅结构用于滤波器与全反镜等光器件设计的物理基础。

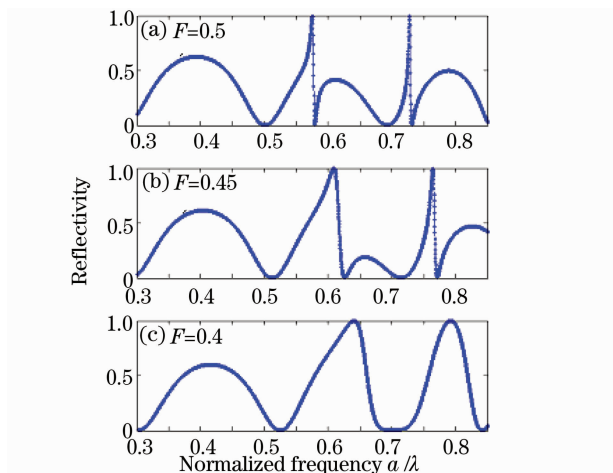


图7 亚波长光栅在正入射条件下的反射谱

Fig. 7 Reflection spectra at normal incidence for sub-wavelength gratings

3 实验制备与测试

为了验证本文理论模拟方法的正确性,利用硅微加工工艺在SOI晶圆上制备出亚波长光栅,并测试其反射谱。SOI亚波长光栅的制备流程如下:首先清洗晶圆,在SOI上表面均匀涂上一层厚度为300 nm左右的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),将样品放置到温度为170°的恒温烤箱烘烤30 min左右;然后利用电子束直写在PMMA上写出光栅的图形并显影,再利用反应离子刻蚀方法将PMMA上的图形转移到SOI的顶层硅上,最后利用丙酮将SOI表面残余的PMMA去掉。图8为SOI亚波长光栅的结构示意图,光栅层的厚度为300 nm,二氧化硅层厚度为1 μm,衬底为600 μm左右厚的单晶硅。我们制备了不同周期的SOI亚波长光栅,图9为一光栅结构扫描电镜(SEM)俯视图,其结构参量 $a = 520$ nm, $w = 260$ nm。

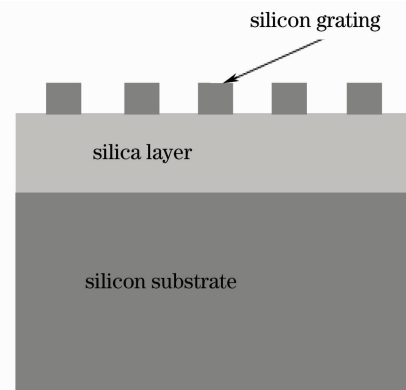


图8 SOI亚波长光栅结构示意图

Fig. 8 Schematic of a SOI sub-wavelength grating

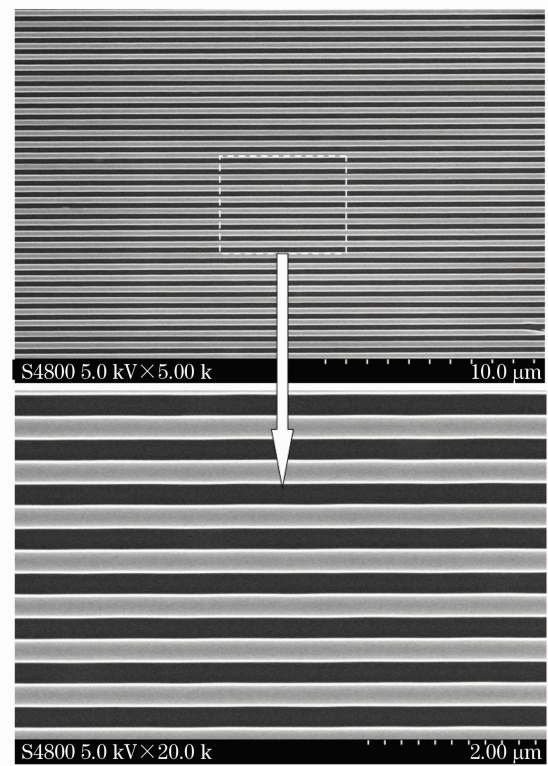


图9 SOI亚波长光栅的扫描电镜图

Fig. 9 SEM images of a SOI sub-wavelength grating

亚波长光栅反射谱测试平台主要包括宽广谱光源、聚焦物镜(数值孔径 $NA = 0.1$)、偏振器、透镜、半透半反镜、单色仪、飞瓦光电探测器以及数据采集系统等。实验测得的光栅的反射谱用在相同光路下镀金反射镜(1~5 μm波段的平均反射率不低于98%)的反射谱做归一化。图10为图9所示光栅的反射谱,由该图可以看出实验数据与模拟数据整体上能很好的拟合,二者之间的差异可能是由实验加工误差所引起的。

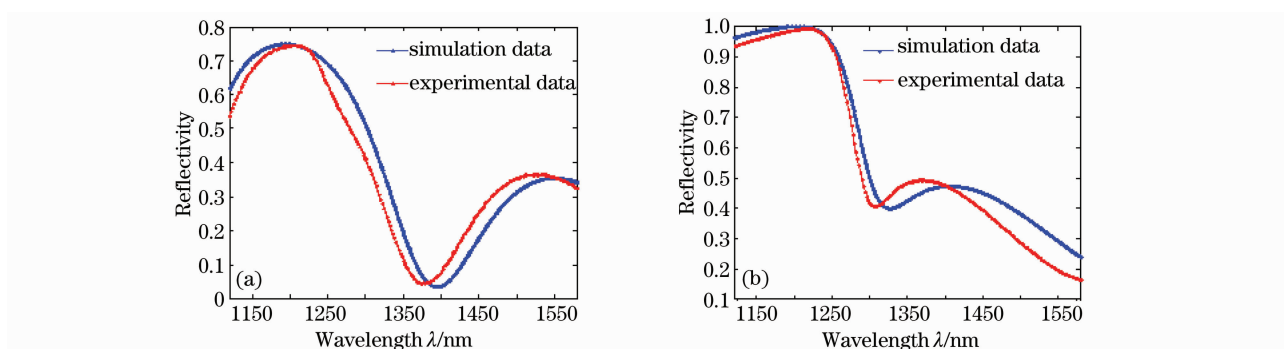


图 10 图 9 所示光栅 TE 模(a)及 TM 模(b)的模拟与实验反射谱

Fig. 10 Experimental and theoretical reflection spectra of the grating in Fig. 9 for TE mode (a) and TM mode (b)

4 结 论

在理论方面深入研究了亚波长光栅结构的本征模式与反射谱之间的关系。结果显示,光栅的本征模式可以对光栅的反射谱产生重要的影响,使得模式附近特定频率的光能被完全反射;由于本征模式对称性不同,正入射和斜入射条件下外部平面波所能激励的本征模式不同;改变光栅结构的参量可以控制光栅的本征模式从而控制光栅的反射谱线型。实验利用微加工工艺在 SOI 晶圆上制备了亚波长光栅结构,实验测得的反射谱与模拟数据能很好的吻合。

参 考 文 献

- 1 C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, Y. Deng *et al.*. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 518~520
- 2 C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, L. Chen *et al.*. Broadband mirror (1.12~1.62 μm) using a subwavelength grating[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2004, **16**(7): 1676~1678
- 3 M. C. Y. Huang, Y. Zhou, C. J. Chang-Hasnain. A surface-emitting laser incorporating a high-index contrast subwavelength grating[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 119~122
- 4 Chen Sihai, Cheng Zhijun, Huang Guang *et al.*. Design and fabrication of subwavelength antireflection gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1359~1361
陈四海,程志军,黄光等.亚波长消反射光栅[J].*光学学报*, 2003, **23**(11): 1359~1361
- 5 Chen Yongli, Zhao Dazun, Zhang Jingfang *et al.*. Non-contact cascaded dual-layer sub-wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1031~1036
陈永利,赵达尊,张静方等.间隔叠合式双层亚波长光栅[J].*光学学报*, 2008, **28**(6): 1031~1036
- 6 Y. Ding, R. Magnusson. Doubly-resonant single-layer bandpass optical filters[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1135~1137
- 7 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
- 8 Xiaoyong Fu, Kui Yi, Jianda Shao *et al.*. Design of single-material guided-mode resonance filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 9~11
- 9 Yi Deer, Yan Yinbai, Tan Xiaofeng *et al.*. Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 405~408
伊德尔,严瑛白,谭峭峰等.亚波长光栅用于实现宽光谱消色 1/4 波片的研究[J].*中国激光*, 2003, **30**(5): 405~408
- 10 A. G. Lopez, H. G. Grainger. Wave-plate polarizing beam splitter based on a form-birefringent multilayer grating[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(20): 1627~1629
- 11 RongChun tyan, PangChen sun, Axel Scherer *et al.*. Polarizing beam splitter based on the anisotropic spectral reflectivity characteristic of form-birefringent multilayer gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10): 761~763
- 12 Deer Yi, Yingbai Yan, Haitao Liu *et al.*. Broadband polarizing beam splitter based on the form birefringence of a subwavelength grating in the quasi-static domain[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 754~756
- 13 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 811~818
- 14 N. P. K. Cotter, T. W. Preist, J. R. Sambles. Scattering-matrix approach to multilayer diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1097~1103