

文章编号: 0253-2239(2010)09-2690-06

亚波长光栅偏振分束器的研究

郭楚才 叶卫民 袁晓东 曾 淳 季家镛

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用单层亚波长硅光栅结构设计出工作在近红外波段的偏振分束器。该偏振分束器在 45° 入射角附近对 TE 偏振光具有很高的反射率同时对 TM 偏振光具有很高的透射率,其设计原理是基于亚波长光栅的泄漏模共振效应以及类布儒斯特效应。利用散射矩阵方法和时域有限差分方法对偏振分束器进行设计和分析。模拟结果显示,该偏振分束器在 1390~1600 nm 的波长范围内的反射与透射消光比大于 100;同时该偏振分束器具有相对较大的人射角度容差,在有限尺寸高斯光束入射下能保持很好的性能。

关键词 光栅;偏振分束器;散射矩阵方法;亚波长光栅;泄漏模共振效应;类布儒斯特效应

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2690

Research on Sub-Wavelength Grating Polarizing Beam Splitter

Guo Chucai Ye Weimin Yuan Xiaodong Zeng Chun Ji Jiarong

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

Abstract A near-infrared (NIR) polarizing beam splitter is designed based on a single layer sub-wavelength silicon grating, which is reflective for TE polarization and transparent for TM polarization around the incident angle of 45° . The design of the proposed beam splitter is based on the leaky-mode resonance effect and Brewster-like effect of the sub-wavelength grating. Scattering matrix method and finite-difference time-domain method are utilized to design and analyse the structure. Simulation results show that both the reflection and transmission extinction ratios of the beam splitter are over 100 in the wavelength range of 1390~1600 nm. Moreover, the polarizing beam splitter has a relative big angular tolerance and the efficiency of the beam splitter under the illumination of a Gaussian beam with finite size is very high.

Key words gratings; polarizing beam splitter; scattering matrix method; sub-wavelength grating; leaky-mode resonance effect; Brewster-like effect

1 引 言

偏振分束器是光网络和光信息系统的关键元件,它可以广泛应用于自由空间光开关、磁光数据存储以及偏振成像系统等。传统的偏振分束器主要利用具有双折射效应的天然晶体或者多层膜结构来实现偏振分束。由于天然双折射晶体体积大,无法实现微型化和集成化;多层膜结构与天然晶体偏振分束器相比,其厚度大大减小,但是需要堆积的薄膜层数很多,制备过程相对复杂,因此这两种偏振分束器的应用都受到很大的限制。

近年来,具有特殊衍射特性的亚波长光栅日益受到人们的关注,已被广泛用于设计宽带反射镜^[1~3]、法布里-珀罗腔^[4]、滤波器^[5~10]、探测器^[11]与防伪结构^[12]等光学元器件,偏振分束器也不例外。例如,Deer Yi等^[13]提出了基于全反射的亚波长光栅偏振分束器,该结构具有很宽的工作带宽,但是因其覆盖层和衬底材料都需要很高折射率的介质,限制了该结构的应用范围;Y. Zhang等^[14]提出了一种双层堆栈结构分束器,该结构具有很大的入射角容差,但是其工作带宽较窄且消光比相对较低。

收稿日期: 2009-10-26; 收到修改稿日期: 2009-12-04

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

本文采用单层悬浮的亚波长硅光栅结构,设计具有高消光比的宽带偏振分束器。因这类偏振分束器结构简单、紧凑,可用于自由空间集成光学系统^[15],同时具有相对较大的入射角度容差,因此,在微光学集成系统和微光机电系统(MEOMS)等领域有很好的应用前景。

2 理论分析与设计

亚波长光栅偏振分束器的设计主要基于两方面考虑:利用光栅的泄漏模共振效应可以使 TE 偏振光在一定入射角以及一定频率(或波长)范围内实现方向全反射(或高反射);同时 TM 偏振光在结构类布儒斯特角附近具有很高的透射率。如此,通过合理的结构设计,使 TE 偏振光实现方向反射的入射角与 TM 偏振光的类布儒斯特角重合或者接近,则该结构在类布儒斯特角附近可以将 TE 偏振光与 TM 偏振光分开,从而实现偏振分束功能。

图 1 所示为亚波长光栅偏振分束器的示意图。它由悬空的一维亚波长硅光栅构成,其中光栅的周期为 a ,厚度为 t ,高折射率介质材料为硅(折射率为 n_{Si}),光栅填充比为 f 。取外部场的入射平面与 y 方向垂直(即波矢 y 向分量 $k_y = 0$),入射角为 θ ,则该结构 TE 偏振光与 TM 偏振光不为零的电磁场分量分别为 $\{E_y, H_x, H_z\}$ 和 $\{H_y, E_x, E_z\}$ 。

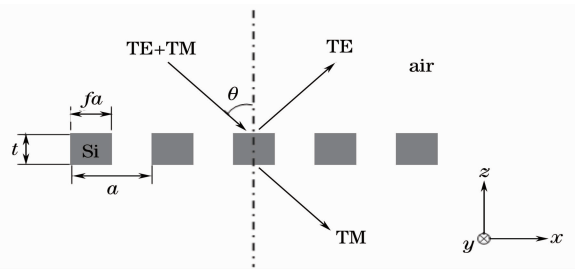


图 1 亚波长光栅偏振分束器结构示意图

Fig. 1 Schematic of a sub-wavelength grating polarizing beam splitter

分别讨论亚波长光栅方向反射镜以及类布儒斯特角,然后结合二者设计偏振分束器。光栅的透射或反射谱线由散射矩阵方法^[16]计算得到。

2.1 亚波长光栅方向反射镜

基于泄漏模共振效应设计的亚波长光栅宽带反射镜已有报道^[3,4],但是迄今为止,大部分报道的结果都只讨论正入射条件下的反射镜,对于工作在大入射角度下的方向反射镜的研究还鲜见报道。下面考虑亚波长光栅泄漏模的性质以及斜入射条件下亚波长光栅对 TE 偏振光的反射特性,设计亚波长光栅方向反射镜。

利用二维时域有限差分方法(在 x 方向引入周期边界条件)讨论亚波长光栅泄漏模的性质。图 2(a)所示为一亚波长光栅 TE 偏振光的色散曲线,

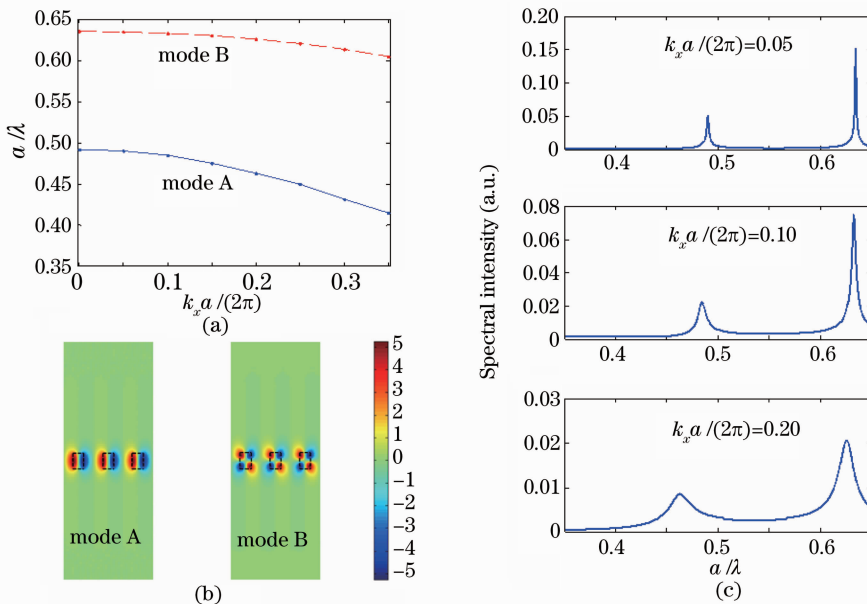


图 2 (a) 亚波长光栅 TE 偏振光的色散曲线; (b) $k_x a / (2\pi) = 0$ 时两个模式的电场在光栅横截面的分布; (c) 不同 Bloch 相位条件下光栅中电场的傅里叶分析图

Fig. 2 (a) Dispersion curve of the sub-wavelength grating for TE polarization; (b) electric field distributions of the two resonant modes at the cross section of the grating at $k_x a / (2\pi) = 0$; (c) Fourier transformations of the electric fields in the grating with different Bloch phases

模拟所用结构参量为 $t = 0.55a$, $f = 0.38$, $n_{\text{Si}} = 3.48$, $n_{\text{air}} = 1$ 。由图 2(a) 可见, 在所计算的归一化频率 $[a/\lambda = \omega a / (2\pi c)]$ 区间内该结构存在两个泄漏模, 图 2(b) 给出了当 Bloch 相位 $k_x a / (2\pi) = 0$ 时这两个模式的电场在光栅横截面 ($x-z$ 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)。图 2(c) 为在不同 Bloch 相位条件下光栅中电场 (关闭激励源之后) 的傅里叶分析图, 由图 2(c) 可以看出, 当 Bloch 相位增大时两个泄漏模的 Q 值 ($Q = \omega_0 / \Delta\omega$, ω_0 为模式的中心频率, $\Delta\omega$ 为模式的线宽) 逐渐降低, 模式的线宽随之展宽。

考虑斜入射条件下亚波长光栅 TE 偏振光的反射特性。图 3 所示为在不同入射角度下亚波长光栅结构 TE 偏振光的反射率与归一化频率的关系, 模

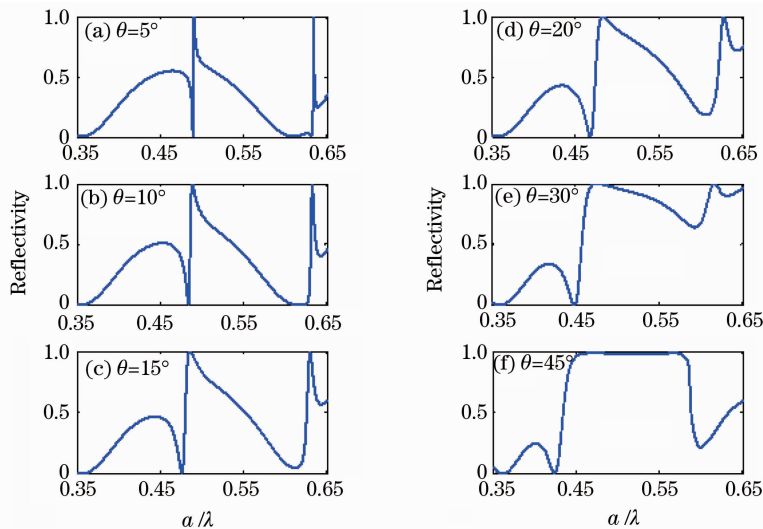


图 3 不同入射角度下亚波长光栅 TE 偏振光的反射谱

Fig. 3 Reflection spectra of a sub-wavelength grating for TE polarization at different incident angles

2.2 亚波长光栅类布儒斯特角

对于对称均匀平板结构 (覆盖层和衬底折射率为 n_1 , 平板层折射率为 n_2), 布儒斯特角 (θ_B) 的表达式为

$$\theta_B = \arctan(n_2/n_1). \quad (2)$$

类似地, 可以定义亚波长光栅结构对 TM 偏振光的反射率等于零 (或接近于零) 的入射角为亚波长光栅结构的类布儒斯特角。利用亚波长光栅在类布儒斯特角附近的反射性质, 可以设计出具有很低旁带值的亚波长光栅滤波器^[5,7]。但是对于折射率调制强度很大的亚波长光栅而言, 其类布儒斯特角与均匀平板结构的布儒斯特角存在较大差别。图 4(a) 和 4(b) 所示分别为对称均匀平板结构以及

拟所用结构参量与图 2 中相同。由于 Bloch 相位与入射角之间的关系为

$$k_x a / (2\pi) = (a/\lambda) \sin \theta, \quad (a/\lambda) \sin \theta \leq 0.5 \quad (1)$$

因此, 当入射角比较小时, 对应 Bloch 相位很小, 结构的两个泄漏模 Q 值较高, 反射谱中由泄漏模引起的共振峰的带宽很窄; 而当入射角逐渐增大时, Bloch 相位增大, 泄漏模 Q 值降低, 反射谱中两个共振峰的线宽逐渐增大。当入射角增加到一定角度 (45° 左右) 时, 这两个共振峰会形成一个平顶的宽带高反区域, 如图 3(f) 所示。如此, 该光栅结构在 45° 入射角附近可以用作宽带方向反射镜。通过控制光栅的结构参量, 可以控制光栅泄漏模的频率与 Q 值, 从而设计出工作在不同入射角和不同频率范围的方向反射镜。

亚波长光栅结构 TM 偏振光的反射率随入射角与归一化频率的变化关系 (图中反射率低于 10^{-3} 的点的颜色被饱和), 模拟所用光栅结构参量与图 2 中相同, 对称均匀平板结构的参量为 $n_1 = 1$, $n_2 = 1.239$ (对应图 2 中光栅 TM 偏振光的零阶等效折射率^[7]), $t = 0.55a$ 。如图 4(a) 所示, 对称均匀平板结构的布儒斯特角与频率无关 (图中结构的布儒斯特角约为 51.1°); 同时由 (2) 式可知当 $n_2 > n_1$ 时, 对称均匀平板结构布儒斯特角的值必须大于 45° 。但是对于亚波长光栅而言, 其类布儒斯特角与入射频率有关, 如图 4(b) 所示, 随着入射频率的变化, 该光栅的类布儒斯特角不断变化并出现跳变; 同时由图 4(b) 还可以看出, 亚波长光栅的类布儒斯特角可

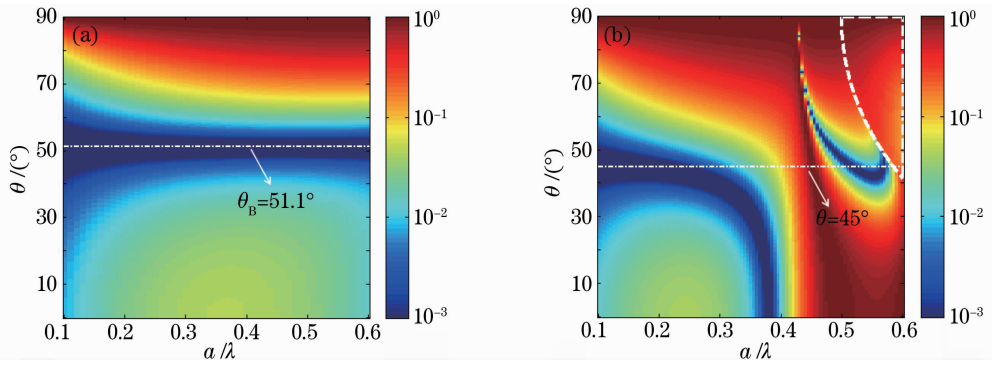


图 4 (a)对称均匀平板结构和(b)亚波长光栅 TM 偏振光反射率随入射角与归一化频率的变化

Fig. 4 Reflectivity of (a) a uniform slab and (b) a sub-wavelength grating for TM polarization as function of incident angle and normalized frequency

以小于 45°，而且在部分频率区间内光栅可能不存在类布儒斯特角。需指出的是，在图 4(b)中虚线所包围的区域内，由于满足条件 $(a/\lambda) \sin \theta + a/\lambda > 1$ ，光栅的覆盖层和衬底中将会产生高阶衍射级次的反射或透射光^[17]。

2.3 亚波长光栅偏振分束器

由于亚波长光栅的方向反射镜工作角度和类布儒斯特角可以通过光栅的结构参量控制，因此，当这两个角度重合或接近时，亚波长光栅能够实现偏振分束器功能。基于此，可以设计出工作在不同角度的宽带偏振分束器。首先确定材料的折射率与入射角度；然后通过改变光栅的归一化厚度 t/a 与填充比 f ，使光栅对 TE 偏振光的高反射区域与对 TM 偏振光的高透射区域重合；最后通过工作波长确定光栅的周期。例如，对比图 3(f)和图 4(b)可以发现，当 $\theta=45^\circ$ 时该光栅在归一化频率区间 0.5~0.58 附近对 TE 偏振光的反射率接近于 1 而对 TM 偏振光的反射率接近于零，因此该光栅可用于工作在 45°附

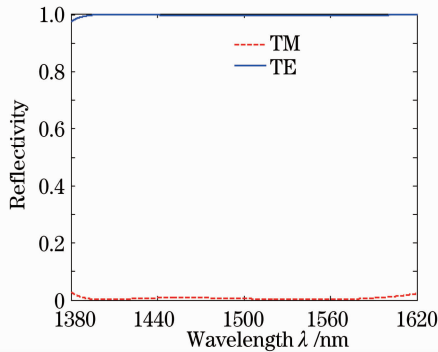


图 5 偏振分束器对 TE 偏振光与 TM 偏振光的反射谱
Fig. 5 Reflection spectra of the polarizing beam splitter for both TE and TM polarizations

近的偏振分束器。为了使该偏振分束器工作在 1500 nm 左右波段，取光栅周期 $a=800$ nm(通过改变周期可以使偏振分束器工作在不同波段)，图 5 为所设计的偏振分束器在入射角 $\theta=45^\circ$ 时对 TE 偏振光与 TM 偏振光的反射谱，模拟所用参量 $a=800$ nm, $t=440$ nm, $f=0.38, n_{Si}=3.48, n_{air}=1, \theta=45^\circ$ 。

3 偏振分束器的性能

为讨论偏振分束器的性能，分别定义偏振分束器的反射消光比(reflection ER)为 TE 偏振光的反射率与 TM 偏振光的反射率的比值；透射消光比(transmission ER)为 TM 偏振光的透射率与 TE 偏振光的透射率的比值。图 6 所示是入射角为 45°时偏振分束器的消光比(ER)与入射波长的关系。模拟结果显示，在 1390~1600 nm 的波长范围内，偏振分束器的反射消光比与透射消光比都大于 100 (20 dB)。

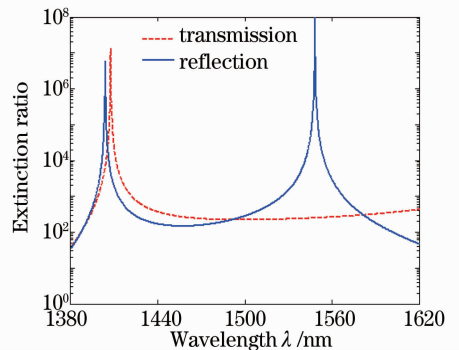


图 6 入射角 $\theta=45^\circ$ 时偏振分束器的消光比与入射波长的关系

Fig. 6 Extinction ratios of the polarizing beam splitter as a function of wavelength at $\theta=45^\circ$

考虑入射角度对偏振分束器性能的影响。图 7(a) 和 7(b) 所示分别为入射波长等于 1420 nm 和 1550 nm 时, 消光比与入射角度的关系。从中可以看到, 当 $\lambda=1420$ nm 时, 在 $43^\circ\sim 48^\circ$ 的入射角范围内, 偏振分束器的反射与透射消光比都高于 100, 当 $\lambda=1550$ nm 时偏振分束的反射与透射消光比都高于 100 的入射角度范围为 $42.4^\circ\sim 48^\circ$ 。

最后利用二维时域有限差分方法模拟偏振分束器在 Gaussian 光束入射下的性能。图 8(a) 和 8(b) 所示分别为 TE 与 TM 高斯光束入射到偏振分束器时, 坡印廷矢量在 $x-z$ 平面的稳态分布。其中从左上角入射到偏振分束器的高斯光束半径 $r_G = 5a$ ($4\ \mu\text{m}$), 波长 $\lambda=1550$ nm, 入射角 $\theta=45^\circ$ 。由图 8 可以看出, 当 $\theta=45^\circ$ 时该偏振分束器可以将一束非偏振光分成两束出射方向相互垂直的偏振光。同时模拟结果显示当 $r_G \geq 6a$ 时 TE 高斯光束的反射率与 TM 高斯光束的透射比都大于 99% ($\lambda=1550$ nm)。

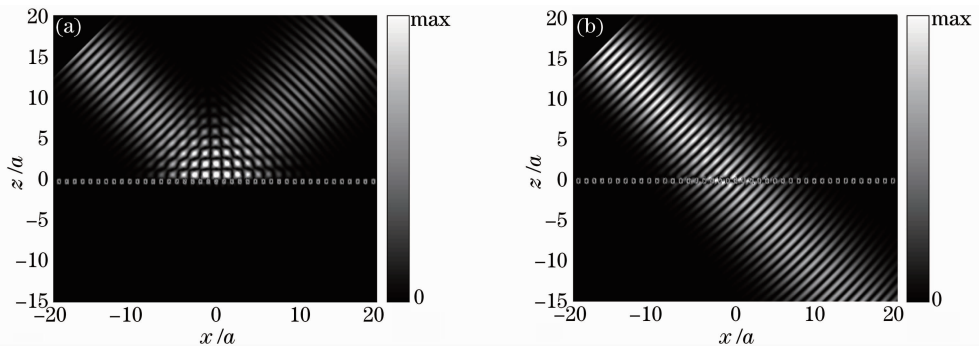


图 8 (a) TE 高斯光束与 (b) TM 高斯光束入射到偏振分束器时, 坡印廷矢量的稳态分布
Fig. 8 Steady-state distributions of Poynting vector of the polarizing beam splitter illuminated by (a) TE-polarized Gaussian beam and (b) TM-polarized Gaussian beam

4 结 论

分别讨论了亚波长光栅方向反射镜与亚波长光栅的类布儒斯特角, 设计出工作在 45° 入射角附近的单层亚波长光栅偏振分束器。该偏振分束器在较宽的波长范围内具有很高的消光比; 而且具有相对较大的入射角度容差, 能够在光斑半径很小的光束入射下保持很好的性能。与此同时, 该偏振分束器结构简单、紧凑, 可以与其他微型光学或光电器件实现单片集成, 在微光学集成系统和微光机电系统等领域有很好的应用前景。

参 考 文 献

1 C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, Y. Deng *et al.*.

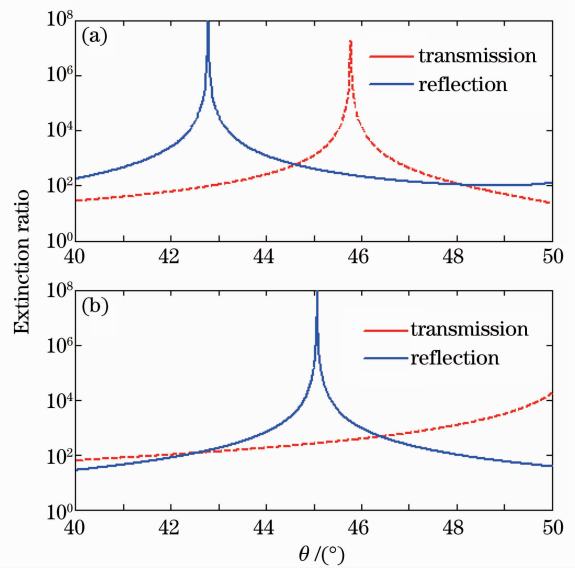


图 7 (a) $\lambda=1420$ nm 和 (b) $\lambda=1550$ nm 时偏振分束器的消光比与入射角的关系

Fig. 7 Extinction ratios of the polarizing beam splitter as a function of the incident angle when (a) $\lambda=1420$ nm and (b) $\lambda=1550$ nm

Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating[J]. *IEEE Photonic. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 518~520

2 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

3 R. Magnusson, M. Shokooh-Saremi. Physical basis for wideband resonant reflectors[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 3456~3462

4 S. Boutami, B. Benbakir, X. Letartre *et al.*. Ultimate vertical Fabry-Pérot cavity based on single-layer photonic crystal mirrors [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19): 12443~12449

5 R. Magnusson, D. Shin, Z. S. Liu. Guided-mode resonance Brewster filter[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(8): 612~614

6 Y. Ding, R. Magnusson. Doubly resonant single-layer bandpass optical filters[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1135~1137

7 Z. Wang, T. Sang, L. Wang *et al.*. Guided-mode resonance Brewster filters with multiple channels[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(25): 251115

- 8 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
- 9 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
- 10 Xiaoyong Fu, Kui Yi, Jianda Shao *et al.*. Design of internal Brewster guided-mode resonance filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 462~464
- 11 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357
杨一粟, 黄永清, 黄辉等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2352~2357
- 12 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
- 13 D. Yi, Y. Yan, H. 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
- 14 Y. Zhang, Y. Jiang, W. Xue *et al.*. A broad-angle polarization beam splitter based on a simple dielectric periodic structure [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14363~14368
- 15 L. Y. Lin, J. L. Shen, S. S. Lee *et al.*. Realization of novel monolithic free-space optical disk pickup heads by surface micromachining [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(2): 155~157
- 16 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
- 17 T. K. Gaylord, M. G. Moharam. Analysis and applications of optical diffraction by gratings [C]. *IEEE*, 1985, **73**(5): 894~937