

楔形导模共振滤波片的光谱分析

周红艳 盛斌 倪争技 黄元申 张大伟

上海理工大学光电信息与计算机工程学院上海市现代光学系统重点实验室, 教育部光学仪器与系统工程中心, 上海 200093

摘要 针对通信波段设计并制作了楔形波导层的导模共振滤波片(GMRF), 分析并研究了其光谱特性。采用三角掩模板的方法进行离子束刻蚀, 刻蚀一定次数后获得楔形波导层。光栅线条方向分为平行于和垂直于楔形波导层变化的方向。实验结果表明, 对于两种结构, 共振峰的位置与滤波片上的位置呈近似线性关系。光栅刻槽平行于楔形层变化的方向时共振峰的半峰全宽较光栅刻槽垂直于楔形层变化的方向时大。最终在 20 mm 的样品上, 获得了线性渐变的 Ta_2O_5 楔形薄膜, 其反射谱在 1560~1600 nm 范围内近似于线性变化。

关键词 光谱学; 导模共振滤光片; 楔形波导层; 离子束刻蚀

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1011001

Spectral Characteristics of Guided-Mode Resonance Filter with Wedged Waveguide Layer

Zhou Hongyan Sheng Bin Ni Zhengji Huang Yuanshen Zhang Dawei

Engineering Research Center of Optical Instruments and Systems of the Ministry of Education,

Shanghai Key Laboratory of Modern Optical Systems, School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract We designed and fabricated guided-mode resonance filters (GMRFs) with a wedged waveguide layer, and analyzed their spectral characteristics. GMRF was etched for several times with the ion-beam etching technique and a triangle-shaped mask to obtain a wedged waveguide layer. The lines of photoresist gratings and thickness variation direction of the wedge-shaped waveguide layer are either parallel or perpendicular to each other. The experimental results show that the relationship between the resonance peak wavelength and position on the filter is approximately linear for the two samples. The half width at maximum in the case that the grating lines are parallel to the thickness variation direction of the wedge-shaped waveguide layer is larger than that in the case that the grating lines are perpendicular to the thickness variation direction. Through a linear gradation in the thickness of the Ta_2O_5 film across a distance of 20 mm, the spectral location of the reflection peaks was found to vary nearly linearly across the spectral range of 1560-1600 nm.

Key words spectroscopy; guided-mode resonance filter; wedged waveguide layer; ion beam etching

OCIS codes 300.6170; 070.4790; 050.1950; 230.7408

1 引言

光谱仪能获取物质的光信息并分析检测物质中的元素, 在科研、食药和医学检测等领域应用广泛。微型光谱仪由于体积小、结构简单、方便携带, 受到人们的青睐。在光谱仪中有多种色散元件, 比如传统的衍射光

收稿日期: 2016-06-02; **收到修改稿日期:** 2016-07-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB352001)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ14014704)、国家自然科学基金(61378060, 61205156)、上海市科学仪器重点项目(14142200902)

作者简介: 周红艳(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事全息光栅和离子束刻蚀表面微细加工方面的研究。

E-mail: 630420506@qq.com

导师简介: 盛斌(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事全息光栅和离子束刻蚀表面微细加工方面的研究。

E-mail: bsheng@usst.edu.cn(通信联系人)

栅和棱镜。目前大多数微型光谱仪仍利用光的干涉原理,用光栅将复杂的光分解为光谱线^[1-4],但这限制了光谱仪的效率、分辨率和光谱范围。且母版光栅制作成本高,价格昂贵。近年来,人们研究和制作了越来越多的新型光学滤波元件应用于光谱仪中,在一定波段内可以实现低成本、小尺寸和高分辨率的滤波,比如窄带干涉滤光片^[5-7]、导模共振滤光片(GMRF)^[8-11]和胶体量子点^[12]。

导模共振滤波器因其具备高反射率、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。导模共振滤光片通常对光栅周期、光栅层、波导层的厚度和折射率都非常敏感^[13],加工时获得预想位置的共振峰非常困难。因此在实际应用中需要使用小范围可调的导模共振滤光片以补偿制作上的误差。为了获得可调谐的导模共振滤光片,人们进行了大量的研究,发现了多种实现可调谐滤波的方法。由于导模共振峰值位置对结构参数非常敏感,因此可通过结构参数的变化来实现反射峰值的调谐。调节方式主要有以下三种:1) 渐变厚度的光栅层,通过薄膜沉积技术获得渐变深度的光栅层,实现了波长在 798~909 nm 范围内近似于线性的调谐^[14];2) 改变光栅周围折射率,一般通过对液晶材料施加电压改变液晶折射率来达到共振波长移动的效果^[15],近来也有研究利用微流控技术为光栅沟槽导入一种液体,这种液体的折射率可变,可实现共振峰位置的变化^[16];通过离子束刻蚀,获得厚度渐变的楔形波导层,实现一定范围内的可调谐滤波^[17];3) 改变方位角或者入射角,随着方位角发生变化,导模共振滤光片的共振峰位置发生移动,从而实现波长位置可调^[18],入射角的调谐使得斜入射下产生的两个共振峰分别落在可见光波段和红外波段,获得红绿蓝三基色,实现了导模共振结构在彩色滤光片方面的应用^[19]。近来,本课题组利用离子束刻蚀的方法制成一个楔形波导层,再利用全息的方法将波导层制作成光栅,发现光入射位置不同时共振峰的位置也会发生相应变化,这种方法实现了共振峰位置变化,成本低,操作简单^[16]。

楔形波导层滤光片有两种情况,光栅线条方向分为平行于楔形波导层变化的方向和垂直于楔形波导层变化的方向。文献^[16]分析了光栅线条方向垂直于楔形波导层变化的情况,没有分析平行的情况。本文着重分析了光栅线条平行于楔形层变化方向和垂直于楔形层变化方向两种情况,如共振峰的半峰全宽,衍射强度变化以及不同位置的滤波效果。研究发现光栅线条平行于楔形层变化方向的共振峰半峰全宽较宽,但是随着位置变化,共振峰的强度变化幅度较小。

2 模拟、制作和测试

2.1 设计

基于严格的耦合波理论,设计了共振峰位置在 1550 nm 左右的导模共振滤光片结构。设计过程中,导模共振滤光片由 BK7($n_g = 1.5$)玻璃基底、楔形 Ta_2O_5 ($n_t = 2.1$)薄膜和一维光刻胶($n_p = 1.63$)光栅组成。结合测试光源和光学光谱分析仪(OSA)所能测试的波段,根据严谨的衍射光栅效率计算工具 Gsolver 软件模拟,确定光栅的周期为 1010 nm,槽深约为 180 nm,光栅占空比为 0.5,保持周期、槽深和占空比不变,设计了几种波导层厚度,分别为 220,240,260,280,300,320 nm。TM 偏振模式定义为入射光的振动方向垂直于光栅线条方向。在 TM 偏振模式下垂直入射,会产生一个极窄的反射波长。模拟结果如图 1(a)所示。模拟假设周期性边界条件适用于导模共振滤光片,类似于文献^[14]。

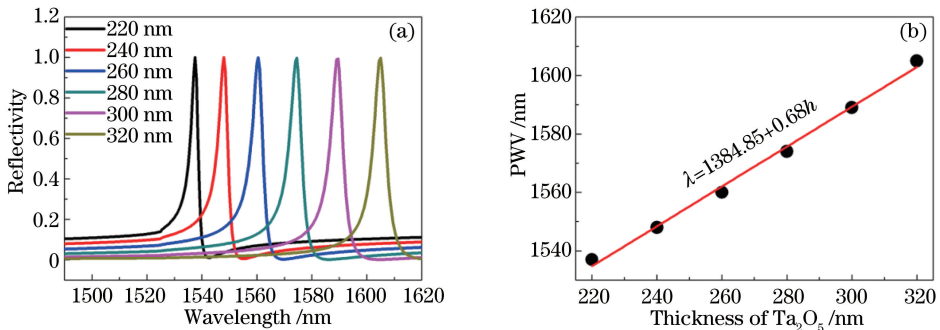


图 1 (a) TM 偏振态下垂直入射时不同的波导层厚度对应的反射谱;(b) 模拟的共振峰值波长(PWV)与波导层厚度的关系图
Fig. 1 (a) Reflectance spectra for GMRFs at normal incidence in TM-polarization for different Ta_2O_5 thicknesses;
(b) relationship between the simulated resonance peak wavelength (PWV) and the thickness of the waveguide layer

在 6 种不同厚度波导层条件下,画出了 6 条反射谱线[图 1(a)].模拟结果显示,共振波长对波导层厚度的改变相当敏感.当波导层变厚时,共振峰值往长波方向移动.这是因为导模共振滤波片可以等效为平板波导.根据平板波导的模式本征方程,当波导层厚度增加时,要使共振模式不变,只有共振波长变大才能保证原支持模式的相移不变,所以共振波长向长波方向移动.另外,随着波导层厚度的增加,光谱的带宽逐渐变宽.

将 6 组共振峰值波长(PWV)与波导层厚度数据进行直线拟合,如图 1(b)所示,共振波长与 Ta_2O_5 薄膜的厚度呈近似线性关系.拟合的直线方程为 $\lambda = 1384.85 + 0.68h$, λ 为共振波长, h 为波导层厚度.在给定的应用光谱范围内,通过调整波导层厚度来调节共振峰位置.

2.2 制作

垂直和平行是光栅线条方向与楔形波导层厚度变化方向的两种关系,对应于样品 A 和样品 B,如图 2(a)、(b)所示.入射光的振动方向垂直于光栅线条方向的偏振态定义为 TM 偏振(图 2).

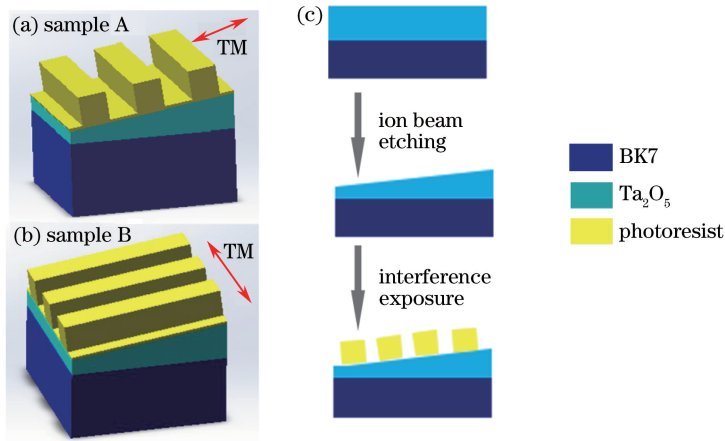


图 2 (a)样品 A 结构示意图,光栅线条方向垂直于楔形波导层变化方向;(b)样品 B 结构示意图,

光栅线条方向平行于楔形波导层变化方向;(c)制作流程:镀 Ta_2O_5 薄膜,刻蚀楔形波导层,全息干涉曝光制作光栅

Fig. 2 (a) Structure schematic of sample A, with the lines of grating perpendicular to the thickness variation direction of the wedge-shaped waveguide layer; (b) structure schematic of sample B, with the lines of grating parallel to the thickness variation direction of the wedge-shaped waveguide layer; (c) fabrication process: coating of Ta_2O_5 film, wedge-shaped waveguide layer by ion beam etching and photoresist grating by holographic interference exposure

根据上述设计的参数和模拟结果,在同一批次中制作了样品 A 和样品 B,制作过程流程图如图 2(c)所示.首先,在 BK7 玻璃基底上镀 Ta_2O_5 薄膜作为波导层.其次,在离子束刻蚀窗口添加三角形掩模板^[7],刻蚀一定次数后 Ta_2O_5 薄膜最终刻蚀成一个厚度渐变的楔形层.基片的面积为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,而光栅有效尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,利用台阶仪测量得到 Ta_2O_5 薄膜在基片两端的厚度为 127 nm 和 439 nm ,保证了光栅有效区域内波导层厚度在模拟的范围之内.考虑到薄膜表面的粗糙度会影响薄膜的光学性质,有必要研究刻蚀过程对薄膜表面粗糙度的影响.用原子力显微镜(AFM)测定样品刻蚀前后的表面粗糙度,结果如图 3 所示,其中 R_q 为表面粗糙度值.

第一次镀膜后(刻蚀前)表面粗糙度 R_q 为 1.34 nm ,如图 3(a)所示.刻蚀后 R_q 降为 1.16 nm ,如图 3(b)所示.刻蚀后表面粗糙度反而减小,这可能是由于离子束的轰击对薄膜表面的起伏程度起到一定的改善作用,从而减小了薄膜表面的粗糙度.刻蚀工艺并未明显增大薄膜的表面粗糙度,甚至在一定程度上使之降低,对滤光片的性能没有明显的影响.

通过全息曝光技术在楔形层上制作一维光栅.采用波长为 441.6 nm 的氦镉激光器,由两束平面波进行干涉并记录在 AZ1500 光刻胶上,通过显影制作光栅.光栅的周期为 1010 nm ,槽深约为 180 nm .

2.3 测试结果

使用光学频谱分析仪(AQ6370D,横河电机株式会社,日本)测试制备的楔形导模共振滤波片的反射光谱.采用透射光入射,光斑直径约为 3 mm .在可调节支架上移动滤波片,可测得不同位置处的共振反射

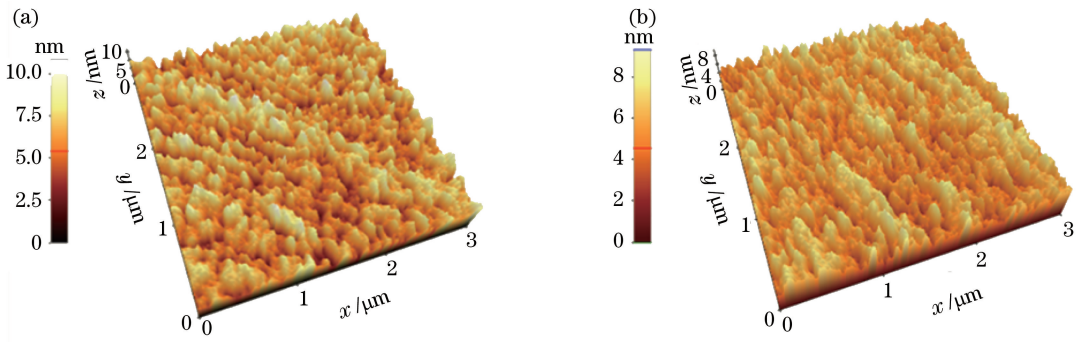


图 3 Ta₂O₅ 薄膜刻蚀前后的 3D AFM 图像。(a)刻蚀前, $R_q=1.34$ nm;(b)刻蚀后, $R_q=1.16$ nm

Fig. 3 3D AFM images of the Ta₂O₅ film before and after etching. (a) Before etching, $R_q=1.34$ nm; (b) after etching, $R_q=1.16$ nm

峰。在样品 A 和样品 B 的测量过程中,将滤波片的楔形层变化方向放置在水平位置上,旋转偏振片,使得入射光的振动方向垂直于光栅线条方向,即 TM 偏振。在 20 mm 长的光栅上,大约每隔 5 mm 的距离测量一次反射光谱的效率。测试结果如图 4(a)、(c)所示,从图中可以看出,随着滤波片的位置变化,峰值位置发生了移动,原因在于不同位置波导层的厚度发生了改变导致峰值位置发生了红移。图 4(b)、(d)是峰值位置波长随着位置的变化情况,对于样品 A,在 0, 2.5, 7.5, 10.0 mm 位置处,对应的共振波长分别为 1560.5, 1570.2, 1579.3, 1588.8, 1599.8 nm。对于样品 B,在 0, 2.5, 5.5, 8, 10.0 mm 位置处,对应的共振波长分别为 1560.2, 1570.1, 1580.1, 1589.3, 1599.3 nm。从图 4 可以看出,光栅槽型方向与楔形方向平行和垂直两种情况下都呈现近似线性关系。

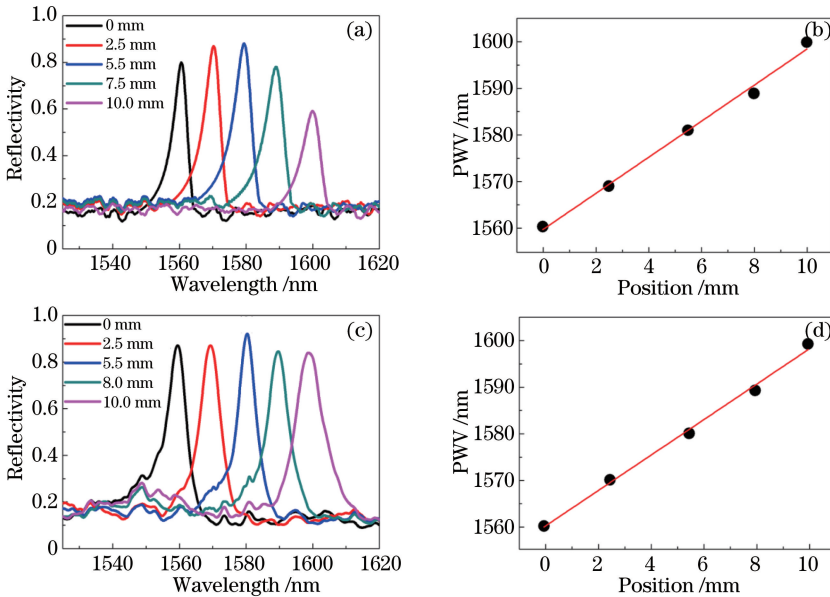


图 4 样品测试结果。(a)样品 A 反射光谱;(b)样品 A 共振峰波长与滤波片上位置的关系;
(c)样品 B 反射光谱;(d)样品 B 共振峰波长与滤波片上位置的关系

Fig. 4 Measured results. (a) Reflectivity spectra of sample A; (b) relationship between PWV of the sample A and the position on the filter; (c) reflectivity spectra of sample B; (d) relationship between PWV of the sample B and the position on the filter

3 分析与讨论

从图 4(a)、(c)可以很明显地看出,反射峰的光谱位置依赖于导模共振滤波片上的空间位置。共振峰值波长与滤波片上的空间位置呈近似线性关系,如图 4(b)、(d)所示。其中,Ta₂O₅ 波导层厚度在空间位置上

呈梯度变化。当 Ta_2O_5 波导层厚度增加时,两种结构都出现了共振峰向长波方向移动的现象,且随着向长波方向的移动半峰全宽都有增大的趋势。在实验误差范围内,实验结果与理论模拟结果相符。这种反射谱的半峰全宽略大于模拟结果和反射率高低不等的现象有以下几种可能:1) 甩胶时,不能保证光刻胶旋涂的均匀性,导致光栅层的厚度不均匀;2) 曝光过程中,激光器的稳定性也会影响曝光量的多少,并且边缘处的曝光量明显少于中心处,光栅的槽深和占空比也会略有差别,从而影响效率和带宽;3) 波导层的厚度不均匀;4) 入射光斑的尺寸;5) 楔形层的引入使得共振波长移动,带来色散,导致带宽加宽和效率降低^[20]。从图 4(a)、(c)可以看出光栅槽型平行和垂直于楔形方向在相同的移动距离上存在些许差异,光栅槽型平行于楔形方向滤光片的半峰全宽小于光栅槽型垂直于楔形方向的滤光片,但是在末尾位置处强度小于光栅槽型垂直于楔形方向的滤光片。

样品 A 和样品 B 在相同共振峰位置处半峰全宽的对比如图 5 所示。通过对比可以发现,样品 A 的反射峰半峰全宽为 6.3~9.0 nm,明显低于样品 B 的半峰全宽(10~15 nm),这种现象主要由测量方式造成。测试光斑的直径大约 3 mm,实际覆盖的范围包含了部分波导层厚度。对于样品 A 来说,TM 偏振振动方向平行于色散方向。对测试光斑来说,平行于色散方向看,每部分都是近似等同的;垂直于色散方向上看,因为波导层倾角角度很小,可以作等厚处理,所以没有明显的展宽。对于样品 B 来说,TM 偏振振动方向垂直于色散方向。对测试光斑来说,垂直于色散方向看,色散方向上的每一个点厚度都不一样,线性色散率乘以光斑尺寸导致明显的展宽;平行于色散方向看,因为波导层倾角角度很小,可以作等厚处理。所以,样品 B 的半峰全宽稍大于样品 A。

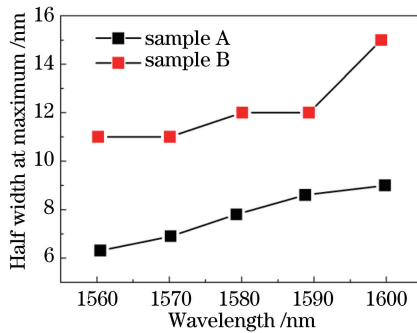


图 5 样品 A 和样品 B 的半峰全宽对比

Fig. 5 Comparison of the half width at maximum of sample A and sample B

实验结果表明,尽管 Ta_2O_5 波导层的厚度是变化的,模拟中完美的周期性假设和一致性假设对于应用在 TM 偏振模式下的样品 A 和样品 B 两种滤光片来说是一个很好的局部逼近。

4 结 论

设计并制作了楔形波导层的导模共振滤波片,最终在 20 mm 的有效尺寸上,获得了厚度线性渐变的 Ta_2O_5 楔形薄膜,其反射谱约在 1560~1600 nm 范围内近似于线性变化。楔形的波导层通过离子束刻蚀获得。采用三角形挡板进行多次来回刻蚀,最终在 30 mm×30 mm 的基片上,得到厚度为 127~439 nm 的薄膜。光栅的有效尺寸为 20 mm×20 mm,既保证了光栅有效区域内波导层的厚度在模拟的范围之内,又提高了制作容差。制作容差的提升提高了制作效率,降低了制作难度。实验结果表明,对于样品 A 和样品 B 两种情况,共振峰和滤波片上的空间位置均有近似线性关系,与模拟结果较为吻合。通过改变楔形波导层的厚度变化率可以实现滤波范围的调整。另外,在光栅刻槽平行于楔形层变化的方向,其共振峰的半峰全宽稍大于在光栅刻槽垂直于楔形层变化方向的半峰全宽,但随着位置变化,光栅刻槽垂直于楔形层滤光片的共振峰强度变化幅度较小。

楔形波导层滤光片能够实现共振峰位置的移动,进而提高实际制作过程中的制作容差。根据共振峰值与位置之间的近似线性关系,制作的滤波片可以作为色散元件应用于偏振敏感的微型光谱仪中。另外,在光通信中,通过改变楔形波导层的厚度变化率来调整滤波的范围,从而满足不同的滤波需求。

参 考 文 献

- 1 Wu Xuhua, Zhu Yongtian, Wang Lei. Optical design of high resolution echelle spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 442-447.
武旭华, 朱永田, 王 磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(5): 442-447.
- 2 Grabarnik S, Emadi A, Wu H, *et al.* High-resolution microspectrometer with an aberration-correcting planar grating[J]. Applied Optics, 2008, 47(34): 6442-6447.
- 3 Tang Yuguo, Song Nan, Bayanheshig, *et al.* Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1989-1995.
唐玉国, 宋 楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 1989-1995.
- 4 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.* Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0205001.
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0205001.
- 5 Wang S, Xia C, Chen X, *et al.* Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array[J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 632-634.
- 6 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng, *et al.* Design of DWDM thin-film interference filter[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 794-797.
顾培夫, 白胜元, 李海峰, 等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 794-797.
- 7 Sheng B, Chen P, Tao C, *et al.* Linear variable filters fabricated by ion beam etching with triangle-shaped mask and normal film coating technique[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(12): 122301.
- 8 Cunningham B, Lin B, Qiu J, *et al.* A plastic colorimetric resonant optical biosensor for multiparallel detection of label-free biochemical interactions[J]. Sensors and Actuators B, 2002, 85(3): 219-226.
- 9 Kong Weijin, Zheng Bingbin, Yun Maojin, *et al.* Guided-mode resonance filter with narrow waveband for three primary colors[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005006.
孔伟金, 郑併斌, 云茂金, 等. 基于导模共振效应三基色窄带滤光片的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005006.
- 10 Wang Q, Zhang D, Xu B, *et al.* Colored image produced with guided-mode resonance filter array[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4698-4700.
- 11 Foland S, Swedlove B, Nguyen H, *et al.* One-dimensional nanograting-based guided-mode resonance pressure sensor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(5): 1117-1120.
- 12 Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. Nature, 2015, 523(7558): 67-70.
- 13 Ma Jianyong, Liu Shijie, Wei Chaoyang, *et al.* Design and analysis of double layer resonant grating filters in the visible spectral region[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7): 4195-4201.
麻健勇, 刘世杰, 魏朝阳, 等. 可见光波段双层浮雕型导模共振滤波器设计与分析[J]. 物理学报, 2008, 57(7): 4195-4201.
- 14 Dobbs D W, Gershkovich I, Cunningham B T. Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(12): 123113.
- 15 Wang Q, Zhang D, Huang Y, *et al.* Type of tunable guided-mode resonance filter based on electro-optic characteristic of polymer-dispersed liquid crystal[J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1236-1238.
- 16 Xiao G, Zhu Q, Shen Y, *et al.* A tunable submicro-optofluidic polymer filter based on guided-mode resonance[J]. Nanoscale, 2015, 7(8): 3429-3434.
- 17 Qian L, Zhang D, Tao C, *et al.* Tunable guided-mode resonant filter with wedged waveguide layer fabricated by masked ion beam etching[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 982-985.
- 18 Zhang Dawei, Wang Qi, Zhu Yiming, *et al.* Design of guided mode resonant filters tuned by azimuthal angle[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 950-953.
张大伟, 王 琦, 朱亦鸣, 等. 方位角调谐的反射窄带导模共振滤光片设计[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 950-953.
- 19 Yang Sai, Sheng Bin, Zhang Dawei, *et al.* Guided-mode resonance filter for three primary color tuned by incident angle[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0416002.
杨 赛, 盛 斌, 张大伟, 等. 入射角调谐的三基色导模共振滤光片[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0416002.
- 20 Fehrembach A L, Gauthier-Lafaye O, Yu K C, *et al.* Measurement and modeling of 2D hexagonal resonant-grating filter performance[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(7): 1535-1540.