

波长可调谐导模共振滤波器的设计及优化

江孝伟^{1,2}, 武华^{2,3}, 王飞¹

¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324000;

²北京工业大学电子信息与控制工程学院光电子技术实验室, 北京 100124;

³赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000

摘要 利用严格耦合波法设计并优化了中心波长为 1.55 μm , 基于液晶的波长可调谐导模共振滤波器(WTGMF)。通过计算得知减反层和衬底的厚度均对滤波器的共振线宽有影响, 减反层的厚度越薄共振线宽越宽, 但是对于衬底厚度总存在着一个最优的厚度使线宽达到最窄, 当衬底厚度为 300 nm 时, 线宽缩小到最窄的 0.96 nm。另外决定 WTGMF 的波长调谐范围的主要因素是液晶层的厚度, 调谐范围随着液晶层厚度的增加而增加并最终达到稳定, 当液晶层厚度达到 1600 nm 时波长调谐范围达到最大的 39 nm。

关键词 光栅; 导模共振; 严格耦合波法; 线宽; 液晶

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100501

Design and Optimization of Wavelength Tunable Guide Mode Resonance Filter

Jiang Xiaowei^{1,2}, Wu Hua^{2,3}, Wang Fei¹

¹ College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

² Laboratory of Opto-Electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

³ College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract Based on liquid crystal, a wavelength tunable guide mode resonance filter (WTGMF) with a center wavelength of 1.55 μm is designed and optimized by using the rigorous coupled wave method. From calculation, the thicknesses of anti-reflection layer and substrate both have influence on the resonance line width of the filter. The thinner the thickness of anti-reflection layer is, the wider the resonance line width is. However, there is always an optimum substrate thickness to minimize the line width. When the substrate thickness is 300 nm, the resonance width is the narrowest with only 0.96 nm. In addition, the main factor that determine the wavelength tuning range of WTGMF is the thickness of the liquid crystal layer. The tuning range increases with the increase of the thickness of the liquid crystal layer and finally reaches stability. When the thickness of the liquid crystal layer reaches 1600 nm, the wavelength tuning range reaches the maximum of 39 nm.

Key words gratings; guide mode resonance; rigorous coupled wave method; linewidth; liquid crystal

OCIS codes 050.1940; 050.1950; 050.5745; 050.6624

1 引言

导模共振滤波器(GMF)具有线宽窄^[1]、结构简单^[2]、波长选择性优越^[3]等特点, 近几年来引起了人们的关注, 且被广泛地应用在各个领域, 如光学通信^[4-5]、光学器件^[6-7]、颜色滤波^[8]以及生物探测^[9]等领域。

收稿日期: 2017-05-11; **收到修改稿日期:** 2017-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61650404)、浙江省教育厅一般科研项目(Y201738091)、衢州市科技计划项目(2015Y021)、赣南师范大学招标课题(16zb04)

作者简介: 江孝伟(1991—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

但是一般的 GMF 仅能对一种波长实现共振,如需对其他波段进行滤波则必须替换与所要过滤波长相对应的滤波器,这不仅增加了工作时间而且还增加了商业成本。因此实现对多个波段滤波的波长可调谐导模共振滤波器(WTGMF)成为众多科研工作者的研究重点。2016年Wan等^[3]和Fang等^[10]分别利用GMF对入射角和光栅周期的敏感性实现共振波长的调谐,并分别实现了200 nm和88 nm的调谐;2008年和2012年伊利诺伊大学微纳技术实验室^[11]和上海光学精密机械研究所^[12]利用液晶材料作为光栅的低折射率材料,通过在液晶两端施加电压实现共振波长的调谐,分别实现了25 nm和26 nm的调谐。

尽管已经有很多学者设计并制作出了WTGMF,但是WTGMF仍有很多方面有待优化。若通过改变光栅周期实现波长调谐会极大地增加工艺难度,而利用入射角度的不同以实现波长调谐虽然可以实现大范围波长调谐,但是从文献^[13]和^[5]可以看出,随着入射角度增大共振谱会出现不对称并且线宽增大。利用液晶作为亚波长光栅的低折射率材料不仅工艺简单,可操作性强,而且共振谱可以保持对称;线宽可以维持在一个宽带范围内。可是国内外虽然有研究者提出利用液晶实现共振波长的可调谐,但是鲜有研究具体去分析结构参数对调谐波长的影响并对结构进行线宽和波长调谐范围的优化。因此本文基于严格耦合波法设计并优化了基于液晶的WTGMF,分析了结构的各部分参数对滤波器线宽和波长调谐范围的影响,并找到最优的结构参数。

2 器件结构

图1所示的是基于液晶的WTGMF,该结构由下而上分别为:玻璃衬底(折射率 $n_s=1.52$,厚度为 d_s),钢锡氧化物(ITO, $n_{ITO}=2.1$)半导体透明导电膜构成的波导层(厚度为 d_w),减反层($n_{AR}=1.8$,厚度为 d_{AR})、高低折射率材料分别是五氧化二钽($n_h=2.09$)和液晶($n_L=n_{lc}$, n_{lc} 是E7液晶的折射率)的光栅层(厚度为 d_g),液晶层($n_o=1.51$, $n_e=1.71$,E7液晶,厚度为 d_{lc}),ITO导电层($n_{ITO}=2.1$,厚度为 d_e),玻璃覆盖层($n_s=1.52$,厚度为 d_s)。 Λ 是光栅周期, d 是光栅条宽, V_{lc} 是液晶两端施加的电压。

从图1中可以看出,在液晶盒内有一层聚酰亚胺层,这是为了使液晶分子统一旋转方向^[14]。在液晶两端通电后液晶分子会发生旋转。由(1)、(2)式可知液晶的角度变化会使其折射率发生变化^[15],进而改变光栅的共振波长^[11-12]。液晶的旋转角度 θ 逐渐增大时,TE偏振方向的折射率 n_y 会从1.71逐渐减小到1.51,但TM偏振方向的折射率 n_x 维持1.51不变,如图2所示。

$$n_x = n_o, \quad (1)$$

$$n_y = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (2)$$

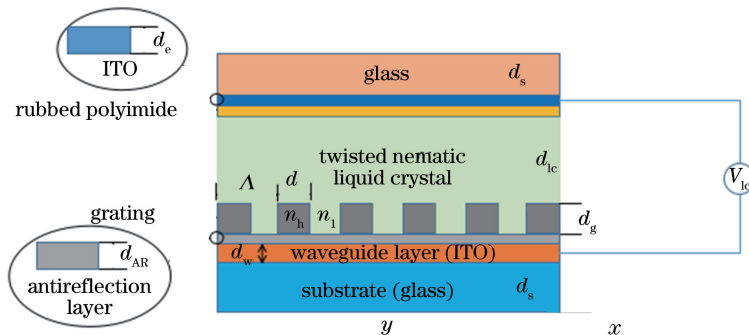


图1 可调谐 GMF 结构图

Fig. 1 Schematic of tunable GMF

3 结构优化

3.1 减反层对线宽的影响

由图2可得,图1结构中的亚波长光栅最低的调制强度为1.44($\Delta\epsilon=n_h^2-n_{lc}^2$),这是一个高调制强度,高的光栅调制强度会导致共振线宽的增加,可是在实际应用中所需的是窄线宽滤波器,为了降低高调制强度滤

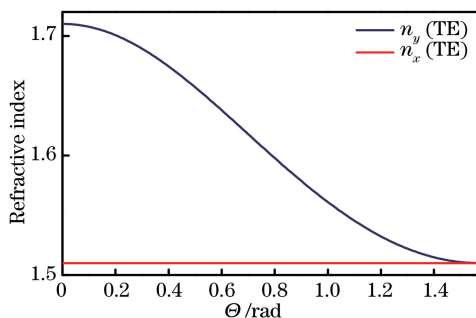


图 2 寻常光和非寻常光折射率 n_x 、 n_y 与液晶旋转角度 θ 的关系

Fig. 2 Relationship between refractive indexes of ordinary light (n_x), extraordinary light (n_y) and liquid crystal rotation angle θ

波器的线宽,本文选择在波导层和光栅层之间增加一层减反层,通过调节减反层的厚度实现对滤波器线宽的控制。利用 Rsoft 软件的 DiffractMOD 建立图 1 所示的模型并进行计算,DiffractMOD 是基于麦克斯韦方程结合边界条件求得光栅的衍射现象。图 3(a)所示的是在其他结构参数相同并将液晶的折射率设为 1.61[图 3(b)~图 6 液晶折射率均设为 1.61]的情况下,不同减反层厚度 d_{AR} 的 WTGMF 的共振线宽,当 d_{AR} 分别为 165.8,115.8,65.8 nm 时对应的线宽(半峰全宽 FWHM)分别是 1.21,5.35,12.24 nm,由此可知滤波器的共振线宽随着减反层厚度的减小而变宽,增加减反层厚度线宽会变窄的原因为:减反层增加使光栅层和波导层的距离变大,从而导致外部入射波和位于波导层的泄露模的耦合距离增加,进而引起外部入射波和泄露模的耦合强度减小^[16]。可是随着减反层厚度的增加/减小共振波长也会发生蓝移/红移,为了能够使共振线宽达到需求并同时在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处实现共振,可以同时调节减反层厚度和光栅周期大小,如图 3(b)所示。

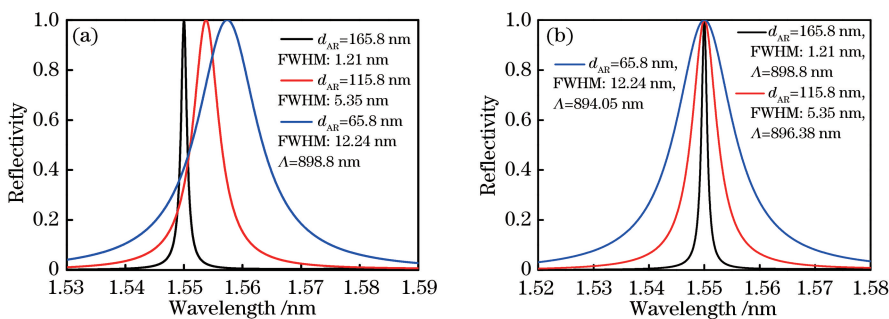


图 3 $f=d/\Lambda=0.5$, $d_w=166.9 \text{ nm}$, $d_s=215 \text{ nm}$, $d_{lc}=215 \text{ nm}$, $d_e=40 \text{ nm}$, $d_g+d_{AR}=215.8 \text{ nm}$ 时,(a)不同减反层厚度时滤波器的共振线宽;(b)滤波器在 $1.55 \mu\text{m}$ 处实现共振所需的减反层厚度和光栅周期

Fig. 3 (a) Resonance linewidth of the filter with different antireflection layer thicknesses; (b) antireflection layer thickness and grating period required for filter to achieve resonance at wavelength of $1.55 \mu\text{m}$, while $f=d/\Lambda=0.5$, $d_w=166.9 \text{ nm}$, $d_s=215 \text{ nm}$, $d_{lc}=215 \text{ nm}$, $d_e=40 \text{ nm}$, $d_g+d_{AR}=215.8 \text{ nm}$

3.2 衬底厚度对线宽的影响

通过 3.1 节的研究可以得出,减反层厚度对滤波器的线宽有较大的影响,但研究发现滤波器的衬底厚度对滤波器的线宽也有明显的影响,存在一个最佳的衬底厚度使滤波器线宽达到最窄,如图 4 所示。在图 4 中可以看到,滤波器的线宽随着衬底厚度增加先减小后增大,当衬底厚度为 300 nm 时线宽为 0.96 nm 。在图 4 中衬底厚度 215 nm 对应的线宽是 1.1 nm ,但在图 3 中除液晶厚度不同外其他参数均相同下对应的线宽却为 1.21 nm ,这是因为图 4 的液晶厚度为 1600 nm ,而图 3 中对应的液晶厚度为 215 nm ,由此可以推出液晶厚度对滤波器的线宽影响极为微弱,液晶厚度每变化 1 nm ,滤波器线宽才变化 $7.22 \times 10^{-5} \text{ nm}$ 。

尽管在衬底厚度为 300 nm 时线宽可以达到最窄,但是其对应的共振反射谱的旁带反射率相对较高,最高可以达到 4.5% ,因而为了降低其旁带反射率可将该结构的衬底厚度设为 270 nm ,因为该衬底厚度对应的旁带反射率最高仅 1.8% ,并且滤波器对应的线宽仅增加 0.01 nm ,达到 0.97 nm ,如图 5(a)所示。衬底厚度为 270 nm 时滤波器的电场分布如图 5(b)所示。

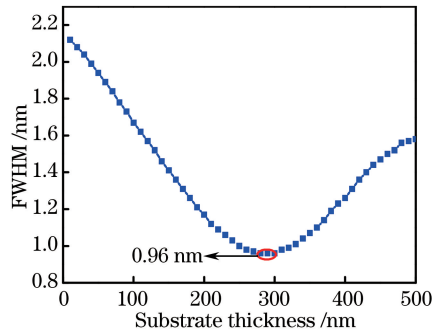


图 4 $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.8 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm},$
 $d_{AR}=165.8 \text{ nm}, d_g=50 \text{ nm}$ 时, 衬底厚度对滤波器线宽的影响

Fig. 4 Effect of substrate thickness on linewidth of the filter while $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.8 \text{ nm},$
 $d_w=166.9 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_{AR}=165.8 \text{ nm}, d_g=50 \text{ nm}$

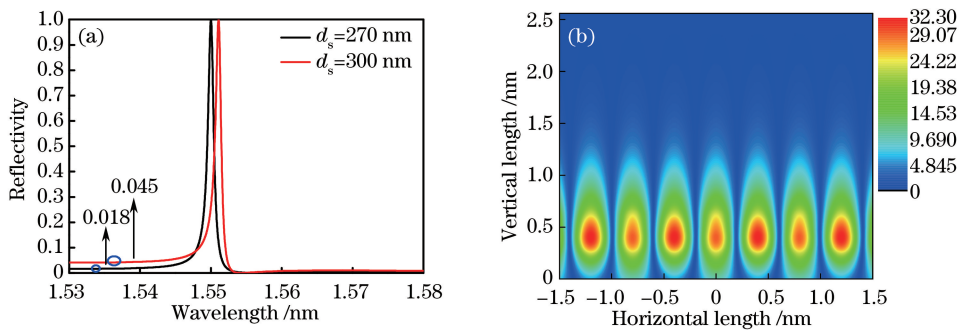


图 5 $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.68 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_g=165.8 \text{ nm}, d_{AR}=50 \text{ nm}$ 时,
 (a) 衬底厚度分别为 270 nm 和 300 nm 时滤波器的共振谱, (b) 衬底厚度为 270 nm 时的电场分布图

Fig. 5 (a) Resonance spectra of the filter with different substrate thicknesses of 270 nm and 300 nm,
 (b) electric field distributions with substrate thickness of 270 nm while $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.68 \text{ nm},$
 $d_w=166.9 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_g=165.8 \text{ nm}, d_{AR}=50 \text{ nm}$

3.3 液晶层对调谐范围的影响

前面已知液晶层厚度对滤波器的线宽影响微小,但是研究发现其厚度对滤波器的调谐范围影响很显著。WTGMF 的滤波波长调谐范围随着液晶层厚度的增加而增加,当液晶层厚度增加到一定值时滤波器的滤波调谐范围会趋于稳定,如图 6 所示。从图 6 可以看到,当液晶层厚度在 0~1000 nm 范围内变化时,滤波器的调谐范围随着液晶层厚度变化得非常显著;但是当厚度超过 1000 nm 后,调谐范围变化幅度就大幅下降,而且液晶层厚度到 1600 nm 后调谐范围几乎不再发生变化。

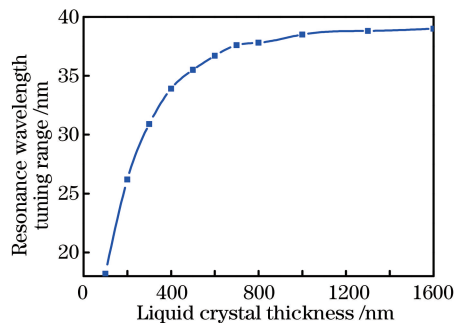


图 6 $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.68 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_s=270 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_{AR}=165.8 \text{ nm},$
 $d_g=50 \text{ nm}, d_c=270 \text{ nm}$ 时, 液晶层厚度对滤波器调谐范围的影响

Fig. 6 Influence of liquid crystal layer thickness on wavelength tuning range of the filter while $f=d/\Lambda=0.5,$
 $\Lambda=898.68 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_s=270 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_{AR}=165.8 \text{ nm}, d_g=50 \text{ nm}, d_c=270 \text{ nm}$

4 滤波器的调谐范围

通过前面结构参数对滤波器线宽和调谐范围的影响分析可以得到窄线宽大调谐范围的 WTGMF 的参数为 $f=0.5, \Lambda=898.68 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_s=270 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_{AR}=165.8 \text{ nm}, d_g=50 \text{ nm}, d_c=270 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}$ 。在该最优结构波导层和上电极通电后液晶分子会发生旋转而引起液晶折射率的变化,由此改变滤波器滤波波长,通过模拟计算可知波长调谐范围可以达到 39 nm,相比于文献[11]和[12],调谐范围有了显著提高,如图 7 所示。

在图 7 中同时可以发现,随着液晶折射率的升高滤波器的共振谱线宽会逐渐变窄,当液晶折射率为 1.51 时线宽为 1.21 nm,而当液晶折射率增加到 1.71 时线宽就减小到 0.67 nm,这是因为液晶是作为光栅的低折射率材料,液晶折射率发生变化就会使其调制强度发生变化,而由(3)式可知 $\Delta\epsilon$ 是在光波传播耦合波方程的耦合项中,其大小会影响滤波器线宽的大小,所以当液晶的折射率由 1.51 变化到 1.71 时光栅的调制强度也会相应变小,使耦合项变小进而使滤波线宽变窄^[17]。

$$\frac{dE_i^2(z)}{dz^2} + [k_0^2 n_{\text{eff}}^2(\text{TE1}) - k_0^2 (n_1 \sin \theta - i\lambda/\Lambda)^2] E_i(z) + k_0^2 \Delta\epsilon \sum_{h=1}^{\infty} \frac{\sin(h\pi\eta)}{h\pi} [E_{i-h}(z) + E_{i+h}(z)] = 0, \quad (3)$$

式中 $E_i(z)$ 是光栅第 i 级衍射波的振幅, n_1 和 n_{eff} 分别是光栅的低折射率和光栅的等效折射率, λ 和 θ 分别是入射波的波长和入射角, $k_0=2\pi/\lambda$, η 是光栅占空比(d/Λ)。

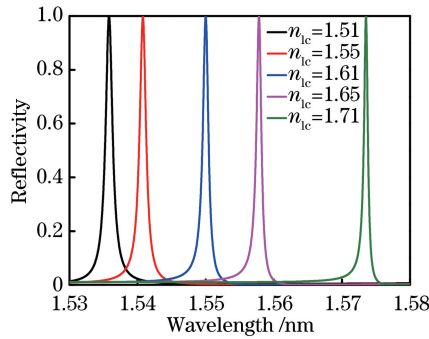


图 7 $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.68 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_s=270 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_{AR}=165.8 \text{ nm}, d_g=50 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}$, 液晶层施加不同电压时 WTGMF 的反射谱

Fig. 7 Reflectance spectra of WTGMF with different voltages applied on the liquid crystal layer while $f=d/\Lambda=0.5, \Lambda=898.68 \text{ nm}, d_w=166.9 \text{ nm}, d_s=270 \text{ nm}, d_e=40 \text{ nm}, d_{AR}=165.8 \text{ nm}, d_g=50 \text{ nm}, d_{lc}=1600 \text{ nm}$

5 结 论

利用 Rsoft 软件建立基于液晶的 WTGMF 结构,分析了减反层厚度、衬底厚度、液晶层厚度对 WTGMF 线宽和波长调谐范围的影响,得到了实现窄线宽大范围波长可调谐滤波器的结构参数。减反层厚度增加时滤波器的线宽会变窄,故此通过调节该参数可实现对滤波器线宽的控制。衬底厚度对于滤波器的线宽存在着一个最优值,该值能使滤波器线宽达到最窄。液晶层厚度对滤波器的线宽几乎没有影响,但是其厚度会显著影响滤波的波长调谐范围,随着液晶层厚度的增加波长调谐范围会逐渐增加最终达到一个固定值。将最优的 WTGMF 进行建模分析可以得出其波长调谐范围可以达到 39 nm,线宽最低可以达到 0.67 nm,这些数据与其他文献结果相比具有显著的提高。

参 考 文 献

- [1] Saarinen J. Guided-mode resonance filters of finite aperture[J]. Optical Engineering, 1995, 34(9): 2560-2566.
- [2] Liu W, Lai Z, Guo H, et al. Guided-mode resonance filters with shallow grating[J]. Optics Letters, 2010, 35(6): 865-867.

- [3] Wang C T, Hou H H, Chang P C, *et al.* Full-color reflectance-tunable filter based on liquid crystal cladded guided-mode resonant grating[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22892-22898.
- [4] Guo J C, Zuo Y H, Zhang L Z, *et al.* Simulation of silicon-based guided-mode resonant grating filters with narrow bandwidth for C-band optical communication[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(5): 663-668.
- [5] Mao Min, Huang Yongqing, Fang Wenjing, *et al.* Novel optical power splitter based on nonperiodic subwavelength high-index-contrast grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 010603.
毛敏, 黄永清, 房文静, 等. 基于非周期高折射率亚波长光栅的光功分器[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 010603.
- [6] Cox J A, Morgan R A, Wilke R M, *et al.* Guided-mode grating resonant filters for VCSEL applications[C]. *SPIE*, 1998, 3291: 70-76.
- [7] Magnusson R, Yoon J W, Amin M S, *et al.* Extraordinary capabilities of optical devices incorporating guided-mode resonance gratings: application summary and recent examples[C]. *SPIE*, 2014, 8988: 898801.
- [8] Kanamori Y, Ozaki T, Hane K. Fabrication of ultrathin color filters for three primary colors using guided-mode resonance in silicon subwavelength gratings[J]. *Optical Review*, 2014, 21(5): 723-727.
- [9] Guo Lingwei, Ma Jianyong. High-sensitive biosensor based on GMR in self-suspended grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1483-1487.
郭凌伟, 麻健勇. 基于导模共振效应的自支撑超灵敏生物探测器[J]. *光子学报*, 2012, 41(12): 1483-1487.
- [10] Fang C, Dai B, Li Z, *et al.* Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5302-5305.
- [11] Yang F, Yen G, Rasigade G, *et al.* Optically tuned resonant optical reflectance filter[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(9): 091115.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Wang Qiang. Study of tunable vertical-cavity surface-emitting lasers with liquid crystal[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
王强. 液晶可调谐垂直腔面发射激光器的设计和制备研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [15] Thienpont H, Panajotov K. Vertical-cavity surface-emitting laser with liquid crystal overlay[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 16749.
- [16] Liu Wenxing. Design and characterization of controllable line width guided-mode resonance filter [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
刘文兴. 可控线宽导模共振滤波器设计及其特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [17] Fu X, Yi K, Shao J, *et al.* Design of single-material guided-mode resonance filter[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(1): 9-11.