

基于亚波长光栅结构的微流控可调窄带滤波器设计与分析

毛强, 唐雄贵*, 孟方, 陈明, 梁珊

湖南师范大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410081

摘要 可调窄带滤波器是光学系统中的核心器件之一, 在光信号处理、光学传感等领域中有广泛的应用价值。基于亚波长光栅结构, 利用微流控技术, 提出了一种新型可调窄带滤波器的实现方法, 通过调控微流体通道中流体的折射率, 获得了大范围可调窄带滤波功能。采用严格模式理论对其光学性能进行了分析与模拟, 数值结果表明, 该器件波长调谐范围可达 28 nm, 其滤波带宽不大于 0.03 nm, 灵敏度 S 大于 $350 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 品质因数 Q 高达 50000, 光学性能优异。另外, 该新型器件具有结构简单、易于制作、调控简便等诸多优点, 在生物传感、化学分析等领域具有广阔的应用前景。

关键词 光学器件; 微流控光子学; 可调滤波器; 严格模式理论; 亚波长光栅

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.042301

Tunable Narrow-Band Filter with Sub-Wavelength Grating Structure by Micro-Optofluidic Technique

Mao Qiang, Tang Xiongguai*, Meng Fang, Chen Ming, Liang Shan

College of Physics and Electronic Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China

Abstract The tunable optical narrow-band filter is one of the key components in an optical system, which has a wide application in many fields such as optical signal processing and optical sensing. A novel scheme for a widely tunable narrow-band filter is proposed using the micro-optofluidic technology and based on a sub-wavelength grating structure, in which a wide-range adjustable narrow-band filtering function is achieved by adjusting the refractive index of mixed liquid in the micro-fluidic channel. The optical performance is numerically investigated using the rigorous mode theory and the simulation results show that the tunable wavelength range of the designed device is over 28 nm, the filtering bandwidth is less than 0.03 nm, the sensitivity S is over $350 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, and the quality factor Q is over 50000, indicating that the performance is superior. Moreover, the proposed novel device has many advantages such as simple structure, ease for fabrication and large fabrication tolerance, which is very useful in the fields of bio-sensing, chemical analysis and others.

Key words optical devices; micro-optofluidics; tunable filter; rigorous mode theory; sub-wavelength grating

OCIS codes 230.7408; 120.2440; 050.2770

1 引言

近年来,微流控光子器件引起了国内外学者的广泛关注与重视,且发展十分迅速。这种新型器件通过调控流体的折射率或改变流体表面形状实现性能的调控,具有设计灵活、调控范围大、操控简单、易

于集成等突出优点,在光信号处理、化学分析、生物传感、环境监测与食品安全等诸多领域^[1-5]有广泛的应用需求。微流控技术与微纳光子技术的快速发展以及交叉融合为探索微流控光子器件提供了技术保障,广阔的市场需求为其发展提供了驱动力量。到目前为止,各国科研工作者已经提出了许多不同的

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-08-29; 录用日期: 2018-09-06

基金项目: 湖南省自然科学基金(2016JJ2087)、湖南师范大学青年科学基金

* E-mail: tangxg@hunnu.edu.cn

微流控光学器件实现方法,如微流控变焦透镜^[6-9]、微流控波导激光器^[10-11]、微流控可调光功率分束器^[12]、微流控可调光衰减器^[13]等。这种新型器件明显不同于“静态型”光子功能器件,不仅能用于搭建新的光学系统,产生新的应用,同时也丰富和发展了微纳光子学的研究内涵。

可调光滤波器是光信号处理、光通信和光学传感领域中的关键器件之一,可用于光波分复用,以提高通信容量,降低通信成本;也可用作传感器,实现对温度、压力、折射率等物理量的精确测量。由于微流控技术具有调控简便、设计灵活、应用需求广等优势,近年来,在微流控光子系统中,人们积极探索滤波带宽更窄、调谐范围更大的滤波器,这已成为该领域的研究热点和发展方向。目前,基于微流控技术的可调滤波器因具有调控简便、设计自由度多、应用需求广等优势而引起了科研工作者的广泛关注。已报道的可调滤波器的实现方案有多种,如微环谐振型^[14]、布拉格微腔型^[15]、金属-绝缘体-金属(MIM)波导型^[16]、光栅型^[17-18]等。这些方案虽能实现调谐滤波功能,但存在调谐范围小、滤波带宽大、灵敏度低或制作难度大等缺点,从而严重影响了器件的光学性能,限制了其实际应用范围。因此,设计

新型器件结构,采用新的调控方法,探索大动态范围的微流控可调窄带滤波器具有重要的科学意义与应用价值。

本文采用亚波长光栅结构,利用微流控技术,采用严格模式理论研究其滤波特性,提出了一种新型可调窄带滤波器的实现方法。该方法具有调控范围大、带宽小、易于调控、灵敏度高和品质因数高等优点,在生物光子传感、化学分析、环境监测等领域中具有广阔的应用前景。

2 结构与工作原理

可调滤波器的结构示意图如图 1 所示,其中图 1(a)为器件的三维结构图,图 1(b)为器件俯视图,图 1(c)为器件横截面图。由图可见,该器件由两个完全相同的亚波长光栅与微流体通道构成,光栅的周期为 T ,槽深为 H ,占宽比为 f ,两个光栅之间的间距为 w ,入射角为 θ ,基底的折射率为 n_s ,光栅区介质折射率为 n_h ,微流体通道内流体折射率为 n_l (浅灰色区域为流体),液体折射率 n_l 可通过控制输入孔 A、B 处流体浓度与流速来改变,即通过改变光栅结构参数,可实现对光栅光学性能的动态调控。

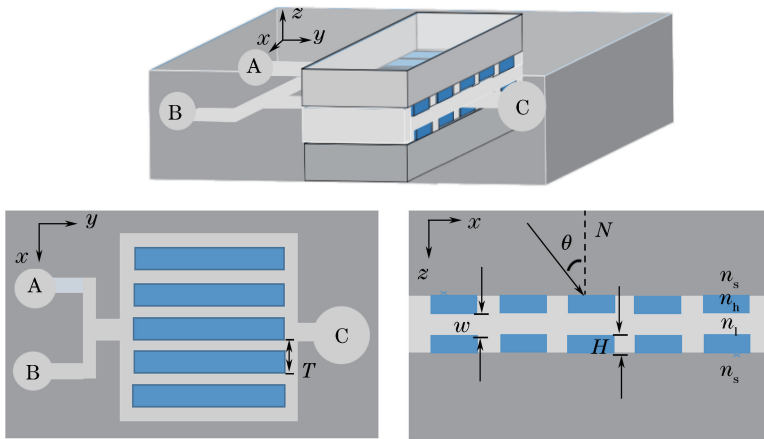


图 1 可调滤波器结构示意图。(a)三维结构图;(b)俯视图;(c)横截面图

Fig. 1 Structural diagram of the tunable filter. (a) 3D structure; (b) top view; (c) cross section

由于该器件是一种亚波长光栅结构,这里采用严格模式理论研究其滤波特性。严格模式理论可广泛用于分析亚波长光栅结构的衍射特性,具有物理概念清晰、数值计算量小、数值计算稳定^[19]等优点。光波入射到光栅表面,会发生反射与透射,由严格模式理论可知,在光栅中光场分布可分解成不同平面波的线性叠加,因此可将第 l 层中电磁基本模式场用傅里叶级数展开,表达式为

$$[\sigma \mathbf{E}; \mathbf{H}]_l = [E_{x,m}, E_{y,m}, E_{z,m}; -H_{x,m}, H_{y,m}, H_{z,m}]_l \times \exp\{ik_0 [\alpha_m x + \gamma(z - z_n)]\}, \quad (1)$$

式中: $\sigma = \sqrt{u_0/\epsilon_0}$; $\alpha_0 = \sin \theta$; $\alpha_m = \alpha_0 + m\lambda/T$ ($m = 0, \pm 1, \dots, \pm K$); γ 为待求的未知量,表征波矢的 z 分量; l 为光栅的水平分层号; m 为傅里叶模级次; E 和 H 分别为电场强度和磁感应强度。同理,将介电常数也进行傅里叶级数展开,并采用“逆规则”傅

里叶因式分解法提高数值计算的收敛速度^[20]。将展开后的傅里叶级数代入麦克斯韦方程组,并进行整理。对于 TE 波,其矩阵方程组为

$$\begin{cases} \{[\epsilon] - \alpha^2\} \mathbf{E}_y = \gamma^2 \mathbf{E}_y \\ \mathbf{H}_x = \gamma \mathbf{E}_y \\ \mathbf{H}_z = \alpha \mathbf{E}_y \end{cases}, \quad (2)$$

对于 TM 波,其矩阵方程组为

$$\begin{cases} \{\mathbf{I} - \alpha [\epsilon]^{-1} \alpha\} \mathbf{H}_y = \lambda^2 [\epsilon^{-1}] \mathbf{H}_y \\ \mathbf{E}_y = \gamma [\epsilon^{-1}] \mathbf{H}_y \\ \mathbf{E}_z = [\epsilon]^{-1} \alpha \mathbf{H}_y \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $[\epsilon]_{mm} = (T)^{-1} \int_l \epsilon(x) \exp[-i2\pi(T)^{-1}(m-n)x] dx$, 其中 m, n 为整数。通过求解矩阵方程组(2)、(3)式,可得到第 l 水平分层的本征值 $\gamma_e^{(l)}, \gamma_h^{(l)}$, 和本征矩阵 $\mathbf{e}_y^{(l)}, \mathbf{h}_y^{(l)}$ (下标 e, h, y 分别代表电场、磁场部分和 y 方向分量), 这些模式场解的线性叠加就是该水平分层电磁场的通解。对于 TE 波,其通解为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_y^{(l)} = & \mathbf{e}_y^{(l)} \exp(ik_0 \alpha x) \{ \exp[ik_0 \gamma_e^{(l)}(z - z_l)] \mathbf{u}_+^{(l)} + \\ & \exp[-ik_0 \gamma_e^{(l)}(z - z_l)] \mathbf{d}_+^{(l)} \}, \quad (4) \end{aligned}$$

对于 TM 波,其通解为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_y^{(l)} = & \mathbf{h}_y^{(l)} \exp(ik_0 \alpha x) \{ \exp[ik_0 \gamma_h^{(l)}(z - z_l)] \mathbf{u}_+^{(l)} + \\ & \exp[-ik_0 \gamma_h^{(l)}(z - z_l)] \mathbf{d}_+^{(l)} \}, \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{u}_+^{(l)}, \mathbf{d}_+^{(l)}$ 分别为上行波、下行波振幅系数矩阵,具体大小由边界条件来确定。根据反射效率和透射效率的定义,第 m 级的反射效率 $\eta_m^{(r)}$ 和透射效率 $\eta_m^{(t)}$ 分别为(上标 r 和 t 分别代表反射和透射部分)

$$\begin{cases} \eta_m^{(r)} = \frac{\overline{S}_{mz}^{(r)}}{\overline{S}_{1z}}, \\ \eta_m^{(t)} = \frac{\overline{S}_{mz}^{(t)}}{\overline{S}_{1z}}, \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\overline{S}_{1z}, \overline{S}_{mz}^{(r)}, \overline{S}_{mz}^{(t)}$ 分别为第一层的入射波、第 m 级反射波和第 M 层中第 m 级透射波在 z 方向上的能流的平均值,其详细推导请参见文献[19-21]。

对于亚波长光栅,通过合理设计结构参数,选择合适的入射条件,光栅衍射会产生共振异常,这是一种独特的光学现象^[22]。在其物理机制上可解释为:外部传播的衍射场和受调制波导所支持的“泄漏波”所产生的匹配耦合导致其衍射光场发生突变,表现出窄带、高衍射效率、很强的波长依赖性和角度敏感性等性能^[22-23],因而巧妙利用该衍射特性,可实现窄带滤波。对于所设计的器件结构,其流体折射率可通过

改变注入液体的浓度进行调控,或通过微流体泵改变液体流速进行调控,从而移动反射谱和透射谱的中心波长,获得大范围可调控的窄带滤波。若微流体通道中流体的折射率变化量为 Δn 时,器件透射谱输出中心波长为 λ_0 ,能够实现的调谐范围为 $\Delta \lambda$,其输出光谱的半峰全宽(FWHM)为 $\partial \lambda$,从而器件的灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n}, \quad (7)$$

其品质因数 Q 为

$$Q = \frac{\lambda_0}{\partial \lambda}. \quad (8)$$

这些技术参数是衡量器件光学性能的重要指标,同时也是设计器件的评价函数。对于所设计的器件,可采用干涉光刻和反应离子蚀刻方法制备光栅结构,然后利用湿法蚀刻方法制作微流体通道的液体注入孔和输出孔,接着采用紫外固化胶进行封装。这些都是传统微细加工方法,其详细工艺过程这里不再赘述。

3 计算模拟与分析

针对所提出的可调滤波器,基于严格模式理论,编写了模拟仿真程序,对其光学性能进行分析。这里采用近红外光为入射光,其波长范围为 1525~1565 nm,偏振态为 TM 波,入射平面在 xz 平面,入射角 θ 为 1° 。光栅周期为 T ,槽深为 H ,占空比 f 分别为 0.60, 0.45, 0.75, 间距 w 为 0.80 μm ,光栅基底材料的折射率为 1.50,光栅层介质为单晶硅,其折射率为 3.48。微流体采用蔗糖溶液,通过控制流体浓度与流速,使其折射率变化范围为 1.33~1.41。图 2 为透射谱和透射峰 FWHM 随微流体折射率变化关系。图 2(a)表示微流体折射率分别为 1.33, 1.35, 1.37, 1.39, 1.41 时的透射谱,其透射光谱的中心波长分别为 1530.921, 1538.055, 1545.077, 1552.664, 1559.347 nm,其峰值透过率分别为 0.9982, 0.9947, 0.9991, 0.9997, 0.9996, 透过率变化很小。

由图 2(a)可知,随着流体折射率逐渐增大,透射谱中心波长向长波方向移动,其透射谱中心波长调谐范围可达 28 nm。图 2(b)为透射谱 FWHM 随微流体折射率的变化关系,在透射谱中心波长位置发生移动的过程中,其滤波带宽变化很小,始终小于 0.03 nm。利用(7)式和(8)式,可求得滤波器的灵敏度 S ,大小约为 350 nm·RIU⁻¹ (RIU 为单位折射率),品质因数 Q 始终大于 50000。另外,透射谱中

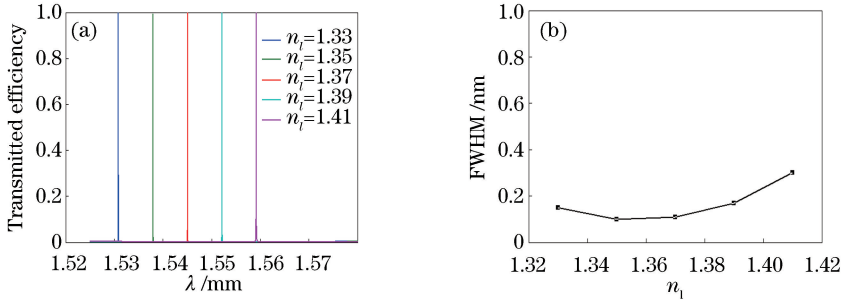


图 2 透射谱和透射峰半峰全宽随微流体折射率变化关系。(a)透射谱;(b)透射峰半峰全宽
Fig. 2 Transmission spectrum and FWHM of transmission peak versus refractive index of micro-fluid.

(a) Transmission spectrum; (b) FWHM of transmission peak

心波长与流体折射率变化关系如图 3 所示,由图可见,这种变化基本呈线性关系,这不仅有利于对透射谱中心波长实现精确控制,还可实现对流体浓度或

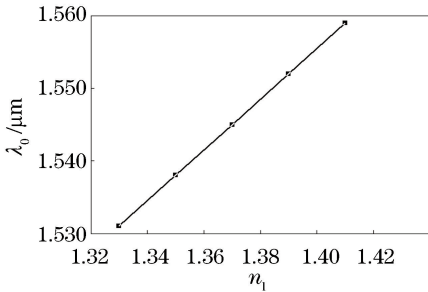


图 3 透射谱中心波长随微流体折射率的变化关系

Fig. 3 Central wavelength of transmission spectrum versus refractive index of micro-fluid

折射率的精确测量。

通常,在器件的制作过程中,存在一定的工艺误差,因而需要分析误差对器件光学性能的影响。这里分别讨论光栅间距 w 、光栅周期 T 、槽深 H 的工艺误差对其调控性能的影响。透射谱随器件结构参数的变化关系如图 4 所示。为了简化,这里假设微流体折射率为 1.37,其他参数与图 2 中的参数相同,当间距 w 分别为 0.76,0.78,0.80,0.82,0.84 μm 时,计算结果如图 4(a)所示;当参数与图 2 中的参数相同,光栅槽深 H 分别为 0.440,0.445,0.450,0.455,0.460 μm 时,其计算结果如图 4(b)所示;当其他参数与图 2 中的参数相同,光栅周期 T 分别为 0.590,0.595,0.600,0.605,0.610 μm 时,其计算结果如图 4(c)所示。

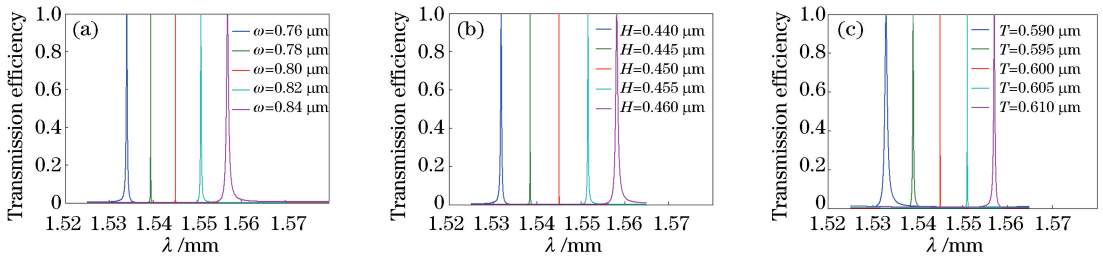


图 4 透射谱随器件结构参数的变化。(a)光栅间距 w ;(b)光栅槽深 H ;(c)光栅周期 T

Fig. 4 Transmission spectrum versus structural parameters of device. (a) Grating gap distance w ; (b) grating depth H ; (c) grating period T

由图 4 的模拟结果可以看出,光栅间距 w 、槽深 H 和周期 T 的工艺误差会使得透射谱中心波长的位置发生一定漂移,且移动方向相同。光栅间距 w 从 0.76 μm 变化到 0.84 μm 时,透射谱中心波长移动范围接近 23 nm;当光栅槽深 H 从 0.440 μm 变化到 0.460 μm 时,透射谱中心波长移动范围接近 26 nm;当周期 T 从 0.590 μm 变化到 0.610 μm 时,透射谱中心波长移动范围接近 24 nm。虽然工艺误

差会引起透射谱中心波长发生一定的移动,但通过适当调控微流体通道中液体折射率或微调入射角,可以补偿因工艺误差所造成透射谱中心波长的漂移,使其输出中心波长满足设计要求,这在一定程度上降低了工艺制作难度。另外,由图 4 可知,工艺误差对透射谱中心波长透过率影响很小,其透过率峰值始终接近 100%,这有利于光能量的充分利用,提高了器件的光学性能。

4 结 论

提出了一种新型可调谐窄带滤波器的实现方法,该器件基于亚波长光栅结构,利用微流体调控技术,通过改变液体的折射率,实现了输出波长的动态调控。采用严格模式理论,对该器件滤波性能进行模拟分析,模拟结果表明:该器件不仅具有动态调谐范围大、滤波带宽窄、透过率高、灵敏度和品质因数均较高的特点,而且器件具有结构简单、调控简便、易于制作、成本低等优点。因此,这种新型可调谐窄带滤波器在化学分析、生物传感、医学诊断等领域应用前景广阔。

参 考 文 献

- [1] Takao H, Ishida M. Microfluidic integrated circuits for signal processing using analogous relationship between pneumatic microvalve and MOSFET [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4): 497-505.
- [2] White I M, Yazdi S H, Yu W W. Optofluidic SERS: synergizing photonics and microfluidics for chemical and biological analysis [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2012, 13(2): 205-216.
- [3] Sun T, van Berkel C, Green N G, *et al.* Digital signal processing methods for impedance microfluidic cytometry[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6(2): 179-187.
- [4] Pang L, Chen H M, Freeman L M, *et al.* Optofluidic devices and applications in photonics, sensing and imaging [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(19): 3543-3551.
- [5] Guan K M, Liu J Q, Xu Y, *et al.* Efficient pulsed laser ablation in liquid based on microfluidic technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402006.
关凯珉, 刘晋桥, 徐颖, 等. 基于微流控技术的高效液相脉冲激光烧蚀法[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402006.
- [6] Wu W T, Liang Z C, Zhang L. Optofluidic varifocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(6): 718-723.
吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐. 可控微流控光学变焦透镜[J]. *发光学报*, 2015, 36(6): 718-723
- [7] Mao X L, Waldeisen J R, Juluri B K, *et al.* Hydrodynamically tunable optofluidic cylindrical microlens[J]. *Lab on a Chip*, 2007, 7(10): 1303-1308.
- [8] Shi J J, Stratton Z, Lin S C S, *et al.* Tunable optofluidic microlens through active pressure control of an air-liquid interface [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9(2/3): 313-318.
- [9] Seow Y C, Liu A Q, Chin L K, *et al.* Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(8): 084101.
- [10] Helbo B, Kristensen A, Menon A. Amicro-cavity fluidic dye laser[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, 13(2): 307-311.
- [11] Gersborg-Hansen M, Balslev S, Mortensen N A, *et al.* A coupled cavity micro-fluidic dye ring laser[J]. *Microelectronic Engineering*, 2005, 78-79: 185-189.
- [12] Tang X G, Liang S, Li R J. Design for controllable optofluidic beam splitter [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2016, 18: 23-30.
- [13] Tang X G, Li R J, Liao J K, *et al.* A scheme for variable optofluidic attenuator: Design and simulation [J]. *Optics Communications*, 2013, 305: 175-179.
- [14] Levy U, Campbell K, Groisman A, *et al.* On-chip microfluidic tuning of an optical microring resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(11): 111107.
- [15] Fang C L, Dai B, Xu Q, *et al.* Optofluidic tunable linear narrow-band filter based on Bragg nanocavity [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-8.
- [16] Yu Z, Liang R S, Chen P X, *et al.* Integrated tunable optofluidics optical filter based on MIM side-coupled-cavity waveguide [J]. *Plasmonics*, 2012, 7(4): 603-607.
- [17] Li Z G, Yang Y, Zhang X M, *et al.* Tunable visual color filter using microfluidic grating [J]. *Biomicrofluidics*, 2010, 4(4): 043013.
- [18] Xiao G H, Zhu Q Z, Shen Y, *et al.* A tunable submicro-optofluidic polymer filter based on guided-mode resonance[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(8): 3429-3434.
- [19] Tang X G, Fu K X, Wang Z H, *et al.* Analysis of rigorous modal theory for arbitrary dielectric gratings made with anisotropic materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 774-779.
唐雄贵, 傅克祥, 王植恒, 等. 任意各向异性介质光栅的严格模式理论分析[J]. *光学学报*, 2002, 22(7): 774-779.
- [20] Li L F. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures [J]. *Journal of the*

- Optical Society of America A, 1996, 13(9): 1870-1876.
- [21] Fu K X, Wang Z H, Zhang D Y, *et al.* A modal theory and recursion RTCM algorithm for gratings of deep grooves and arbitrary profile [J]. Science in China Series A: Mathematics, 1989, 42(6): 636-645.
- [22] Fu K X, Wang Z H, Zhang Q, *et al.* The resonance peak theory of reflection guided-mode resonance filters[J]. Chinese Journal of Lasers B, 1999, 8(4): 313-321.
- [23] Tang X G, Du C L. Analysis of nonpolarizing narrow-band filters based on resonant anomaly [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 668-672.
唐雄贵, 杜春雷. 基于共振异常的消偏振型窄带滤波器分析[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 668-672.