

文章编号 1004-924X(2007)04-0467-06

平面波导窄带干涉滤波方法的研究

李小奇^{1,2}, 孙德贵¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 基于多层膜干涉滤波的理论提出了一种在平面波导通道中进行干涉滤波的新方法, 这种方法可以使窄带滤波器完全集成在波导通道中, 实际上就是波导通道的一部分。根据这种方法优化设计了两种波导干涉滤波器单元器件, 并且以27层开放式波导干涉滤波器双腔结构为例, 计算了垂直入射时的输出光谱和单腔结构滤波后的场强分布。最后, 分别分析了滤波器的波导膜的材料、厚度和信号入射角度对输出光谱的峰值透过率、通带半宽度、消光比以及有效区域的影响, 提出了进一步优化的方向。这种在平面波导通道中直接进行窄带滤波的技术将在光通信、光传感和光信息处理等很多方面有广泛的应用。

关键词: 集成光学; 光开关; 波导滤波器; 干涉滤波; 透射光谱

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A

Investigation on interference filter within planar waveguides

LI Xiao-qi^{1, 2}, SUN De-gui¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A new narrow-band filtering method based on the theory of multi-layer thin-film optical interference is proposed. A multi-layer interference filter is integrated within a waveguide channel completely in this scheme, so it is actually a part of the waveguide. Two different structures of waveguide interference filters are investigated and the output spectrum of a two-cavity structure with 27 periodic layers and the field distributions of a single-cavity structure are calculated. Finally, by changing the materials and structure, the influence of refractive index, thickness of waveguide thin-film layer and incident angle on peak transmittance, peak width at half-maximum, extinction ratio and effective area are analyzed. and the direction for further development is given too.

Key words: integrated optics; optical switch; waveguide filter; interference filter; transmission spectrum

1 引言

光学滤波器是光通信、信息处理和光计算中广泛应用的器件,且长期以来就在以波分复用(WDM)技术为核心的现代光通信、光传感和信息处理网络中发挥着重要的作用,尤其窄带滤波器更是波分复用/解复用器和光插/分复用器(OADM)系统中必不可少的器件^[1]。窄带滤波器不仅应用在光学系统中,有时还直接应用在激光器、光学探测器和调制器等核心器件中来提高器件效率和灵敏度等。在传统的光通信系统中,窄带滤波器不仅用于 OADM 中的信号过滤,而且还用于与光纤相结合构成低通道数的波分复用和解复用器件,属于粗波分复用(CWDM)系统的核心器件^[2]。上个世纪 90 年代,由于光纤放大器的出现和有效应用,光纤通信得到了前所未有的高速发展,并期望增加光纤放大器有效区域内的容量,因此出现了密集波分复用(DWDM)技术^[3-5]。

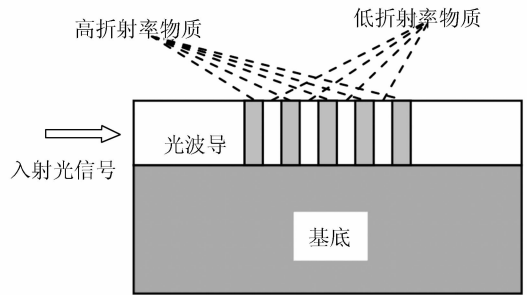
近年来,光传感技术的应用与发展和光纤通信的普及使 CWDM 技术和系统又找到了新的应用环境和发展空间,CWDM 与 DWDM 技术和系统以优势互补的形式在光通信、光传感和光信息处理等领域发挥着越来越大的作用。然而,不论是 CWDM 系统,还是 DWDM 系统,实现信号分离和选择的过程都是由分立的波分复用/解复用器件和干涉滤波器组合来完成的,经常造成系统的体积复杂、光学损耗大和系统成本高等不利效果^[3-6]。因此,研制一种简单有效的集成器件应用于 WDM 系统非常重要。随着近年来微电子制作工艺水平的提高,纳微米量级的高折射率差波导的研制取得了很大成功,多层膜干涉滤波理论完全应用于波导领域也成为可能。本文据此提出并研究了一种新型的滤波器:波导干涉滤波器,通过用特殊的波导结构来代替传统的薄膜,使光信号在波导内传播的过程中直接实现滤波,从而更大程度地提高器件集成度。迄今为止,国内外尚未见到有类似工作的报道。

2 理论分析

2.1 基本结构与基本功能

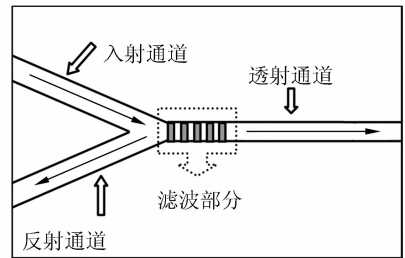
一个在波导通道上形成的多层膜干涉滤波器

的剖面结构如图 1(a)所示,其多层膜垂直于波导通道,由微电子刻蚀而成的,各膜层由交替的高折射率材料(图中的加深部分)和低折射率材料(图中未加深部分)制成,每个膜层的厚度是中心波长的 $1/4$ 或 $1/4$ 加上波长的整数倍,形成一个对称干涉滤波器结构。图 1(b)是波导滤波器单元结构的俯视图,两条倾斜的波导通路分别是入射光通道和反射光通道,水平的波导通路为透射光出射通道。虚线框内为有效的滤波部分,图 1(a)就是这部分的剖面示意图。由于这部分既起到干涉滤波器中多层膜的作用,同时又是波导,所以称其中的各个膜层为“波导膜”。



(a) 剖视图

(a) cutaway view



(b) 俯视图

(b) planform

图 1 波导干涉滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of waveguide interference filters' structure

2.2 设计原理

最基本的波导干涉滤波器是根据法布里-珀罗多光束干涉仪的原理制成的干涉波导膜系。按最初的形式,法布里-珀罗干涉仪是由两块相同的、间距为 d 的平行反射板组成。对于平行光线,除了某一特定的很窄的一段波长透射以外,其余所有波长的透射率都很低。在波导通路中,完

全可以用波导膜组合来实现反射板的功能。

下面简要地分析法布里-珀罗干涉仪的特性,这些对于波导干涉滤波器也同样适用。表征滤波特性的主要参数有:峰值波长 λ_0 ;峰值波长透射率 T_{\max} ;通带半宽度 $2\Delta\lambda$ 。透射率公式表示为

$$T = T_0 / (1 + F \sin^2 \theta), \quad (1)$$

这里 $T_0 = T_1 T_2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2$,

$$F = 4\sqrt{R_1 R_2} / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2, \quad (2)$$

$\theta = (\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta) / 2$ 。式中 R_1, R_2, T_1 和 T_2 分别为两反射膜(由波导组成)的反射率和透射率, φ_1, φ_2 为反射膜的反射相移,而 $\delta = 2\pi n d / \lambda$ 为间隔层的相位厚度。透射率的极大值的位置,即中心波长由此式确定:

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + [(\varphi_1 + \varphi_2) / 2\pi]} \quad (k = 0, 1, \dots), \quad (3)$$

通带半宽度是在峰值透射率 1/2 处的通带宽度:

$$2\Delta\lambda = \frac{2\lambda_0}{m\pi} \sin^{-1} \frac{1 - \sqrt{R_1 R_2}}{2\sqrt{R_1 R_2}}, \quad (4)$$

中心波长的峰值透射率为:

$$T_{\max} = \frac{T_1 \cdot T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}, \quad (5)$$

这种波导干涉滤波器实质是一个多层膜干涉系统,因此它的透射光谱可用多膜干涉的透射率公式来计算^[7]:

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (6)$$

其中 B 和 C 可由式

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{r=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_r & (j \sin \delta_r) / \eta_r \\ j \eta_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \text{ 得到,}$$

其中

$$N_r = n_r - jk_r$$

$$\delta_r = \frac{2\pi}{\lambda} N_r d_r \cos \theta_r =$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} d_r (n_r^2 - k_r^2 - N_0^2 \sin^2 \theta_0 - 2jn_r k_r)^{\frac{1}{2}}$$

s 偏振: $\eta_r = N_r \cos \theta_r =$

$$(n_r^2 - k_r^2 - N_0^2 \sin^2 \theta_0 - 2jn_r k_r)^{\frac{1}{2}}$$

p 偏振: $\eta_r = \frac{N_r}{\cos \theta_r} =$

$$\frac{n_r^2 - k_r^2 - 2jn_r k_r}{(n_r^2 - k_r^2 - N_0^2 \sin^2 \theta_0 - 2jn_r k_r)^{\frac{1}{2}}}$$

上述公式中, N_r, n_r, δ_r, k_r 和 d_r 分别是光学导纳、折射率、光学位相、消光系数和膜厚, θ_r 是光线在

薄膜中的角度, λ 是空气中波长, r 表示膜层的序号。

3 器件设计

传统的多层膜滤波技术中,通常采用 $\lambda/4$ 厚度的薄膜,但是由于目前刻蚀技术的限制,还无法达到此厚度,因此本文中波导膜的厚度采用 n 个波长倍加 $\lambda/4$ 的方法。制作波导滤波器单元件时,在原波导通路上垂直于波导传播方向刻蚀出相应数量的槽,然后在槽内填充折射率 3.45 的 Si,与折射率 1.44 的原波导中的 SiO_2 形成波导多层膜滤波部分,最后在上部覆盖包层,可完成制作过程。

图 2(a) 给出的是最基本的波导滤波器的单元件结构设计图,波导 1 表示入射信号通路,2 和 3 分别表示反射和透射通路,滤波部分是一个 27 层波导膜的双腔体结构^[8]。此种设计中,由于滤波部分的波导并不是横向的无限区域,因此光信号不仅在不同折射率波导膜的交界面发生反射,在波导通路的侧壁也有反射现象存在,从而改变了部分反射光信号的方向,即有部分光信号将沿原入射光信号的波导通道返回,引起损耗。针对图 2(a) 设计中出现的问题,提出了如图 2(b) 所示的滤波器结构,同样通道 1 表示入射信号通路,通道 2 和 3 分别表示反射和透射的出射信号通道。采用这种结构设计,当信号到达滤波部分时可以认为是垂直入射光,因此反射光线的方向也是垂直的,将直接由通道 2 出射,不会出现之前的问题。

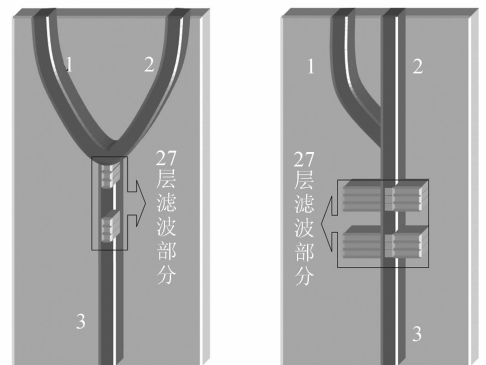


图 2 波导干涉滤波器设计图

Fig. 2 Plan of waveguide interference filters

最后,确定波导通路为宽度 $4\ \mu\text{m}$,深度 $2\ \mu\text{m}$ 的单矩形波导。滤波部分使用 Si 和 SiO_2 的波导膜厚度分别为 $1\ 010.87\ \text{nm}$ 和 $1\ 345.49\ \text{nm}$,中心层的 Si 层的厚度为 $4\ 492.75\ \text{nm}$ 。

4 结果与讨论

4.1 输出光谱和场分布

对图 2(b)所示结构的滤波器,经过计算所得透射输出如图 3 所示。根据计算,输出信号的主峰透射率为 $-1.198\ 6\ \text{dB}$,通带半宽度 $2\Delta\lambda$ 为 $0.118\ 7\ \text{nm}$ 。由于通信所用光信号为高斯光束,本文对高斯光束通过单腔体的该结构滤波器后的场强分布进行了计算^[9,10],所得结果如图 4 所示,图中 X 轴和 Y 轴分别表示波导的宽度和深度方向,Z 轴代表电场强度。

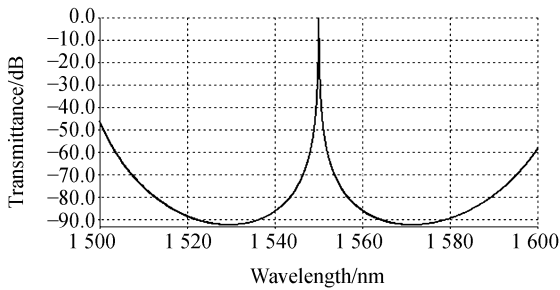


图 3 27 层波导干涉滤波器输出光谱

Fig. 3 Transmission spectra of a waveguide interference filter with 27 waveguide thin-films

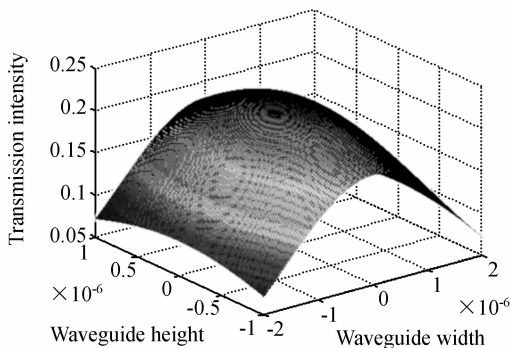


图 4 单腔结构透射光场分布

Fig. 4 Transmission field of a single cavity structure

4.2 影响输出光谱的因素

根据波导干涉滤波器所使用材料和设计结构的差异,分别改变波导膜的材料、厚度和信号入射

角度,计算了对波导滤波器性能的影响。

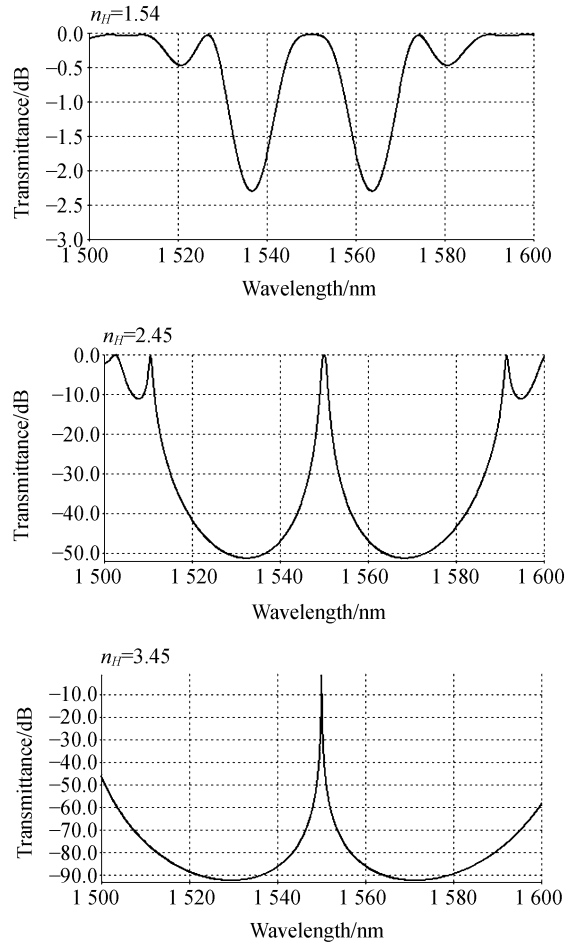


图 5 变折射率的输出光谱对比

Fig. 5 Transmission spectra with different refractive indexes

设定低折射率为 1.44 的波导膜不变,逐渐改变高折射率波导膜的折射率,使 n_H 分别为 1.54、2.45 和 3.45,得到图 5 中的三个输出光谱。可以看出,增大折射率差有利于减小主峰的通带半宽度,同时增加最大消光比和有效工作区域。

设定高折射率为 3.45,取三个高折射率膜层厚度分别为 $4\lambda + \lambda/4$ 、 $3\lambda + \lambda/4$ 和 $2\lambda + \lambda/4$,三个低折射率膜层厚度分别为 $3\lambda + \lambda/4$ 、 $2\lambda + \lambda/4$ 和 $\lambda + \lambda/4$ 。通过对他们的组合,获得了输出光谱如图 6。虽然随着膜层厚度的增加,消光比和有效工作区域逐渐得到不同程度的改善,但主峰通带半宽度却同时变大。而且,膜厚的选择还受制造工艺等实际情况的限制,所以也并不是越薄越好。

采用改进后的图 2(b)的设计方式时,入射光信号均为垂直方向,这有利于减小反射出射信

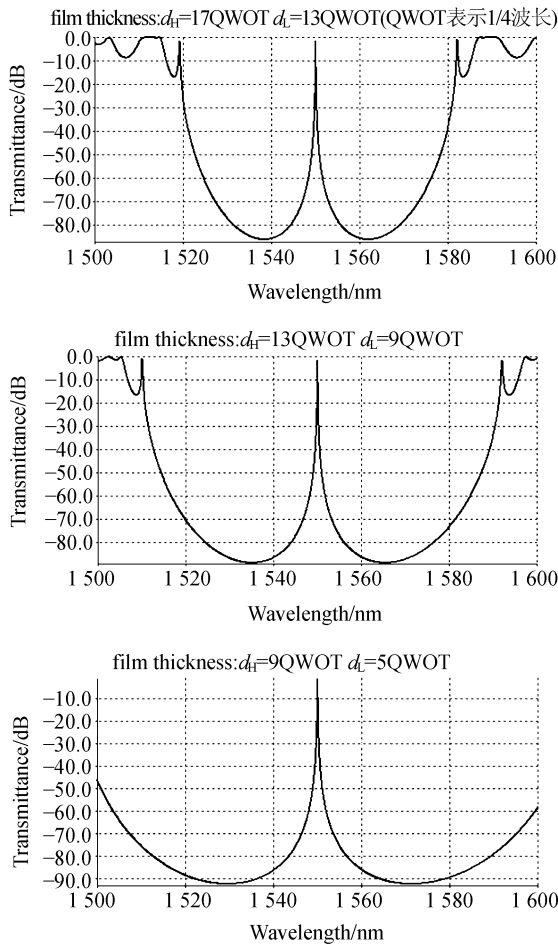


图 6 变膜厚的输出光谱对比

Fig. 6 Transmission spectra with different film thicknesses

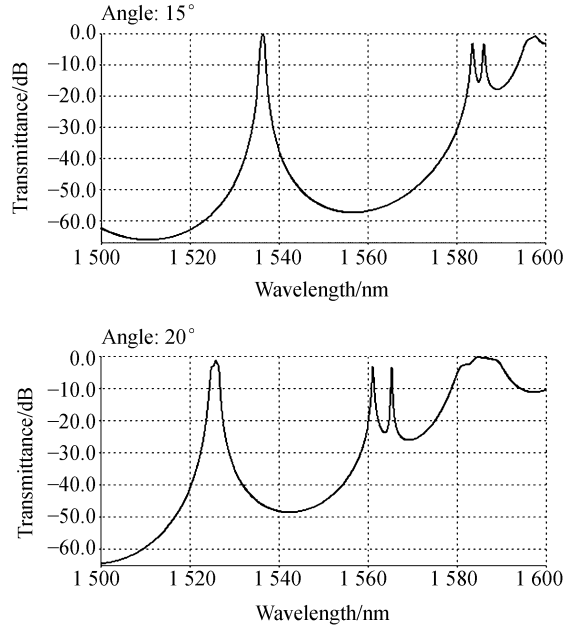
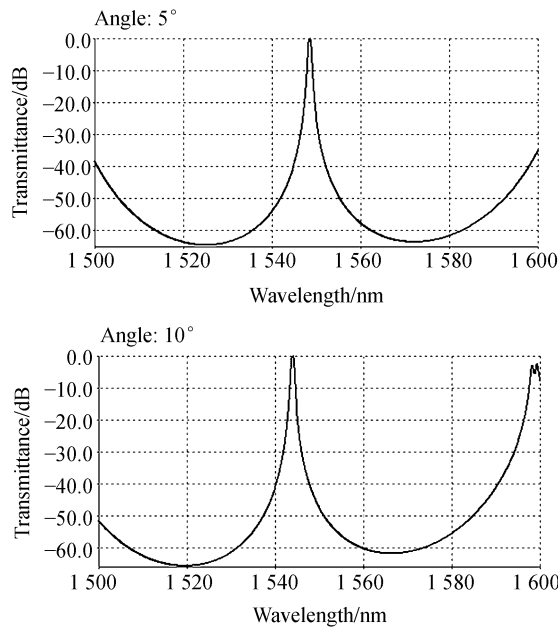


图 7 变入射角度的输出光谱对比

Fig. 7 Transmission spectra with different incident angles

号的损耗。但是,并不排除在实际应用中涉及到以一定角度入射的情况,甚至有可能出现角度可变的情况。图 7 中的 A、B、C 和 D 分别表示信号以与法线成 5°,10°,15°和 20°角入射时的输出光谱。由于 27 层结构的输出光谱的主峰通带半宽度太小,改变入射信号方向时,在光谱图上的变化不易用眼睛直接观察出来,所以在研究这方面的问题时,采用的是 19 层的双腔体结构,这样各方面的变化都更容易直接从图中观察。27 层结构与它的规律完全相同。

5 结 论

本文给出了平板窄带波导干涉滤波器的设计方法,并对开放式波导干涉滤波器的滤波特性进行了详细的理论分析和数值模拟。计算结果表明,所设计的这种器件具有优良的滤波性能。具体而言,对于单信道的滤波单元,当采用 27 层双腔体结构时,信道输出光谱主峰的通带半宽度可 < 0.12 nm,滤波损耗 < 1.2 dB。

本文提出的波导滤波器是一个全新的概念,在光波分复用器及同类器件的设计方面具有一定的实用参考价值,在工业系统中也将会有重要应

用。本文还通过分别改变各参量后输出光谱的对比,分析了滤波器的材料和结构对输出光谱的影响情况,为波导滤波器性能的进一步提高打下基础。

致谢:本项工作得到中科院“百人计划”课题-光通信器件的支持。

参考文献:

- [1] RAMASWAMI R, SIVARAJAN K N. *A Practical Perspective of Optical Networks* [M]. Morgan Kaufmann Publisher, 1998.
- [2] 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 627-632. PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.*. Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 627-632. (in Chinese)
- [3] LOPEZ H. *Handbook of Optical Fiber Sensing Technology* [M]. John Wiley Sons, Ltd. Press, 2002.
- [4] 缪同群. 窄带干涉滤光片及其产业化技术的研究[R]. 中科院创新项目鉴定报告, 2004. MIU T Q. *Investigation of Narrow-band Interference Filters and Its Industrialization* [M]. The Critical Report of Innovative Items of Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [5] 邵永红, 姜耀亮, 钱龙生. 光学波分复用器件和光学梳状滤波器理论及新进展[J]. *光机电信息*, 2002(5): 25-28. SHAO Y H, JIANG Y L, QIAN L SH. Progress of optical WDM device and the theory of pectinate filters[J]. *OMF Inform.*, 2002(5): 25-28. (in Chinese)
- [6] <http://www.c-fol.net/2004-11-04> [Z].
- [7] SUN D G, WANG N X, WENG Z H, *et al.*. Calculation and design for bistable optical devices of nonlinear interference filters[J]. *Opt. Eng.*, 1993, 32: 63-66.
- [8] 张燕君, 陈才和, 吴波, 等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 77-82. ZHANG Y J, CHEN C H, WU B, *et al.*. Micro/nano technology and fine mechanics structure design of Mach-Zehnder interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 77-82. (in Chinese)
- [9] WU Z M, XIA G Q, ZHOU H Q, *et al.*. Transmission of a Gaussian beam after incidenting nonnormally on a Fabry-Perot etalon[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2003, 35: 1-4.
- [10] WU Z M, XIA G Q. Transmission of a Gaussian beam after incidenting nonnormally on a Fabry-Perot etalon: a nonresonant case[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2003, 35: 123-126.
- [11] 刘泽文, 宣云, 雷啸锋, 等. 高阻硅上 RF-MEMS 共面波导设计及测量研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 158-164. LIU Z W, XUAN Y, LEI X F, *et al.*. Design and measurement of RF-MEMS CPW on HRS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 158-164. (in Chinese)

作者简介: 李小奇(1982—), 男, 辽宁盘锦人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为光通信器件。E-mail: libaitian1015@163.com