

光波导技术同步测量棱镜及波导薄膜参数

周进朝 黄佐华 曾宪佑 张 勇

(华南师范大学物理与电信工程学院量子信息技术实验室, 广东 广州 510006)

摘要 依据全反射理论和棱镜耦合原理, 实现了对棱镜折射率及波导薄膜材料折射率和厚度的同步测量。使用高准直半导体激光器激光入射到棱镜内部与波导膜的分界面上, 逐步旋转棱镜或改变棱镜的入射角, 得到棱镜耦合 M 线, 曲线前面几组的波谷为波导模激发, 在 M 线左侧收尾处有一个不完整波峰, 其反射光强随入射角迅速衰减, 为全反射时的临界点, 由此可实现棱镜及波导薄膜参数的同步测量; 用此法测量了棱镜耦合一体化平面波导棱镜的折射率和聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 聚合物波导薄膜的折射率和厚度。测量棱镜折射率精度为 $\pm 1.9 \times 10^{-4}$, 波导薄膜折射率和厚度的精度分别为 $\pm 6.2 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 和 $\pm 1.6 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 。

关键词 测量; 平面波导; 折射率; 棱镜耦合; 全反射; M 线; 厚度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1212001

Simultaneous Measurement of Prism and Waveguide Film Parameters by Waveguide Technology

Zhou Jinzhao Huang Zuohua Zeng Xianyou Zhang Yong

(Laboratory of Quantum Information Technology, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract According to the principle of total reflection theory and the prism coupling, the simultaneous measurement of the refractive index of the prism and waveguide refractive index of film material and thickness are measured. Highly collimated diode laser is used to enter to the boundary surface of the waveguide film inside the prism, the prism coupler M line is obtained by gradually rotating the prism or changing the angle of incidence of the prism, the lines of previous trough are waveguide mode excitation in the M line ending at the left side there is an incomplete crest, its reflected light intensity decays rapidly with the angle of incidence, which is the total reflection critical point, by this the simultaneous measurement of the parameters of the prism and the waveguide film is realized; refractive index of the prism coupler integrated planar waveguide prism and the refractive index and thickness of the polymethylmethacrylate (PMMA) polymer waveguide film are measured with this method, measured prism refractive index accuracy is $\pm 1.9 \times 10^{-4}$. The accuracy of the waveguide refractive index and thickness are $\pm 6.2 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ and $\pm 1.6 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ respectively.

Key words measurement; planar waveguide; index of refraction; prism coupler; total reflection; M line; thickness

OCIS codes 310.2790; 120.5700; 120.5710

1 引 言

平面波导作为集成光路的基础, 它不仅是集成光学器件的重要组成部分, 其参量表征还可以为条形波导的制件提供必要的参考, 而折射率和厚度是

光波导最重要的参量。在用棱镜耦合原理进行平面波导薄膜参数测量时必须知道棱镜本身的折射率, 因此棱镜本身的折射率的测量精度也将直接影响到波导薄膜参数的测量。折射率测量是光学基本测量

收稿日期: 2012-06-11; 收到修改稿日期: 2012-07-26

基金项目: 广东省科技计划项目 (C60109, 2006B12901020) 资助课题。

作者简介: 周进朝 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电技术与系统、薄膜测量技术和光波导等方面的研究。

E-mail: zzzhoujinzhao@126.com

导师简介: 黄佐华 (1961—), 男, 硕士, 教授, 主要从事光信息处理、光电技术与系统、椭圆偏振测量技术、相位物体成像和光声光谱技术等方面的研究。E-mail: zuohuah@163.com (通信联系人)

技术之一,通常非气态物质的折射率测量方法都以折射定律为基础,一般都可以归结为测角法,这些方法历史悠久,但有一定的局限性,若要自动检测,不仅繁琐而且有主观误差,还需要一套精密的机械移动寻的扫描跟踪系统;而对于薄膜的折射率和厚度的测量,这两个参数的测量方法通常有偏振光反射法^[1~5]、椭圆偏振法^[6,7]、干涉测量法^[8]和棱镜耦合法^[9~19]等,其中棱镜耦合法是一种精度较高,测量快捷便宜的方法。本文利用全反射原理及棱镜耦合原理对棱镜折射率与棱镜耦合一体化平板波导聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)聚合物薄膜的折射率和厚度进行了同步测量,并得到了有益实验结果。

2 实验装置与测量原理

2.1 实验光路及装置

利用全反射及棱镜耦合原理,本质上仍属测角法,但光路布置及探测装置不同于传统的各种方法;

测试系统主要由光路系统,控制与采集系统,和计算机三部分组成,原理如图 1 所示。光源为带准直器的半导体激光光束($\lambda = 650 \text{ nm}$),通过小孔滤除边缘光束,经过起偏器后成为偏振光(可选 TE 模或 TM 模),经过半反半透镜,再经过小孔进一步滤除边缘光束,射向样品表面,样品放在 $\theta/2\theta$ 转台上,样品每转动 θ 角,反射光线转动 2θ 角,探测器 1 与外转盘相连,能够保证探测器时刻跟踪反射光,由计算机控制的步进电机驱动样品的扫描,探测器接收的光强信号放大处理后经过模拟/数字(A/D)卡进入计算机,得到反射光强与入射角关系的扫描曲线。半反半透镜是用来光路自准使用的,开始测量时,使入射光与棱镜表面垂直,此时棱镜的反射光沿原路返回,经过半反半透镜反射后经透镜会聚到探测器 2 上,在程序中扫描出反射光的最强点判断为起始点,曲线上给出的入射角度,都相对于此自准点。

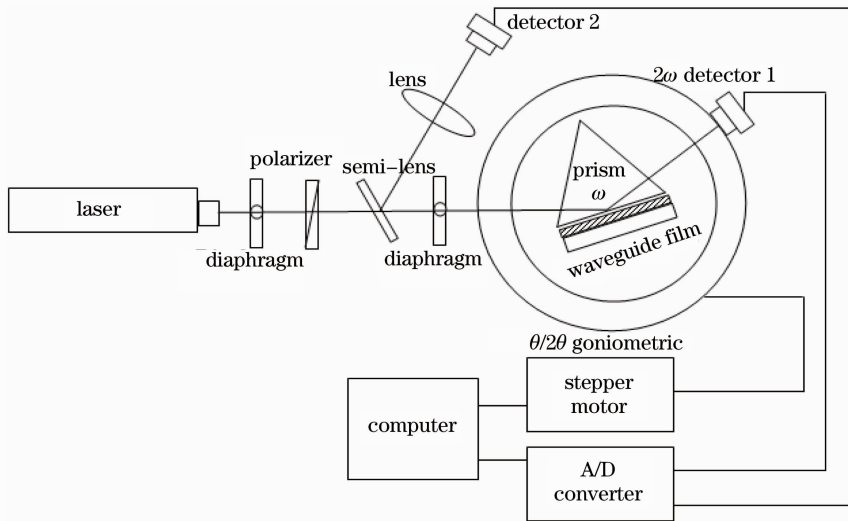


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device

2.2 棱镜耦合原理

棱镜耦合光路原理如图 2 所示,激光射到棱镜

内部与波导层分界面处,入射角为 θ , n_0 为覆盖层, n_1 为波导层, n_2 为衬底, h 为导波层厚度, ϵ 为棱镜底

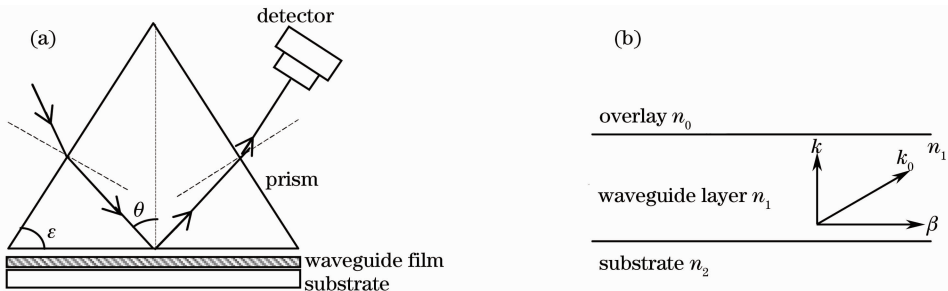


图 2 棱镜耦合原理图

Fig. 2 Prism coupling principle

角, $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 为真空中波矢, β 为传播常数。

设波导的有效折射率 $N = \beta/k_0 = n_1 \sin \theta$, 若测得了导模有效折射率 N , 便知道了传播系数 β 。对于多模波导, 若知道了三个模的 $\beta_{m-1}, \beta_m, \beta_{m+1}$, 便可解

模序数为 $m-1, m, m+1$ 时的超越方程, 只需测得三个同步角的位置, 可求得三个有效折射率 N_1, N_2, N_3 , 代入模式本征方程即可求得模序数、波导层折射率 n_1 和厚度 h , 在 TE 模式下的模式本征方程为

$$(n_1^2 - N_1^2)^{1/2} k_0 h = (m-1)\pi + \arctan\left(\frac{N_1^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_1^2}\right)^{1/2} + \arctan\left(\frac{N_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_1^2}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$(n_1^2 - N_2^2)^{1/2} k_0 h = m\pi + \arctan\left(\frac{N_2^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_2^2}\right)^{1/2} + \arctan\left(\frac{N_2^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_2^2}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$(n_1^2 - N_3^2)^{1/2} k_0 h = (m+1)\pi + \arctan\left(\frac{N_3^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_3^2}\right)^{1/2} + \arctan\left(\frac{N_3^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_3^2}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

联立(1)~(3)式, 即可求得模序数 m 、波导层折射率 n_1 和厚度 h 。

2.3 全反射原理

在波导法测量薄膜参数过程中, 逐步旋转棱镜或改变棱镜的入射角, 当转到某一角度时, M 线上将出现一个不完整波峰, 光强急剧减弱, 这一点所对应的角度就是全反射角, 理论上, 对于纯棱镜衰减全反射曲线将出现如图 3 所示的扫描曲线, α 为棱镜相对于初始自准点转过的角度, 即为扫描曲线中横坐标所对应角度, 纵坐标 I 为探测器 1 所测的反射光强, 曲线台阶处所对应的转角 α_0 就是发生全反射时的入射角, 不过要转换为棱镜内部入射角 θ 。图 4 为测量角度 α 与棱镜内部入射角 θ 之间转换光路图。

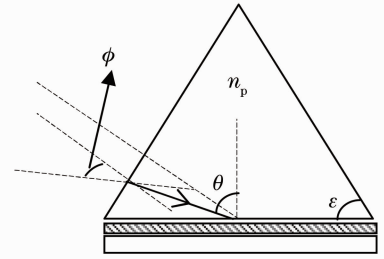


图 4 棱镜内部入射角转换光路图

Fig. 4 Prism internal angle of incidence to convert optical path

镜折射率 n_p 为

$$n_p = \frac{1}{\sin\left\{\epsilon - \arcsin\left[\frac{1}{n_p} \sin(\epsilon - \alpha_0)\right]\right\}}. \quad (5)$$

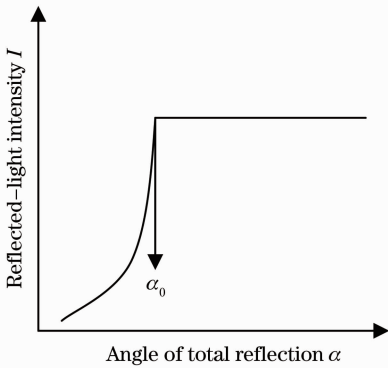


图 3 全反射理论曲线

Fig. 3 Theoretical curve of the total reflection

设待测棱镜折射率为 n_p , 以入射光垂直棱镜为起始入射点, 则开始测量时有 $\theta = \epsilon, \phi$ 为于光在棱镜上的入射角, 当测量系统逆时针转动棱镜时, 可得棱镜内部入射角的换算公式为

$$\theta = \epsilon - \arcsin\left(\frac{1}{n_p} \sin \phi\right). \quad (4)$$

读取得曲线上的拐点所对应的角度 α_0 , 实际操作中可以由计算机软件进行快速定位完成, 不难推得棱

3 测量结果及误差分析

M 线前面几组的波谷为波导的激发模, 测量波谷所对应的转角便可求得波导薄膜参数; 每一条 M 线左侧收尾处有一不完整波峰, 其反射光强随入射角迅速减小, 即为全反射时的临界点, 可得到全反射时的入射角 α_0 。因此, 实现了棱镜耦合 M 线法对棱镜折射率和波导薄膜的折射率和厚度的同步测量。图 5 是对棱镜耦合一体化 PMMA 聚合物平板波导的参数进行测量的曲线(其中覆盖层为空气, 波导薄膜为 PMMA 聚合物, 衬底为金), 图中横坐标 α 为入射角, 纵坐标 I 为反射光强度。图 5(a)及(b)为两次实测的曲线。

棱镜耦合一体化平板波导膜各参数的测量及处理数据如表 1 所示, 其中 α 为入射角, h 为薄膜厚

度, n_p 为棱镜折射率, $S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$ 为标准误差, 测量温度为 27°C 。对于棱镜折射率, 每次测量值与平均值的偏差在 $n_p = 1.79481 \pm 0.00019$; 波导

PMMA 聚合物薄膜, 折射率测量值与平均值的偏差 偏差在 $h=2.032079 \pm 0.01633 \mu\text{m}$ 。
在 $n=1.43891 \pm 0.00062$, 厚度测量值与平均值的

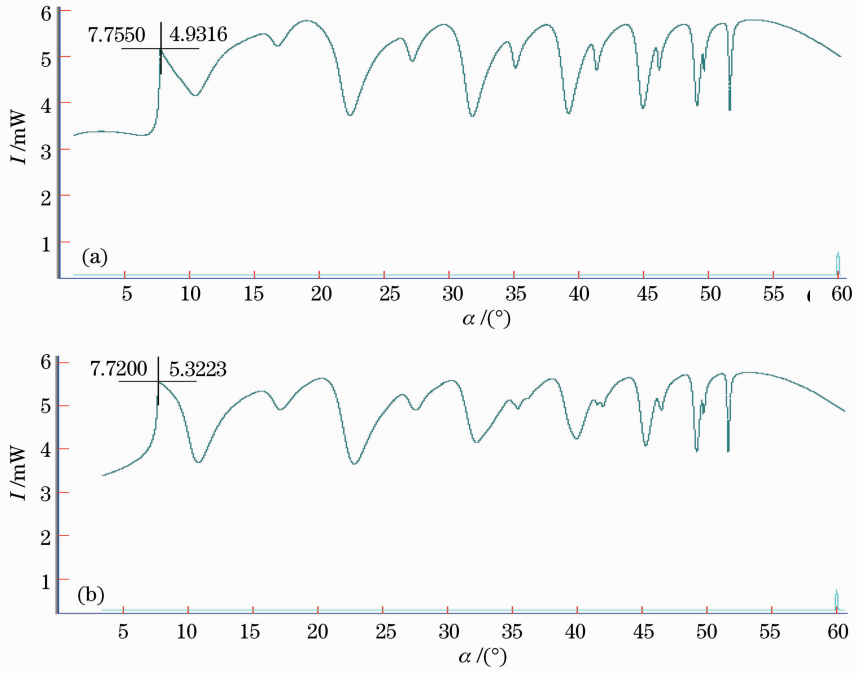


图 5 PMMA 薄膜的实测 M 线

Fig. 5 Experimental M line of a PMMA film

表 1 样品测量结果

Table 1 Measurement results of the sample

Measurement times	Waveguide sample								
	Prism		$m=1$			$m=2$		$m=3$	
	$\alpha /(^{\circ})$	n_p	n_1	$h / \mu\text{m}$	n_1	$h / \mu\text{m}$	n_1	$h / \mu\text{m}$	
1	7.7200	1.79507	1.43935	2.01273	1.43898	2.02515	1.43799	2.04015	
2	7.7325	1.79494	1.43989	2.00970	1.43910	2.03649	1.43802	2.05329	
3	7.7456	1.79480	1.43967	2.01238	1.43901	2.03238	1.43810	2.05317	
4	7.7744	1.79451	1.43934	2.01340	1.43921	2.03440	1.43842	2.05348	
5	7.7432	1.79483	1.43953	2.02438	1.43901	2.03238	1.43810	2.05317	
6	7.7550	1.79471	1.43936	2.01284	1.43915	2.02380	1.43812	2.05413	
\bar{n}	1.79481				1.43891				
h	2.032079								
S	$S_{n_p}=0.00019$		$S_{n_1}=0.00062$			$S_h=0.01633$			

要实现高精度测量, 波导薄膜参数的测量主要取决于导模激发处的入射角测量, 对于棱镜主要取决于测量全反射处角度 α 的测量精度及棱镜底角 ϵ

的精度。根据误差理论可导出棱镜折射率 n_p 的绝对误差公式为

$$\Delta n_p = \cos \left\{ \epsilon - \arcsin \left[\frac{1}{n_p} \sin(\epsilon - \alpha) \right] \right\} \cos(\epsilon - \alpha) \Delta \epsilon - \cos \left\{ \epsilon - \arcsin \left[\frac{1}{n_p} \sin(\epsilon - \alpha) \right] \right\} \cos(\epsilon - \alpha) \Delta \alpha = \cos \left\{ \epsilon - \arcsin \left[\frac{1}{n_p} \sin(\epsilon - \alpha) \right] \right\} \cos(\epsilon - \alpha) (\Delta \epsilon - \Delta \alpha), \quad (6)$$

实验中棱镜底角 ϵ 可由仪器精确测量, $\Delta\epsilon = \pm 1''$; 因此, 整个测量结果引入的误差主要来源于全反射时入射角的测量精度, 而测量时是由软件直接进行极值点的定位。由于激光的性质与测量波导膜镀膜情况的影响, M 线上会有噪声, 对测量谱线的平滑度有较大的影响, 因此所用光源质量将直接影响折射率的测量精度。本实验采用的是带准直器的半导体激光光束, $\lambda = 650 \text{ nm}$ 、发散角小于 1 mrad 、稳定性为 0.17% 、测量角度 $\Delta\alpha = \pm 0.125945^\circ$ 。各测量参数测量精度为: 棱镜折射率 $\Delta n_p = \pm 1.9 \times 10^{-4}$; 波导薄膜折射率 $\Delta n = \pm 6.2 \times 10^{-4}$, 厚度 $\Delta h = \pm 1.6 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 。

4 结 论

利用光波导装置平台, 用棱镜耦合 M 线法在测量波导薄膜参数的同时也可以同步测量棱镜折射率; 在有机材料、聚合物和光学波导器件等领域中有广泛应用, 此方法具有对被测样品要求简单、精确可靠等特点, 而且是一种非破坏性测量方法。实验证明, 其测量结果是令人满意的。

参 考 文 献

- 1 T. Kihara, K. Yokomori. Simultaneous measurement of refractive index and thickness of thin film by polarized reflectances[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34): 5069~5073
- 2 A. Rosencwaig, J. Opsal, D. Willenborg *et al.*. Beam profile reflectometry: a new technique for dielectric film measurements [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(11): 1301~1303
- 3 D. Wood, J. Fleming. Computerized refractive index measurements for bulk materials at UV, visible, and IR wavelengths[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 1982, **53**(1): 43~47
- 4 R. M. A. Azzam, A. R. M. Zaghoul. Polarization-independent reflectance matching (PRIM): a technique for the determination of the refractive index and thickness of transparent films[J]. *J. Opt.*, 1977, **8**(3): 201~205
- 5 A. Beléndez, T. Beléndez, C. Neipp *et al.*. Determination of the refractive index and thickness of holographic silver halide materials by use of polarized reflectances[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(32): 6802~6808
- 6 Huang Zuohua, He Zhenjiang, Yang Guanling *et al.*. The multifunctional ellipsometer [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(5): 432~434
黄佐华, 何振江, 杨冠玲等. 多功能椭圆测厚仪[J]. 光学技术, 2001, **27**(5): 432~434
- 7 Huang Zuohua, He Zhenjiang. The optical methods for

- measuring the thickness and refractive index of thin films[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2003, (4): 42~44
黄佐华, 何振江. 测量薄膜厚度及其折射率的光学方法[J]. 现代科学仪器, 2003, (4): 42~44
- 8 M. H. Chiu, J. Y. Lee, D. C. Su. Complex refractive-index measurement based on Fresnel's equations and the uses of heterodyne interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4047~4052
 - 9 H. Onodera, I. Awai, J. Ikenoue. Refractive-index measurement of bulk materials: prism coupling method [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(8): 1194~1197
 - 10 P. K. Tien, R. Ulrich. Theory of prism-film coupler and thin-film light guides[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(10): 1325~1337
 - 11 Zhao Xiaoxiang, Xu Zhengquan. Measurement of refractive index of substrate materials of optical waveguides with a prism coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **19**(6): 426~429
赵孝祥, 许政权. 利用棱镜耦合器测量光波导衬底的折射率[J]. 中国激光, 1992, **19**(6): 426~429
 - 12 Fang Junxin, Cao Zhuangqi, Yang Fuzi. Waveguide Technology Physical Basis [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987. 204~224
方俊鑫, 曹庄琪, 杨傅子. 光波导技术物理基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987. 204~224
 - 13 R. Ulrich, R. Torge. Measurement of thin film parameters with a prism coupler[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(12): 2901~2908
 - 14 Li Honggen, Shen Qishun, Cao Zhuangqi *et al.*. Direct coupling for double metal-cladding waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 924~926
李红根, 沈启瞬, 曹庄琪等. 双面金属包覆介质波导的直接耦合方法[J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 924~926
 - 15 H. Li, Z. Cao, H. Lu *et al.*. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(14): 2757~2759
 - 16 S. Herminghaus, B. A. Smith, J. Swalen. Electro-optic coefficients in electric-field-poled polymer waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(11): 2311~2317
 - 17 Wang Jiaxian, Li Junjie, Wu Wenguang *et al.*. Coupled-mode characteristics of coupled-microdisks and single microdisk cavity with an output waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106006
王加贤, 李俊杰, 吴文广等. 耦合微盘及带输出波导的单微盘腔的耦合模式特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0106006
 - 18 Zhang Jianing, Han Xiuyou, Song Hongyan *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2098~2103
张佳宁, 韩秀友, 宋红妍等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2098~2103
 - 19 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Photonic crystal single channel side-coupled waveguide with parallel resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0223001
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥等. 并联谐振腔光子晶体单通道侧面耦合波导[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0223001