

文章编号: 0258-7025(2010)12-3145-05

# 对称金属包覆结构中反射光干涉效应的研究

陈 麟 彭 滢 袁明辉 朱亦鸣\*

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要** 提出了一种可同时达到高对比度和高反射率的对称金属包覆结构。由于导波层的厚度是亚毫米量级, 使该结构可容纳一系列共振模。利用四层波导菲涅耳公式, 详细分析了耦合金属层的厚度对耦合效率的影响, 给出了反射光达到最大对比度时耦合金属层厚度的最优值, 并从物理的角度解释了这种现象产生的原因是对称金属包覆结构中的辐射损耗和本征损耗共同作用的结果。实验测量了对称金属包覆结构中反射光的干涉效应。结果表明, 对称金属包覆结构可以大大增强反射光的干涉条纹中明、暗光线的对比度, 同时光入射到对称金属包覆结构中的耦合效率可接近 100%。这将有助于研究高对比度高反射率薄膜和基于对称金属包覆结构的传感器。

**关键词** 波导; 干涉条纹; 衰减全反射; 耦合效率; 对称金属包覆结构

**中图分类号** O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.3145

## Investigation of Interference Fringes of Reflected Beam on Double Metal-Cladding Structure

Chen Lin Peng Yan Yuan Minghui Zhu Yiming

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract** A double metal-cladding structure which can achieve high contrast approaching unity and high-reflectivity is proposed. This double metal-cladding structure with sub-millimeter scale can accommodate a series of resonant modes. Using the Fresnel reflection formula of the four layers, the relationship between coupling efficiency and thickness of upper metal layer is analyzed and the optimum value of thickness of upper metal layer can also be obtained. It is also found that such optimum value is closely related to the intrinsic and radiative damping. The interference fringes of reflected beam and coupling efficiency on double metal-cladding structure were observed experimentally. Experimental results showed that high contrast approaching unity can be observed from interference fringes and coupling efficiency can reach nearly 100% on double metal-cladding structure. It is useful for the investigation of high contrast high reflectivity films and the sensors based on double metal-cladding structure.

**Key words** waveguide; interference fringes; attenuated total reflection; coupling efficiency; double metal-cladding structure

## 1 引 言

光波导结构被广泛应用于光纤通信和集成光电子学领域。它同时也是导波光学的本征和关键元件<sup>[1~4]</sup>。自从光波导概念提出以后, 发展了很多耦合

技术, 用于将光从外部耦合进光波导, 例如端面耦合<sup>[5]</sup>、棱镜耦合<sup>[6]</sup>、光栅耦合<sup>[7]</sup>以及倾斜薄膜耦合<sup>[8]</sup>等。有效的耦合是导波光电子器件的重要影响因素。

基于对称金属包覆结构<sup>[9~12]</sup>的自由空间耦合

**收稿日期**: 2010-08-10; **收到修改稿日期**: 2010-08-31

**基金项目**: 国家教育部博士点新教师基金(20093120120007)、上海市教育委员会晨光计划(09CG49)和曙光计划(08SG48)、上海市教育委员会科研创新项目(09YZ221)、上海市科委纳米技术专项(0952nm02400)、上海市教委上海高校选拔培养优秀青年老师科研专项基金(slg08006)、上海市科委浦江人才计划(09PJ1407800)和上海市自然科学基金(08ZR1415400)资助课题。

**作者简介**: 陈 麟(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事太赫兹波导导波光学和薄膜光学方面的研究。

E-mail: linchen@usst.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ymzhu@usst.edu.cn

技术最近在文献[12]中提出。这种耦合技术保留了棱镜耦合的高耦合效率的优点,同时避免了棱镜耦合中对空气隙控制的高复杂性以及光栅耦合技术中光栅制造的困难性和复杂性。相比于利用传统工艺制造的只能存在很少的模式波导结构,对称金属包覆结构的导波层是亚毫米量级厚的玻璃介质,所以这种结构可以容纳上千种模式。此外,对称金属包覆结构的反射共振峰峰宽非常窄。例如,对于导波层为 0.14 mm 厚的对称金属包覆波导结构,当波长为 632.8 nm 的可见光以 45° 入射角入射到波导界面时,反射共振峰的半峰全宽(FWHM)仅有 0.04°。这样光束的发散效应就不能被忽略了。由于激光光束的发散效应,很难将全部光能量耦合进波导里。在文献[12]中报道了这种耦合效率只能达到 50%。

为了进一步增加耦合效率,使用空间滤波器和透镜来产生扩展准直光束,这样能够有效避免光束发散的影响。在实验中仔细观察这样的光束入射到对称金属包覆结构中产生的干涉条纹效应。利用菲涅耳公式,得出上层金属层作为耦合层对波导的耦合效率具有重要的影响。

## 2 理 论

对称金属包覆波导结构如图 1 所示。利用真空溅射镀膜方法,将一块厚度为 0.14 mm 的玻璃上下表面镀一层金膜。上表面的金膜厚度为几十纳米量级,用作耦合层和金属包覆层,下表面的金膜厚度为几百到上千纳米量级,用作衬底。为了避免光束发散角的影响,TE 或 TM 极化的激光光束经过空间滤波器和透镜,产生扩展准直的光束,再以合适的角度入射到对称金属包覆结构上层金属层中。

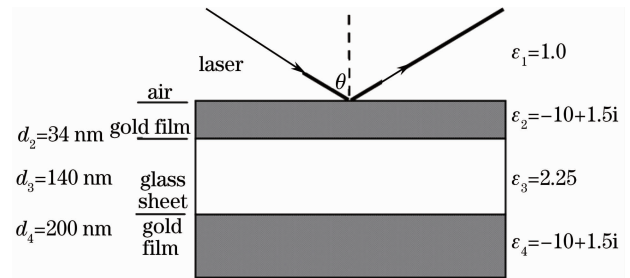


图 1 对称金属包覆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the double metal-cladding structure

四层光学系统的反射率可表达为<sup>[13,14]</sup>

$$R = r_{1234} r_{1234}^* = \left| \exp(-i\phi_{12}) \times \frac{\{1 - \exp[i2(\kappa_3 d_3 - \phi_{32} - \phi_{34})]\} + \{\exp[i2(\kappa_3 d_3 - \phi_{34})] - \exp(-i2\phi_{32})\} \exp(i\phi_{12}) \exp(-2p_2 d_2)}{\{1 - \exp[i2(\kappa_3 d_3 - \phi_{32} - \phi_{34})]\} + \{\exp[i2(\kappa_3 d_3 - \phi_{34})] - \exp(-i2\phi_{32})\} \exp(-i\phi_{12}) \exp(-2p_2 d_2)} \right|^2, \quad (1)$$

式中

$$\phi_{ij} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{p_j}{p_i}\right) & \text{TE mode} \\ \arctan\left(\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \frac{p_j}{p_i}\right) & \text{TM mode} \end{cases}, (ij = 12, 32, 34),$$

$\kappa_3 = (\mathbf{k}_0^2 \epsilon_3 - \beta^2)^{1/2}$ ,  $p_2 = (\beta^2 - \mathbf{k}_0^2 \epsilon_2)^{1/2}$ , 是传播常数,  $\mathbf{k}_0$  表示真空中的波矢量,  $\theta$  是入射角度,  $\epsilon_i = n_i^2$  是第  $i$  层介质的介电常数,  $n_i$  表示第  $i$  层介质的折射率。

图 2 表示计算出的反射率  $R$  随玻璃厚度的变化关系。其中实线、点线和虚线分别表示对称金属包覆结构、单层玻璃平板以及玻璃平板下镀一层 200 nm 厚的金膜衬底的反射率曲线。其他参数和图 1 相同。入射光为氦氖激光器发出的 632.8 nm 的 TM 波。入射角为 45°。从图 2 可以看出,单一玻璃平板的反射率只有 3%。当在玻璃平板上加一层金属层作衬底时,可显著增大光反射率。但是,对比度同时减小。当玻璃平板的上表面同时镀一层金膜时,它形成了波导层很厚的对称金属包覆光波导

结构。利用自由空间耦合技术<sup>[12]</sup>,当波长为  $\lambda$  的入射光入射到双面金属包覆光波导的上层金膜时,在空气下面金属薄膜中的电磁场是迅衰场。当水平传播常数与导模的传播常数相匹配时,能量将从入射光耦合进导模中,导致反射光强迅速衰减,产生衰减全反射峰。由于在亚毫米导波层厚度的波导中能容纳大量的导模,图 2 的计算结果表明高阶模的衰减

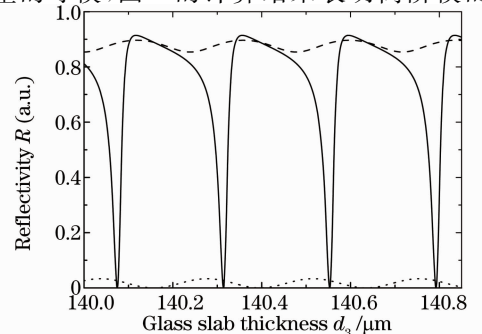


图 2 反射率  $R$  相对玻璃厚度的变化关系

Fig. 2 Calculated dependence of reflectivity  $R$  on the thickness of the glass sheet

全反射峰很窄,且可以同时达到高反射率和高对比度的条件。为了更好地说明这一点,定义干涉条纹的对比度  $\gamma$  为<sup>[15]</sup>

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

式中  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别是干涉场中光强的极大和极小值。对应于图 2 中的反射率曲线,对比度定义为

$$\gamma = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}}, \quad (3)$$

式中  $\gamma$  的取值范围为  $0 \leq \gamma \leq 1$ 。当  $R_{\min} = 0$  (暗纹全黑) 时,  $\gamma = 1$ , 条纹反差最大, 清晰可见。当  $R_{\max} \approx$

$R_{\min}$  时,  $\gamma \approx 0$ , 条纹模糊不清, 乃至不可辨认。从图 2 可以算出, 对称金属包覆结构, 单层玻璃结构以及下镀 200 nm 金膜层作为衬底的玻璃结构, 其各自的对比度分别为 0.895, 0.600 和 0.029, 显然对称金属包覆波导的对比度最大。这样就能够很方便地确定暗条纹(吸收峰)的位置, 进而可以准确确定由于外部参数(例如温度、压力等)的改变引起暗条纹的移动, 这对传感器的灵敏度是很有利的。

利用近似条件  $\exp(i2\kappa_2 d_2) \ll 1$ , 系统的反射率在导模共振角度附近可改写为<sup>[16,17]</sup>

$$R = |\exp(-i2\phi_{12})|^2 \times \left| 1 - \frac{4\text{Im}(\beta^0)\text{Im}(\Delta\beta_{\text{rad}})}{\{\beta - [\text{Re}(\beta^0) + \text{Re}(\Delta\beta_{\text{rad}})]\}^2 + [\text{Im}(\beta^0) + \text{Im}(\Delta\beta_{\text{rad}})]^2} \right|^2, \quad (4)$$

式中  $\beta = k_0 n_1 \sin \theta$  为传播常数,  $\beta^0$  是当上层金膜层的厚度为半无限大时三层波导导模的传播常数,  $\Delta\beta_{\text{rad}}$  代表三层和四层结构波导的传播常数之差, 可表示为

$$\Delta\beta_{\text{rad}} = \left\{ \frac{i\kappa_3}{2\beta d_{\text{eff}}} \times \{ \exp[i2(\kappa_3 d_3 - \phi_{34})] - \exp(-i2\phi_{32}) \} \right\}_{\beta=\beta_0} \times \exp(-i2\phi_{12}) \exp(-2p_2 d_2), \quad (5)$$

式中

$$d_{\text{eff}} = \begin{cases} d_3 + \frac{1}{p_4} + \frac{1}{p_2} & \text{TE mode} \\ d_3 + \frac{\epsilon_4 \epsilon_3 (\kappa_3^2 + p_4^2)}{p_4 (\kappa_3^2 \epsilon_4^2 + p_4^2 \epsilon_3^2)} + \frac{\epsilon_2 \epsilon_3 (\kappa_3^2 + p_2^2)}{p_2 (\kappa_3^2 \epsilon_2^2 + p_2^2 \epsilon_3^2)} & \text{TM mode} \end{cases}, \quad (6)$$

$d_{\text{eff}}$  代表金属包覆波导的有效厚度;  $p_4 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_4)$  为传播常数;  $\beta^0$  和  $\Delta\beta_{\text{rad}}$  的虚部代表本征损耗和辐射损耗, 前者是由金属的虚部引起的, 后者是由导模能量泄露回自由空间引起的, 而且这个损耗与上层金膜厚度的指数成正比。当满足同步条件时, 即<sup>[18]</sup>

$$\beta = \text{Re}(\beta^0) + \text{Re}(\Delta\beta_{\text{rad}}), \quad (7)$$

反射率取极小值, 即有

$$R_{\min} = |\exp(-i2\phi_{12})|^2 \times \left\{ 1 - \frac{4\text{Im}(\beta^0)\text{Im}(\Delta\beta_{\text{rad}})}{[\text{Im}(\beta^0) + \text{Im}(\Delta\beta_{\text{rad}})]^2} \right\}. \quad (8)$$

不难看出, 当波导的本征损耗与辐射损耗相等时, 即

$$\text{Im}(\beta^0) = \text{Im}(\Delta\beta_{\text{rad}}), \quad (9)$$

有  $R_{\min} = 0$ , 这时的反射率为零, 入射光将全部耦合进波导。一旦选择好耦合层、衬底和导波层的材料, 确定好上层金膜的厚度, 则辐射损耗将决定反射峰的深度。通过调整上层金属膜厚度到最佳值, (9) 式将被满足, 反射率的值可以达到 0。

图 3 表示反射率  $R$  随入射角变化的曲线, 图中画出了不同厚度上层金属膜的结果。图 4 表示图 3 中的最小反射率随上层金膜厚度的变化而变化的曲线。从图中可以看出, 反射共振峰的深度当上层金

膜厚度偏离最优值 34 nm 时将会减小。当此厚度比最优值大时, 意味着本征损耗大于辐射损耗, 这时导模处于未充分耦合阶段。相反的例子属于导模的过耦合阶段。图 4 清楚地表明反射共振峰的 FWHM 将随上层耦合金膜的增加而减小。

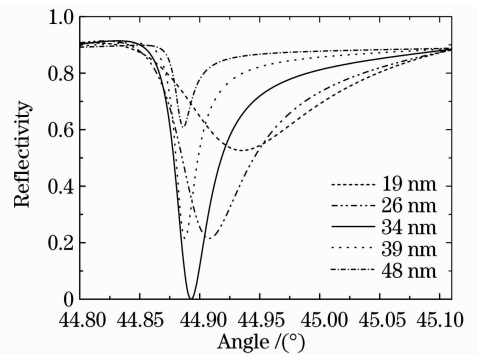


图 3 不同上层金膜厚度下入射角和反射率的变化关系  
Fig. 3 Calculated reflectivity  $R$  as a function of the incident angle for various thickness of the upper coupling gold film

### 3 实 验

图 5 为实验框图。波长为 632.8 nm 的氦氖激

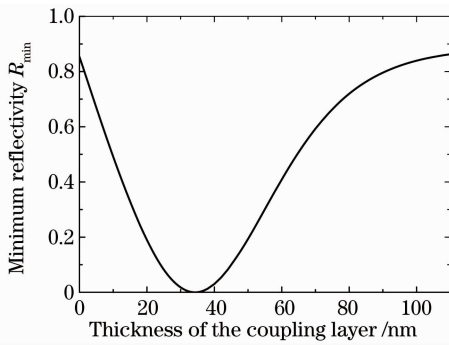


图4 图3中所示的衰减全反射峰最小值随上层耦合金膜厚度的变化关系

Fig. 4 Calculated dependence of the minimal reflection  $R_{\min}$  of the resonance dip in Fig. 3 on the thickness of coupling gold layer

光器经过一个空间滤波器和棱镜以后,出来的展宽准直光入射到对称金属包覆波导的上层金膜中。反射经过一个物镜聚焦后被 CCD 记录。CCD 相机的精度为 8 位。在实验中选择 0.14 mm 的玻璃板。上层金膜的厚度为 33 nm。对称金属包覆波导的其他参数和图 1 相同。入射角为  $45^\circ$ 。

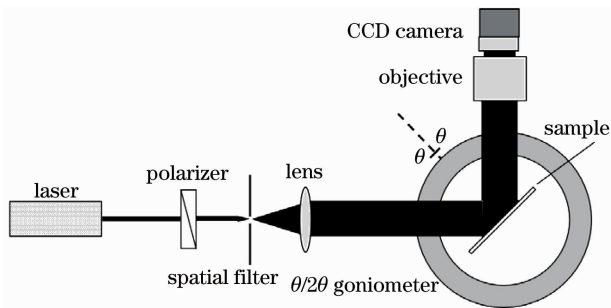


图5 实验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

图6表示用 CCD 拍摄到的对称金属包覆波导干涉模式的照片。从图中可以看出干涉条纹图样是由暗条纹和亮的背景组成。反射的最大光强的值超过了 CCD 测量范围的饱和值,这片区域在照片中显示为白色。如前文所说,得到了非常窄的反射振荡峰。图7为图6中横线“a”处对应的光强值。横轴代表照片中的像素。图中表明测出的振荡反射峰的最小反射率接近于 0.8 位精度的 CCD,表明它的测量范围从 0(黑色)到 255(白色)。这样,测量到的最小值 0 意味着反射光的强度比入射光强的  $1/256$  还要低,这个强度不能被 CCD 分辨,就被视为 0,也就是说,误差小于  $1/256 \approx 0.39\%$ 。从干涉条纹图片中可以很清楚地得到明暗条纹间的高对比度,入射光进入对称金属包覆结构的光能量的耦合效率接近 100%。此外,文献[12]中提到的只有 50% 的能

量耦合进波导,这是由激光的光束发散因素引起的。

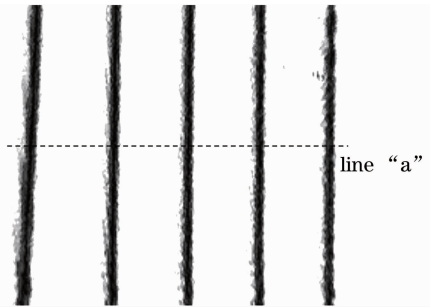


图6 CCD 捕捉到的对称金属包覆结构的干涉模式照片

Fig. 6 Photograph of interference pattern with double metal-cladding structure taken by CCD

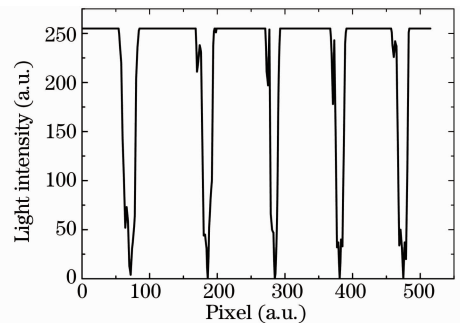


图7 图6中横线“a”处对应的场强图

Fig. 7 Line section of the line "a" in Fig. 6

## 4 结 论

实验证实了对称金属包覆结构中反射光可同时实现高对比度和高耦合效率。通过使用菲涅耳公式,讨论了耦合金属层厚度这一重要参数对耦合效率的影响,理论计算表明如果选择耦合上层金属层厚度达到最优值,高对比度和耦合效率接近 100% 两个目标将会同时实现。实验中观察到的高阶导模干涉条纹也证实了对称金属包覆结构可同时达到高对比度和高反射率这一特征。

## 参 考 文 献

- 1 L. G. Yuriya, A. A. Friese. Very narrow spectral filters with multilayered grating-waveguide structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(11): 1596~1598
- 2 M. Blomqvist, S. Khartsev, A. Grishin *et al.*. Optical waveguiding in magnetron-sputtered  $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$  thin films on sapphire substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 439~441
- 3 Tong Canming, Chen Baoxue, He Lei *et al.*. Study on poly (methylphenylsilane)-poly (benzyl Methacrylate) copoly-mer waveguide fabricated by photobleaching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1613~1617
- 童灿明, 陈抱雪, 何磊等. 光漂白法制备 PMPS-PBzMA 共聚物光波导的技术研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1613~1617
- 4 Yang Yanfang, Xu Kai, He Ying *et al.*. Determining the glass transition temperature of polymer films with real-time [J].

- Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3007~3010
- 杨艳芳, 徐 凯, 何 英等. 实时测量聚合物薄膜的玻璃化转变温度[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3007~3010
- 5 W. K. Burns, G. B. Hocker. End fire coupling between optical fibers and diffused channel waveguides[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(8): 2048~2050
- 6 P. K. Tien, R. Ulrich, R. J. Martin. Modes of propagating light waves in thin deposited semiconductor films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**(9): 291~294
- 7 M. L. Dakess, L. Kuhn, P. F. Heidrich *et al.*. Grating coupler for efficient excitation of optical guided waves in thin films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**(12): 523~525
- 8 P. K. Tien, R. J. Martin. Experiments on light waves in a thin tapered film and a new light-wave coupler[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(9): 398~401
- 9 Zhou Feng, Cao Zhuangqi, Jiang Yi *et al.*. Method to identify mode order in double metal cladding waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 665~669
- 周 峰, 曹庄琪, 蒋 毅等. 双面金属包覆介质波导模序数的判别方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 665~669
- 10 Wu Zhijing, Sang Minghuang, Yuan Wen *et al.*. Pulse stretching based on symmetrical metal-cladding optical waveguide with sub-millimeter scale[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 119~122
- 吴至境, 桑明煌, 袁 文等. 基于亚毫米尺度金属包覆波导的脉冲展宽[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 119~122
- 11 Sun Jingjing, Sang Minghuang, Cao Zhuangqi *et al.*. Inhibiting effect of propagation loss in symmetrical metal-cladding optical waveguide with sub-millimeter scale[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 43~46
- 孙晶晶, 桑明煌, 曹庄琪等. 亚毫米尺度对称金属包覆波导中传输损耗的抑制[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 43~46
- 12 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
- 13 Cao Zhuangqi. *The ATM Theory of Waveguides* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000
- 曹庄琪. *导波光学中的转移矩阵方法* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000
- 14 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th ed. Cambridge UK: Cambridge U. Press, 1999
- 15 M. Doi, Y. Iwasaki, T. Shionoya *et al.*. High-resolution displacement measurement mode interference in the optical waveguide[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(5): 651~653
- 16 W. P. Chen, J. M. Chen. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(2): 189~191
- 17 Zhang Jing, Cao Zhuangqi, Lu Haifeng *et al.*. New measurement method of thickness and refractive index of the film grown on the strong absorption substrate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 959~962
- 张 竞, 曹庄琪, 陆海峰等. 强吸收衬底上薄膜厚度和折射率的测量新方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 959~962
- 18 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Sheng Qishun *et al.*. Determination of the complex dielectric coefficient and thickness of absorbing films using guided waves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 642~646
- 蒋 毅, 曹庄琪, 沈启舜等. 导波法测量吸收薄膜的复介电系数和厚度[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 642~646