

# 聚硅氧烷光波导损耗无损测量图像的消旋及尺寸估计

温昌礼<sup>1,2</sup> 徐 蓉<sup>1,2</sup> 门 涛<sup>1,2</sup> 刘长海<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043

<sup>2</sup>西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043

**摘要** 近年来,由于传统的电互连技术暴露其固有的瓶颈问题,光互连技术成为研究的热点。而有机光波导以其独有的优势,在光互连中占据了主要地位。聚硅氧烷光波导是最适合850 nm波段的有机光波导之一。研究波导的过程中,一直存在着难题:如何实现波导的高精度无损测量。而电荷耦合器件(CCD)无损测量法具有操作简单等优势成为研究的热点。针对CCD测量法中存在的如何保证测量图像中光的传输方向,保持较高精度水平以及如何较高精度地确定CCD视场内的波导通光长度问题,提出了聚硅氧烷光波导损耗无损测量图像的消旋理论和方法,以及估计CCD视场内波导通光长度的理论和方法,并和传统的截断法结果进行了对比,验证了方法的正确性和有效性。

**关键词** 光学器件;光波导;聚硅氧烷;无损测量

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0612005

## Rotation Elimination and Evaluation of Length of Measuring Images without Damage of Polysiloxane Waveguide

Wen Changli<sup>1,2</sup> Xu Rong<sup>1,2</sup> Men Tao<sup>1,2</sup> Liu Changhai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an, Shaanxi 710043, China

<sup>2</sup>Xi'an Satellite Control Center, Xi'an, Shaanxi 710043, China

**Abstract** Recently, optical interconnection technology has become a hot research topic due to the inherent problems of electronic interconnection technology. Organic optical waveguide plays a most important role in optical interconnection because of its own advantages. Polysiloxane optical waveguide is one of the best waveguide of 850 nm. One of the most difficult problems in research is how to realize the high precision measurement without damage for the loss of waveguide. Measurement of CCD without damage becomes the focus of research because of its simple application. This paper is based on the problems in measurement of CCD about how to ensure the transmission direction of light in measuring image to keep a high level of precision and how to evaluate the length of optical channel. Eliminating rotation theory and method of waste measuring image without damage of polysiloxane optical waveguide are proposed. The theory and method of evaluating length of optical channel are proposed, either. At last, the results are compared with the traditional cutting off method. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified.

**Key words** optical devices; optical waveguide; polysiloxane; measurement without damage

**OCIS codes** 120.1880; 060.4510; 060.6718

## 1 引 言

由于传统的电互连技术暴露出其瓶颈问题:信号失真、串话、时钟歪斜、瓶颈阻塞、有限的I/O吞吐量和高功耗等。而光互连技术以其独特的优点:极高的时空带宽积、高速、高密度、并行性、无电磁干扰和传输功耗极低等正在逐渐取代电互连技术。聚合物作为光互连的材料具有优越的性能:可以旋涂在多种基片上

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(61307038)

作者简介: 温昌礼(1982-),男,博士,工程师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail:wcl100@163.com

(Si、SiO<sub>2</sub>、玻璃等)、低损耗(互连距离可以较大)、聚合物中引入微电子和光电子材料后在许多方面(光互连、电互连、绝缘体、保护套等)有很大的应用潜力、便于加工等。而聚硅氧烷作为聚合物波导材料之一,具有价格便宜等优点。且用于光互连的常用器件 VCSEL 的通光波段为 850 nm,而聚硅氧烷是最适合该波段的波导材料之一<sup>[1]</sup>。近年来,学者对聚硅氧烷光波导进行了大量的研究<sup>[2]</sup>。制备的聚硅氧烷直线波导长度可达 22.5 cm,损耗可达 0.21 dB/cm<sup>[2]</sup>。而在研究聚硅氧烷光波导的过程中,遇到了如何实现光波导损耗的无损测量,且实现方式简便,测量结果准确这一困难。关于波导损耗测量的研究,前人已经做了大量的工作<sup>[3]</sup>。而利用电荷耦合器件(CCD)拍摄光的传播方向上散射光强分布,通过曲线拟合得到损耗结果的方法是切实可行的波导无损测量方法<sup>[3]</sup>。关于光波导的 CCD 无损测量方法,可以追溯到 1983 年, Yasuyuki Okamura 等<sup>[4-5]</sup>提出的利用 CCD 拍摄光波导的散射光强分布,通过曲线拟合得到波导损耗结果。并在 1985 年进行了改进。1997 年,蒋毅等<sup>[6]</sup>研究了平板光波导的 CCD 无损测量法。增加了用中值滤波处理噪声的环节,改进了 CCD 测量法。同时指出损耗测量的误差来源有外部本底光、杂散光的干扰,视频信号的取样、量化误差,数字滤波对图像的损伤,CCD 成像象差等。1999 年,蒋毅等<sup>[7]</sup>利用 CCD 摄像法对所制备的低损耗有机物波导的损耗进行了测量,这是对 CCD 摄像法的应用示例。2001 年,吕增海等<sup>[8]</sup>利用视频摄像技术采用棱镜耦合输入的方法测定纳米晶聚合物复合薄膜的传输损耗。2006 年,庞拂飞等<sup>[9]</sup>同样利用 CCD 摄像技术棱镜耦合输入的方法测量了有机无机混合溶胶凝胶波导的传输损耗。2011 年,温昌礼等<sup>[10]</sup>利用 CCD 摄像技术光纤耦合输入的方法测量了聚硅氧烷脊形光波导的传输损耗。2012 年,陈经纬<sup>[11]</sup>利用 CCD 摄像技术测量了复合薄膜的传输损耗。在使用 CCD 摄像技术测量波导的传输损耗时,会遇到影响测量精度的因素:不能保证 CCD 和波导的通光方向高精度的平行,且不能精确测量 CCD 视场内的波导通光长度。本文针对 CCD 摄像技术中存在的这两个难题,提出了如何保证波导通光方向较高精度水平测量图像的消旋与 CCD 视场内波导长度的较高精度估计理论和方法,并将实验结果和传统的截断法进行比较验证。

## 2 聚硅氧烷脊形光波导的制备

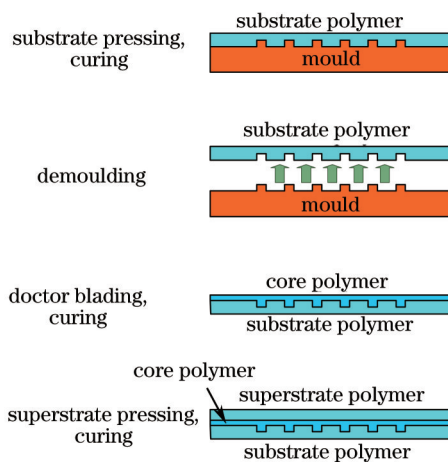


图 1 聚硅氧烷光波导的制备流程

Fig.1 Procedure of polysiloxane optical waveguide

如图 1 所示为聚硅氧烷脊形光波导的制备流程,采用 M、N 胶(中南晨光化工研究所生产的 GX-108 胶)作为基底和覆盖层,OE6450 作为芯层,采用电路板印刷技术制备的金属模具,采用模压技术制备脊形波导<sup>[12-3]</sup>。制备好的脊形波导如图 2 所示,其形状比较规则。图 3 为波导横截面图及尺寸信息,其中脊宽 67  $\mu\text{m}$ ,脊高 50  $\mu\text{m}$ ,相邻波导间距为 250  $\mu\text{m}$ 。



图 2 脊形光波导实物图

Fig.2 Image of rib waveguide

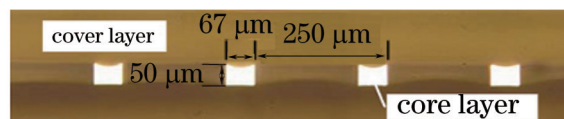


图 3 脊形光波导的横截面图及尺寸信息

Fig.3 Cross section and size information of rib optical waveguide

### 3 波导耦合对准及无损测量系统

图4和图5为波导耦合对准及无损测量系统的原理图和实物图。光从激光器发出,经过光纤,在显微镜的辅助下对准输入脊形波导的光通道。通光后利用CCD摄像机拍摄通光图片,得到光波导的散射光强分布,如图6所示。经过算法分析、曲线拟合得到波导的传输损耗。

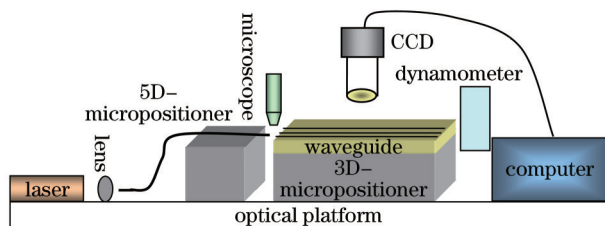


图4 波导耦合对准及无损测量系统原理图

Fig.4 Schematic diagram of waveguide coupling alignment and measuring system without damage

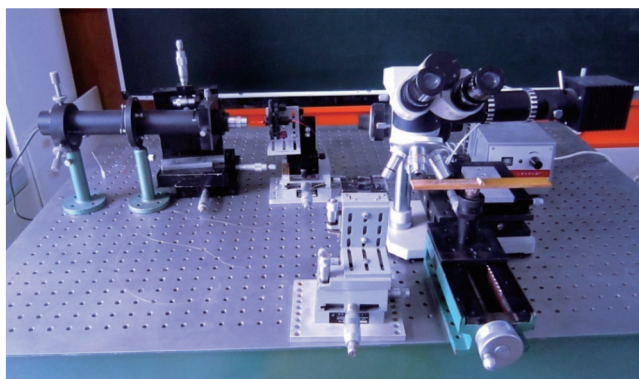


图5 波导耦合对准及无损测量系统实物图

Fig.5 Image of waveguide coupling alignment and measuring without damage system

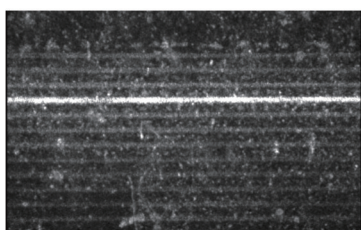


图6 波导无损测量 CCD 拍摄图像

Fig.6 Image of waveguide measuring without damage by CCD

### 4 波导损耗测量理论基础

有损耗的导模功率随传输距离衰减可表示为<sup>[7]</sup>:

$$P_z = P_0 \exp(\alpha z), \quad (1)$$

$$\alpha = (z_2 - z_1)^{-1} \ln(P_{z_1}/P_{z_2}), \quad (2)$$

$$L = -10\alpha(\lg e), \quad (3)$$

式中  $P_z$  为输出功率,  $P_0$  为输入功率,  $z$  为水平距离,  $\alpha$  为衰减系数,  $L$  为损耗系数。可见, 所需拟合的是一条指数衰减曲线, 根据最小二乘法对曲线进行拟合并运算出传输衰减系数  $\alpha$ , 进而可求得传输损耗<sup>[7]</sup>。

### 5 波导无损测量遇到的问题

如图4所示, 当 CCD 拍摄波导通光图像时, 无法保证所拍摄图像能保持高精度水平, 这样会影响波导损耗的最终测量精度。且每次测量时还涉及到调焦等操作, 因此也无法对 CCD 视场内的波导通光长度进行高精度的测量, 也会影响最终的损耗测量精度。

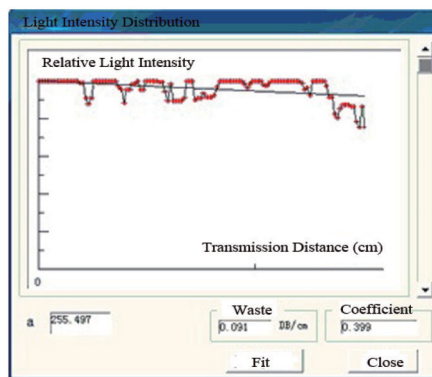


图 7 波导损耗曲线拟合结果

Fig.7 Curve fitting results of waveguide loss

## 6 测量图像的消旋原理及方法

首先观察图 6 所示脊形波导通光图像的特征:其通光图像具有一条水平的最亮白线,其余通道由于存在部分光而具有与主通光通道平行的多条较暗白线。脊形波导本身存在结构特征:平行的 12 条通道,且间距固定并已知大小。因此,在灰度行统计上会出现周期性极大值的规律:

$$P_i = \sum_j P(i,j). \quad (4)$$

上式为灰度行统计公式,  $P(i,j)$  代表像素点  $(i,j)$  的灰度值,  $P_i$  代表第  $i$  行灰度和。按照(4)式进行计算,可以得到图 6 所示的波导散射图像的行灰度和统计值。图 8 为未消旋时原始测量图像的行灰度和统计分布图。其中横坐标为图像的行,纵坐标为对应行的灰度和。如图 8 所示,中间存在一个灰度和最大的行,以及几个间隔相等的灰度极大值。有些灰度极大值较小是因为该通道散射光强较小,光输入小,故通道内散射光强小。由于在进行灰度和统计的时候,是按照逐行计算。因此,假如测量图像没有高精度水平,则行统计结果无法得到最大值。只有当图像绝对水平时,行灰度和最大值才会出现。利用此原理,将原始图从  $-45^\circ \sim +45^\circ$  范围内逐渐旋转,当旋转到特定角度时,对应测量图像的行灰度和统计出现最大值,这时旋转后的测量图像即为波导通光方向为高精度水平的测量图像,而该角度即为原始测量图像的消旋角度。将原始图像旋转相应的角度即可实现测量图像的消旋。图 9 为消旋后的测量图像行灰度和统计。图 9 中行灰度和最大值 162909 大于图 8 中行灰度和最大值 160735,而旋转角度为  $-0.38^\circ$ 。利用未消旋原始测量图像测得波导损耗为 0.14 dB/cm,消旋后测得波导损耗为 0.16 dB/cm,而截断法测量所得波导损耗为 0.21 dB/cm。可见,消旋后损耗测量值更接近于真实值,即测量误差减小。

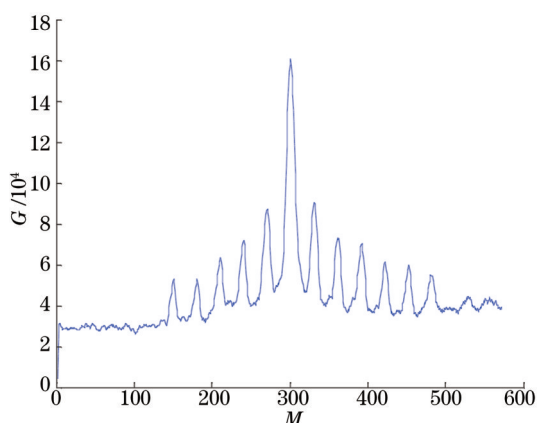


图 8 损耗测量图像行灰度和统计

Fig.8 Sum of line gray of waste measuring image

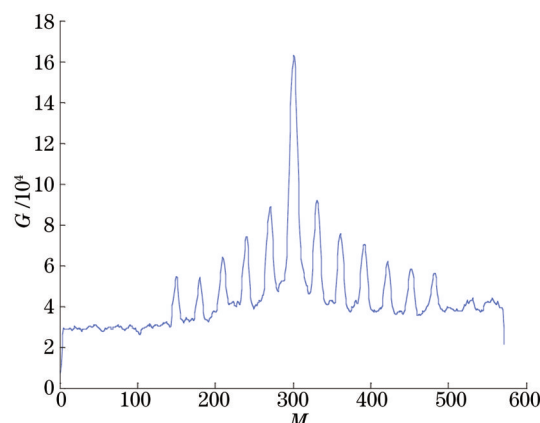


图 9 损耗测量图像消旋后行灰度和统计

Fig.9 Sum of line gray of waste measuring image after eliminating rotation

## 7 测量图像的通光尺寸估计

如图6所示,由于波导通光图像为水平的亮线,因此,将图像按照上述方法进行消旋处理后,可以根据波导的结构参数,推导出波导的通光尺寸。由于脊形波导的脊宽为 $67\ \mu\text{m}$ ,而波导可以近似认为只在脊形区域内传输,如果测量出波导光强极大值所占的像素宽度,则即可求得脊形波导脊宽所占的像素数,则用脊宽除以其所占的像素数即可得到每个像素对应的实际长度,利用每个像素的实际长度乘以整个CCD视场内的测量图像通光长度所占的像素数,即可得到波导通光长度的实际值。

如图9所示,可以看到行灰度和统计的分布规律,根据最大值以及最大值下降到一半所对应的像素行数,即可得到行灰度和最大峰对应的像素宽度,利用此宽度对应 $67\ \mu\text{m}$ 的特点,根据(5)式,可得每个像素对应的实际长度(单位为厘米)。

$$l = 0.0067/\Delta N, \quad (5)$$

式中 $l$ 为每个像素对应的长度, $\Delta N$ 为行灰度和最大峰对应的像素宽度。CCD全视场内波导的通光长度尺寸为

$$L = lN_i. \quad (6)$$

式中 $L$ 为通光尺寸, $l$ 为每个像素对应的长度, $N_i$ 为第 $i$ 个通光行所占的像素数。根据此方法,可得图6所示波导的通光尺寸为 $0.519\ \text{cm}$ 。如图3所示,利用电镜扫描方法测得实际通光尺寸为 $0.520\ \text{cm}$ 。可见,利用上述方法可以利用测量图像本身的信息自动估计出CCD全视场通光尺寸大小,且结果准确,不用使用其他辅助设备。

## 8 结 论

在CCD摄像技术测量方法使用过程中,不可避免的会由于测量图像精度水平不高,CCD测量全视场长度无法高精度估计而影响测量误差和效率。通过挖掘测量图像自身的特征,提出了测量图像的消旋技术和尺寸自动估计算法,实现了图像的自动消旋和通光尺度自动估计,无需其他辅助工具和设备,并通过截断法等常用方法进行了对比验证。结果表明该方法能够很好的解决这一难题。所提出的问题来源于工程实际,提出了理论和方法,并进行了验证,对于研究光波导无损测量具有重要的应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua, *et al.*. Polymer material for optical waveguide used in integrated circuit[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(7): 36-40.  
温昌礼, 季家镛, 窦文华, 等. 集成电路用聚合物光波导材料[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(7): 36-40.
- 2 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua, *et al.*. Improvement of the technology of making multi-mode polysiloxan waveguides[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(9): 094202.  
温昌礼, 季家镛, 窦文华, 等. 制备多模聚硅氧烷光波导关键技术的改进[J]. *物理学报*, 2012, 61(9): 094202.
- 3 Wen Changli, Ji Jiarong, Feng Xianghua, *et al.*. Fabrication of the multi-mode rib-waveguide and its coupling and wasting measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212005.  
温昌礼, 季家镛, 冯向华, 等. 多模脊形光波导的制备及其耦合对准和损耗测量系统[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0212005.
- 4 Yasuyuki Okamura, Shinji Yoshinaka, Sadahiko Yamamoto. Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: a simple method[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(23): 3892-3894.
- 5 Yasuyuki Okamura, Shinji Sato, Sadahiko Yamamoto. Simple method of measuring propagation properties of integrated optical waveguides: an improvement[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(1): 57-60.
- 6 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Chen Yingli. CCD camera photographing in detecting the propagation attenuate coefficient of polymer waveguides[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1997, 31(10): 42-44.  
蒋毅, 曹庄琪, 陈英礼. CCD摄像法测量有机聚合物光波导传输损耗[J]. *上海交通大学学报*, 1997, 31(10): 42-44.
- 7 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Qiu Linlin, *et al.*. Digital measurements and fabrication of low loss optical organic polymer waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(8): 1142-1145.  
蒋毅, 曹庄琪, 仇琳琳, 等. 低损耗有机聚合物光波导的制备及其数字化测量技术[J]. *光学学报*, 1999, 19(8): 1142-1145.
- 8 Lu Zenghai, Yang Xudong, Ren Quan, *et al.*. Determination of the transmission loss of nano-crystal and polymer complex thin films using photographic technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(10): 945-948.

- 吕增海, 杨旭东, 任 途, 等. 用视频摄像技术测定纳米晶聚合物复合薄膜的传输损耗[J]. 中国激光, 2001, 28(10): 945-948.
- 9 Pang Fufei, Han Xiyou, Cai Haiwen, *et al.*. A low loss planar waveguide by using organic-inorganic Sol-Gel[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 509-512.
- 庞拂飞, 韩秀友, 蔡海文, 等. 低损耗有机无机混合溶胶凝胶波导的实验研究[J]. 光子学报, 2006, 35(4): 509-512.
- 10 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua, *et al.*. Theoretical analysis of propagation loss of rib waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0313001.
- 温昌礼, 季家镛, 窦文华, 等. 脊形波导传输损耗理论分析[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0313001.
- 11 Chen Jingwei, Study on Third-Order Nonlinear Optical Properties of Organic  $\pi$ -Electron Conjugated Compound Composite Films[D]. Jinan: Shandong University, 2012: 67-70.
- 陈经纬. 有机 $\pi$ 电子共轭化合物复合薄膜的三阶非线性光学性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2012: 67-70.

栏目编辑: 韩 峰