

# 关于光纤低相干测厚系统中光束耦合效率的研究

陈力 王军华 徐敏

复旦大学光科学与工程系上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200438

**摘要** 将变焦透镜组的方法用于解决光纤低相干测厚系统中光束损失问题,介绍了一套基于光纤低相干干涉技术的测厚装置。根据光纤耦合条件与光纤出射光束能量分布规律,给出了关于光束耦合效率受光束横向尺寸与反射面曲率半径影响的分析;理论分析了变焦透镜组引入测厚系统后耦合效率的提升效果。实验证明,引入变焦透镜后信号损失情况明显得到改善,该系统的相对测量误差小于0.05%。

**关键词** 测量;厚度;低相干;变焦透镜

**中图分类号** O435.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.071201

## Light Beam Coupling Efficiency of Thickness Measurement System Based on Low-Coherent Fiber-Optic Interferometry

Chen Li Wang Junhua Xu Min

*Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacturing Engineering Center, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438 China*

**Abstract** A thickness measurement device based on low-coherent fiber-optic interferometry is proposed to solve coupling loss in thickness measurement system by using zoom lenses. According to optical fiber coupling condition and beam energy distribution, the light beam coupling efficiency influenced by the transverse size of the light beam and the curvature radius of surface is analyzed. Enhancing effect of coupling efficiency is theoretically analyzed when zoom lenses are applied to thickness measurement device. The experimental results show that the signal intensity is obviously improved via the introduction of zoom lenses and the relative measurement error of device is less than 0.05%.

**Key words** measurement; thickness; low coherent; zoom lens

**OCIS codes** 120.4290; 120.4820; 060.2300

## 1 引言

20世纪90年代以来,基于低相干干涉的厚度测量技术已在国内外取得了较好的发展。例如,1996年,Fukano等<sup>[1]</sup>提出一种多层膜厚度测量技术,利用低相干干涉同时完成对13层薄膜的精密测量。2004年,Ohmi等<sup>[2]</sup>利用低相干干涉技术搭建出一套高速且高精度的玻璃平板厚度测量装置,该系统能实现在1s以内完成对1mm厚度平板的测量,且能保证误差小于0.3%。2013年,Verrier等<sup>[3]</sup>设计了一套高信噪比的低相干法透镜厚度测量系统,并成功将其应用于对隐形眼镜厚度的测量。

近年来,光纤低相干干涉技术在国内外已经被广泛应用于光纤传感、非接触测量和光学相干断层扫描等领域<sup>[4-7]</sup>。相关领域研究工作者也渐渐采用光纤低相干技术代替传统低相干技术对厚度进行测量。然而,苛刻的光纤耦合条件使返回光束能量损失十分严重,导致光纤低相干测厚技术相对于传统低相干测厚技术发

**收稿日期:** 2016-01-19; **收到修改稿日期:** 2016-03-07; **网络出版日期:** 2016-06-22

**基金项目:** 国家科技重大专项(2011ZX02402)

**作者简介:** 陈力(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学设计与光电测量方面的研究。

E-mail: 14210720010@fudan.edu.cn

**导师简介:** 徐敏(1959—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、先进光学制造与光电测量等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn(通信联系人)

展较为缓慢。将光纤低相干技术成功应用于厚度测量的案例并不多见。例如, Murphy 等<sup>[8]</sup>设计了一套光纤低相干厚度测量系统, 基本实现了对 2~6 mm 厚度范围内玻璃平板的测量。在 2010 年, Borgetto 等<sup>[9]</sup>成功将光纤低相干技术应用于对截面方向上具有热梯度的液态薄膜的厚度测量, 但精度不高。由此可见, 光纤低相干测厚技术仍然需要进一步探索。

本文围绕光纤低相干测厚系统中返回光束耦合效率低的问题做了一些理论分析, 提出了一种提高耦合效率的方法, 将该方法成功应用于自行设计的一套光纤低相干测厚系统中, 大大降低了返回光束的耦合损失。

## 2 测厚系统中光束耦合效率的分析

下面所涉及到的分析均是基于一套自行设计的光纤低相干测厚系统, 其原理如图 1 所示。从宽光谱光源超辐射发光二极管(SLD)中出射的光经耦合比为 99:1 的光纤耦合器分光后, 分别进入两个光纤环形器, 并从两个环形器的 2 号端口出射, 形成测量光与参考光。出射后的测量光和参考光, 经光纤准直镜分别投射在被测透镜和参考反射镜上, 被反射后重新耦合入光纤系统, 最后在耦合比为 50:50 的光纤耦合器中发生干涉。干涉信号被平衡探测器记录下来, 再经滤波、放大和采集等处理输入计算机参与计算。图 1 中的波分复用器(WDM)是为了将 660 nm 可见激光束引入系统, 从而方便安装被测透镜。测量过程中, 移动参考反射镜的位置, 当测量光与参考光的光程相等时, 低相干干涉条纹对比度最高。两次零条纹的位置差即为前后表面之间的光程差, 进而可根据光程差与折射率完成对透镜中心厚度的计算。

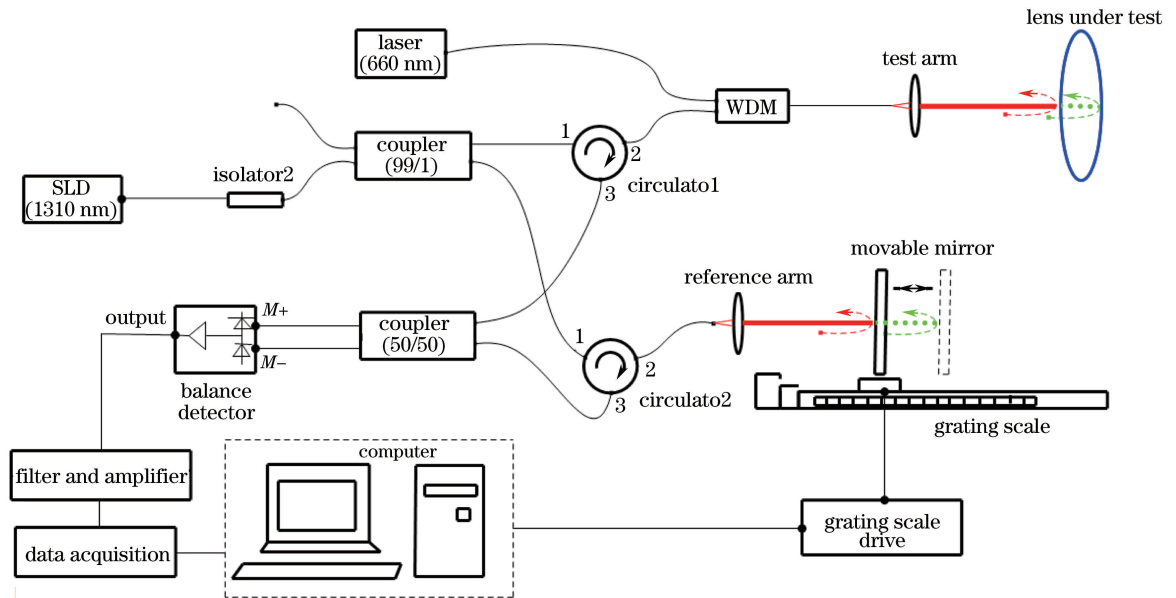


图 1 基于光纤低相干干涉的透镜厚度测量系统

Fig. 1 Lens thickness measurement system based on low-coherent fiber-optic interferometry

在讨论返回光束耦合效率之前, 首先介绍一下光纤耦合的一些必要条件。如图 2 所示, 当光束无法到达光纤纤芯的有效受光面时, 光束将损失。因此第一个耦合条件为光束必须成功投射在光纤纤芯截面上, 即光束直径要小于光纤纤芯直径( $D_{\text{laser}} < D_{\text{fiber}}$ )。光束在光纤中传播的原理为光的全反射, 若光束会聚角度太大, 部分光束虽然能进入光纤纤芯但依然会在传输过程中损耗。故第二个耦合条件为光束还需满足全反射的条件, 即光束会聚角要小于光纤纤芯会聚角( $\theta_{\text{laser}} < \theta_{\text{fiber}}$ )。

如图 3 所示, 对于前述光纤低相干测厚系统, 测量光束经过光纤准直透镜后平行出射。平行光束在反射曲面的作用下, 转变为会聚或发散光束返回, 由于共轭关系失配将导致返回光束无法成功耦合入光纤内部。

上述系统除了几何结构损失, 影响光能量损失的因素还有很多, 如光束的透射和工件的安装误差等。但由于这些因素与光学系统设计关联性较小, 故仅考虑由系统几何结构造成的影响。除了上述提到的两个重要光纤耦合条件, 还需考虑到准直透镜的横向尺寸。若返回光束无法通过准直透镜的受光面, 也将造成光能损失。一般情况下, 由于准直透镜的尺寸相对于光束尺寸较大, 所以这个条件可以不要当作重要要素考虑。

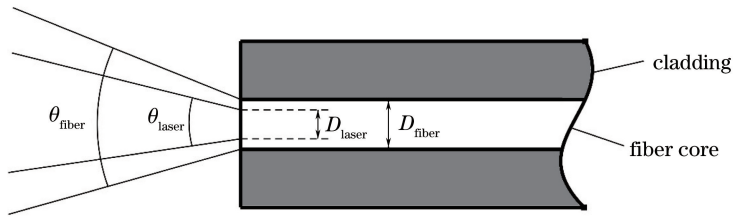


图2 光纤耦合条件

Fig. 2 Optical fiber coupling conditions

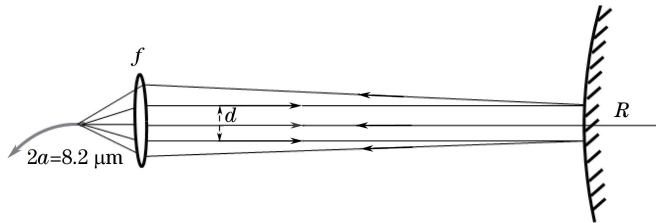


图3 返回光束耦合损失

Fig. 3 Coupling attenuation of backward beam

光纤出射场经过准直透镜后近似服从高斯分布<sup>[10-11]</sup>。可使用数值分析软件 matlab 对光束进行追迹,根据光束能量分布函数与光纤耦合条件计算在不同系统参数下的光能损失。综合考虑,影响光能损失的两个系统变量应为光束横向尺寸与反射表面的曲率半径。故可改变这两个变量,计算能量损失,结果如图 4(a)所示。

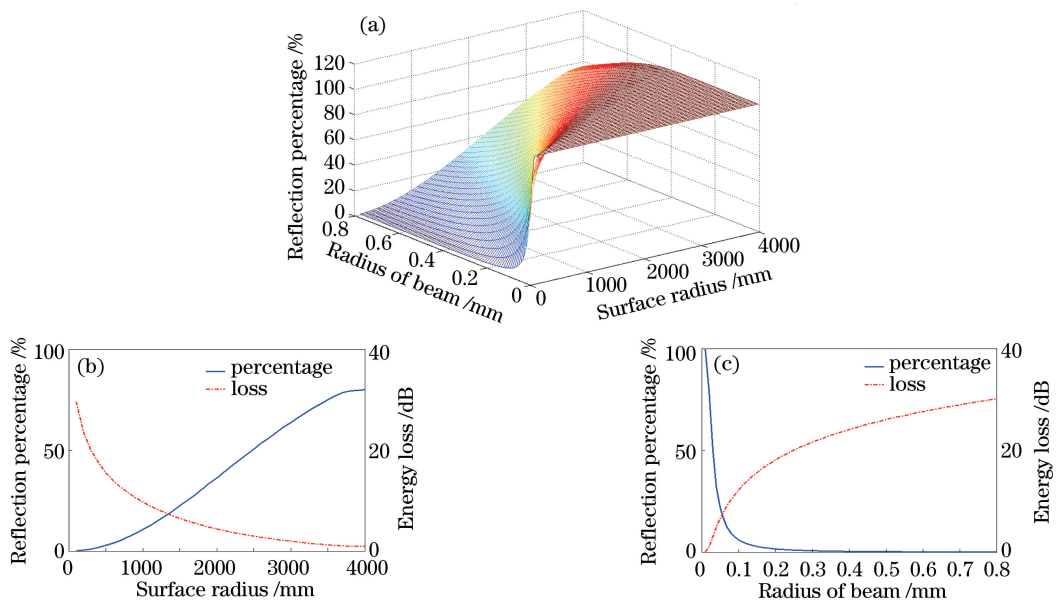


图4 光束耦合效率计算结果图。(a) 整体耦合效率分布图; (b) 光束半径取 0.75 mm; (c) 表面半径取 100 mm

Fig. 4 Calculation results of light coupling efficiency. (a) Distribution of coupling efficiency as a whole;

(b) radius of beam at 0.75 mm; (c) surface radius of 100 mm

图 4(b)表明,当光束半径一定时,光能损失随着反射表面曲率半径的增大而减小。当光束半径取 0.75 mm 时,曲率半径为 1000 mm 以上的反射表面才能保证 10% 左右的耦合效率,即近似平面;图 4(c)表明,当反射表面曲率半径一定时,光能损失随着光束横向尺寸的增加而增加。当反射表面曲率半径取为 100 mm 时,光束半径需要在 0.08 mm 以下才能使得耦合效率高于 10%。然而,如此苛刻的要求在实际应用中难以实现。

### 3 耦合效率的提高方法

为了有效提高返回光束的耦合效率,采用自行设计变焦聚光透镜方案。变焦透镜将光纤出射光束聚焦

于某一平衡位置,使得光束经透镜前后表面反射后,耦合比均可提高。然而,对不同类型的透镜,聚光透镜的作用是不同的。为了弱化前后表面半径对测量效果的影响从而提高测量装置的普适性,可增加工作距离  $l_0$  (设置工作距离为 400 mm),并减小光束的尺寸。光束投射在前后表面上的光斑尺寸很小,故可将前后表面近似平面处理,如图 5 所示。

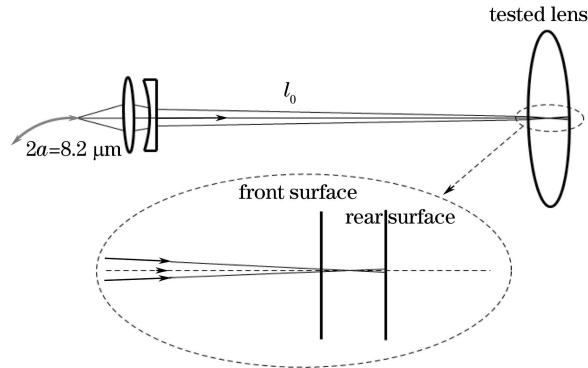


图 5 变焦聚光透镜设计

Fig. 5 Design of zoom condenser lens

聚光透镜组的焦距可调,光束聚焦位置距离最后表面从 400 mm 到无穷大可变。为了验证使用变焦透镜组的效果,选取了一个理想的平衡位置对返回光束耦合效率进行理论计算。该位置的判断标准是,由前表面反射造成的物点位置相对于原聚焦点偏离与由后表面反射造成的偏离相等,则认为此时光束聚焦点位于理想位置。经计算,聚焦位置位于被测透镜内部且离被测透镜前表面距离为  $d/2n$ ,其中  $d$  为测试透镜的标准厚度, $n$  为透镜折射率。考虑到当透镜厚度过大时无实际意义,因此将对厚度的讨论限制在一定范围以内(取 30 mm 为界)。同样对系统进行光线追迹,根据光纤出射光束的强度分布与耦合条件,计算不同标准厚度下的耦合效率,如图 6 所示。

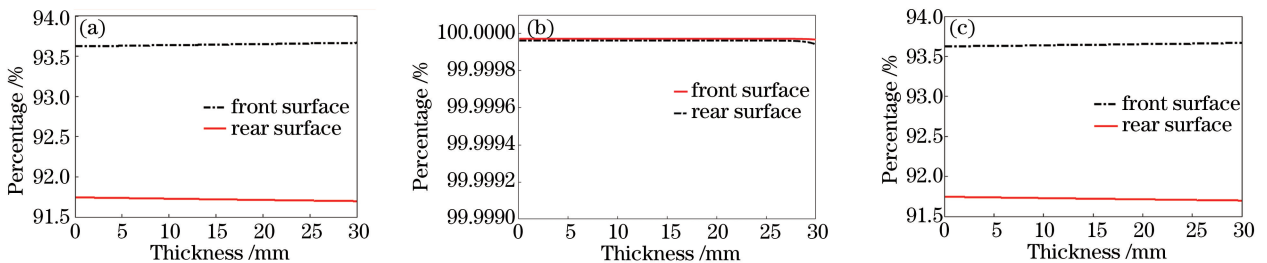


图 6 不同耦合条件下前后表面返回光束耦合效率。(a) 同时考虑光束是否到达纤芯截面与满足全反射条件;

(b) 仅考虑光束是否到达纤芯截面;(c) 仅考虑全反射条件

Fig. 6 Coupling efficiency of backward beam under different conditions. (a) Considering if the light beam reached the fiber core section and met total reflection conditions or not; (b) Considering if the light beam reached the fiber core section or not; (c) Considering if the light beam met total reflection conditions or not

计算过程中主要考虑的两个耦合条件:返回光束能否到达光纤纤芯截面和能否满足全反射条件。图 6(a)表明,同时满足以上两个条件时返回光光束的耦合效率随着透镜标准厚度的变化。当透镜厚度在 0~30 mm 范围内时,引入变焦透镜组后系统几何结构基本不带来返回光束的损失。实际运用中,有限的厚度范围、较长的工作距离和平衡放大器的应用等因素大大地降低了系统对返回光能量的要求。因此实验过程中只需将波分复用器引入的可见光聚焦于透镜前、后表面之间即可实现一定的耦合效率(约 10% 以上即可)。图 6(b)与图 6(c)表明仅考虑光束是否到达纤芯截面或是否满足全反射条件时耦合效率的计算结果。通过对比得到,在一定厚度范围内影响测厚系统返回光束耦合效率的主要因素是反射条件。

## 4 实验与结果

根据提到的系统设计,搭建了透镜厚度测量实验装置,如图 7 所示。实验采用了中心波长为 1310 nm,



半波宽为 85 nm 的 SLD 光源,其光功率为 10.8 mW。移动参考反射透镜的位置,参考镜的位置由分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$  的光栅尺位移传感器记录,并被用于透镜中心厚度的计算。100 MHz 的高速平衡光电探测器用于完成光信号到电信号的转换,其响应光谱范围为  $800 \sim 1700 \text{ nm}$ 。

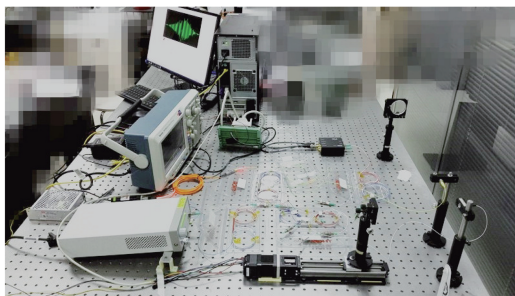


图 7 厚度测量实验装置

Fig. 7 Experimental device picture for measuring lens thickness

若采用原光纤准直透镜的方式,近乎所有光束均无法返回,实验根本不能得到有效的条纹信号。使用变焦透镜组后的某一次实验的采样信号如图 8 所示。图 8(a)表明,整个测量过程中出现两次干涉条纹信号。两次条纹的出现是由于随着参考光路的光程变化,分别与从透镜前表面返回的测量光光程和后表面返回测量的光程匹配时干涉得到的。为了便于观察,将信号在两次零光程差位置的附近展开,如图 8(b)和图 8(c)所示。

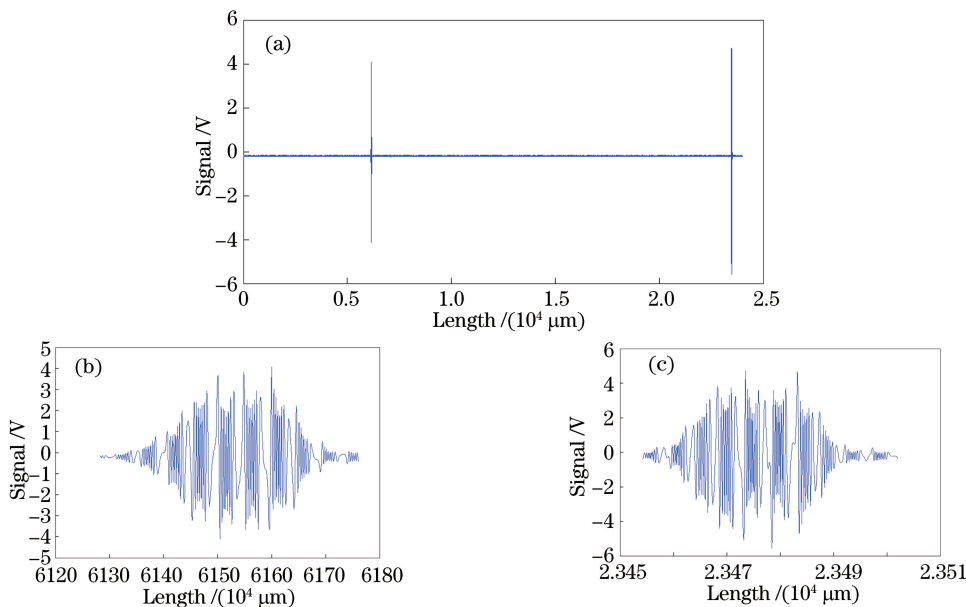


图 8 低相干干涉条纹信号。(a) 测量过程中干涉条纹信号;(b) 前表面干涉条纹信号;(c) 后表面干涉条纹信号

Fig. 8 Signal of low-coherence interference fringe. (a) Signal under measurement;

(b) signal at front surface; (c) signal at rear surface

图 8(b)和图 8(c)的条纹信号十分清晰,说明使用变焦聚光透镜的方式有效地减小了光信号的损失。根据相干长度公式,计算得到在零光程差位置前后约  $21.45 \mu\text{m}$  位置内均有条纹信号出现。因此如何解调条纹信号得到零光程差的位置,将直接影响到测量的精度。采用一种基于三次多项式拟合法的零条纹解调方法,三次多项式拟合法对信号进行了积分、滤波、三次拟合和微分等数值运算,精确提取到零光程差位置。相对于传统的高斯拟合法,三次多项式拟合法较为简单,且解调效果良好。为了测试该装置对各种类型透镜的适应性,选取了 6 种不同类型的透镜,测量结果如表 1 所示,测量厚度与标准厚度的相对误差均小于  $0.05\%$ 。实验证明,变焦透镜组的方法确实能够减小信号损失,进而使得光纤低相干测厚装置能够有效完成对透镜中心厚度的非接触式精密测量。

表 1 测量结果  
Table 1 Measuremental results

Lens type	Standard thickness /mm	Measuremental result /mm	Error /%
Biconvex	10.0000	10.0045	0.045
Plano-convex	9.0000	9.0040	0.044
Meniscus	8.0000	8.0040	0.050
Biconcave	6.0000	5.9970	0.050
Plano-concave	6.0000	5.9980	0.033
Concavo-convex	5.0000	4.9980	0.040

## 5 结 论

基于光纤低相干干涉的透镜厚度测量装置的设计着重分析了返回光束的耦合效率,发现高耦合效率对光学系统的设计要求十分苛刻。为了提高系统返回光束的耦合效率,提出了一种采用变焦聚光透镜组的方法。变焦透镜组将出射光束聚焦于某一平衡位置,使得经透镜前表面和后表面反射的光束更容易满足光纤耦合条件,从而提高了耦合效率。该变焦系统工作距离设置较长,故当透镜厚度在一定范围内时,前后表面可被当作平面处理,从而使该系统适用于不同类型的透镜。最后给出测量装置的实验结果,证明该方法可有效提高光信号强度,且该透镜厚度测量系统相对误差小于 0.05%。

## 参 考 文 献

- Fukano T, Yamaguchi I. Simultaneous measurement of thicknesses and refractive indices of multiple layers by a low-coherence confocal interference microscope[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(23): 1942-1944.
- Ohmi M, Nishi H, Konishi Y, *et al.*. High-speed simultaneous measurement of refractive index and thickness of transparent plates by low-coherence interferometry and confocal optics[J]. *Meas Sci Technol*, 2004, 15(8): 1531-1535.
- Verrier I, Veillas C, Lepine T. Influence of interfaces reflectivity for central thickness measurement of a contact lens by low coherence interferometry[J]. *J Eur Opt Soc-Rapid*, 2013, 8(1): 92-103.
- Zhao Keqiang, Xie Fang, Ma Sen, *et al.*. Research on a wavenumber resolved low coherence interferometry for step height measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112006.  
赵可强, 谢芳, 马森, 等. 基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1112006.
- Chen Chaoliang, Gao Wanrong. Method of measuring dispersion and refractive index of transparent object based on spectral fiber low coherence interferometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1008005.  
陈朝良, 高万荣. 基于光谱光纤低相干的透射样品色散和折射率测量方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1008005.
- Chen Xiaojie, Bai Baoping, Chen Xiaodong, *et al.*. An automatic delay correction algorithm for improving imaging resolution of swept source optical coherence tomography system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1204001.  
陈效杰, 白宝平, 陈晓冬, 等. 一种提高扫频光学相干层析成像分辨率的延时自动校正算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1204001.
- Shi Zhonghua, Yang Baoxi, Wei Zhangfan, *et al.*. Research progress in optical spacing measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040004.  
师中华, 杨宝喜, 魏张帆, 等. 光学镜面间距测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040004.
- Murphy D F, Flavin D A. Dispersion-insensitive measurement of thickness and group refractive index by low-coherence interferometry[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(25): 4607-4615.
- Borgetto N, Galizzi C, André F, *et al.*. A thickness measurement technique based on low-coherence interferometry applied to a liquid film with thermal gradient[J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 2010, 34(8): 1242-1246.
- Deng Ke, Wang Bingzhong, Wang Xu, *et al.*. Technology of coupling beam into single-mode fiber in free space optical communication system[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(5): 889-891.  
邓科, 王秉中, 王旭, 等. 空间光-单模光纤耦合效率因素分析[J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(5): 889-891.
- Chen Haitao, Yang Huajun, Li Tuohui, *et al.*. Influence of the fiber displacement on coupling light beam into single-mode fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 75-78.  
陈海涛, 杨华军, 李拓辉, 等. 光纤偏移对空间光-单模光纤耦合效率的影响[J]. *激光与红外*, 2011, 41(1): 75-78.