



基于新型激光干涉仪的玻璃测厚实验装置

王晓娜¹, 陈珂², 周新磊², 陶鹏程²

(1. 大连理工大学 物理学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 大连 116024)

摘要: 设计了一种用于玻璃厚度测量的空间相位调制型激光干涉仪, 该干涉仪主要由垂直腔面发射激光器(VCSEL), 单模光纤和线阵电荷耦合器件(CCD)组成, 玻璃上、下表面的反射光产生双光束干涉, 生成的空间相位调制干涉图像被 CCD 探测, 图像的空间频率与玻璃厚度成比例, 厚度测量分辨率可以达到纳米量级。该玻璃测厚教学实验装置具有体积小和成本低等优势, 涉及光学干涉、激光原理、光电探测、现场可编程门阵列(FPGA)、电子电路、虚拟仪器、数字信号处理等诸多内容, 适合于高年级本科生的教学实验。

关键词: 激光干涉仪; 双光束干涉; 玻璃测厚; 线阵 CCD; LabVIEW

中图分类号: TP274.4

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20190193](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20190193)

Experimental Device for Glass Thickness Measurement Based on a Novel Laser Interferometer

WANG Xiaona¹, CHEN Ke², ZHOU Xinlei², TAO Pengcheng²

(1. School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A spatial phase modulation laser interferometer for glass thickness measurement is designed. The interferometer was mainly composed of a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), a single mode fiber and a linear array charge coupled device (CCD). The reflected lights from the two surfaces of the glass produced two-beam interference. The generated spatial phase modulated interference image was detected by the CCD. The spatial frequency of the image was proportional to the thickness of the glass. The thickness measurement resolution could reach the nanometer level. The glass thickness measuring experimental device has advantages such as small volume and low cost. It involves optical interference, laser principle, photoelectric detection, field programmable gate array (FPGA), electronic circuit, virtual instrument, digital signal processing. It is suitable for teaching experiments of senior undergraduates.

Key words: laser interferometer; two-beam interference; glass thickness measurement; linear CCD; LabVIEW

目前, 在非接触光学玻璃测厚等应用领域, 尚且缺乏低成本的高精度激光干涉测量方法。并且, 各种常见的激光干涉仪使用较多的高精密光学元件, 存在结构复杂和成本较高等问题, 影响了激光干涉仪的推广应用。玻璃的非接触式厚度测量对于在线质量控制和精确测试非常重要。传统的非干涉测量方法利用测量由玻璃上表面和下表面反射的两束光之间的距离来实现玻璃厚度测

量^[1], 测量精度限制在几十微米。为了更精确的测量, 各种光学干涉仪, 如法布里-珀罗干涉仪(FPI)^[2]、斐索干涉仪(FI)^[3]、马赫-曾德干涉仪(MZI)^[4]、迈克耳逊干涉仪(MI)^[5-6]和低相干干涉仪^[7]等被应用于该领域。与非干涉测量法相比, 干涉仪的结构复杂得多。这些干涉测量法的共同原理是测量干涉仪中的光程差(OPD), 其干涉谱通常需使用光谱仪来测量, 这使得系统成本较高。

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 十三五国家科技重大专项科研任务(2016ZX05057006); 辽宁省普通高等教育本科教学改革研究项目(201600126); 大连理工大学实验室重点建设项目(2018006)。

作者简介: 王晓娜(1976-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事先进传感器方面的研究。

通信作者: 陈珂(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感和激光光谱方面的研究。E-mail: chenke@dlut.edu.cn

本实验设计了一种空间相位调制激光干涉仪 (SPMLI) 来测量平板玻璃的厚度, 这种结构相对简单的双光束干涉仪主要由垂直腔面发射激光器 (VCSEL)、单模光纤和线性电荷耦合器件 (CCD) 组成, 通过计算干涉图像的空间频率来测量平板玻璃的厚度^[8]。

1 激光干涉仪原理与仿真

激光干涉仪的结构如图 1(a) 所示。从光纤端面出射的激光在空间中发散且具有高斯空间分布, 以 45° 斜入射到待测玻璃上, 随后, 玻璃上表面和下表面反射的光在线阵 CCD 表面产生多光束干涉。由于玻璃的两个表面的反射率通常小于 10%, 因此干涉仪可以近似为双光束干涉仪。所产生的空间相位调制干涉图像由与光纤平行放置的 CCD 探测。激光干涉仪的几何光路如图 1(b) 所示。

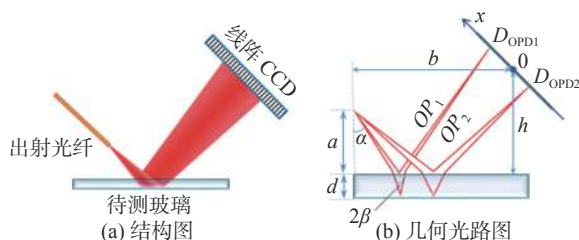


图 1 激光干涉仪原理图

从光纤端面出射, 经待测玻璃上下表面反射, 最终到达线阵 CCD 表面的两束光的光程可分别表示为:

$$OP_1 = \sqrt{\left(h + a + \frac{x}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(b - \frac{x}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (1)$$

$$OP_2 = \frac{h + a + \frac{x}{\sqrt{2}}}{\cos \alpha} + \frac{2nd}{\cos \beta} \quad (2)$$

式中, x 为 CCD 上的像素点与 CCD 中心之间的距离, a 为光纤端面与待测玻璃上表面之间的垂直距离, b 为光纤端面与 CCD 中心之间的水平距离, h 为 CCD 中心与待测玻璃上表面之间的垂直距离, n 为待测玻璃的折射率, d 是待测玻璃厚度, α 和 β 分别是待测玻璃外部和内部的入射角。

根据 Snell 定律, α 与 β 之间满足^[8]:

$$\sin \alpha = n \sin \beta \quad (3)$$

此外, 由图 1(b) 中几何关系可得:

$$\left(h + a + \frac{x}{\sqrt{2}}\right) \tan \alpha + 2d \tan \beta = b - \frac{x}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$h + a = b \quad (5)$$

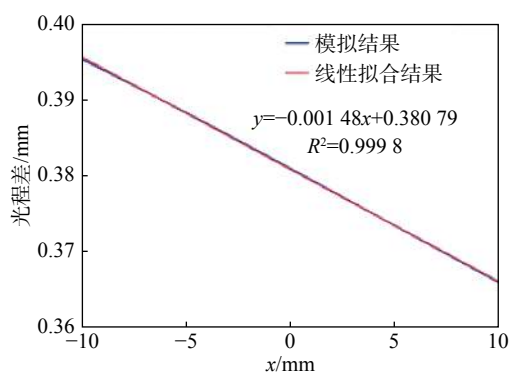
两束反射光之间的光程差为:

$$D_{OPD} = OP_2 - OP_1 \quad (6)$$

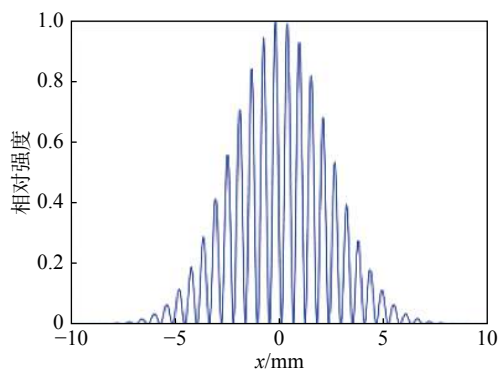
根据式(1)~式(6), 可以模拟计算出干涉光的光程差在 CCD 上的分布, 结果如图 2(a) 所示, 其中 $a=1\text{mm}$, $d=0.15\text{mm}$, $n=1.453$, $h=50\text{mm}$ 。图 2(a) 表明干涉光的光程差在 CCD 上呈近似线性分布, 其拟合优度 R^2 为 0.999 8, 因此, 干涉光的光程差 (D_{OPD}) 与 CCD 上的位置 (x) 之间的关系可表示为:

$$D_{OPD}(x) = px + q \quad (7)$$

式中, p 和 q 为由图 2(a) 中线性拟合确定的系数, 实际由系统结构参数及玻璃厚度决定。



(a) 干涉光的光程差在 CCD 上的分布



(b) 玻璃厚度为 0.15 mm 时的模拟干涉图像

图 2 干涉光的光程差及模拟干涉图像

CCD 上获取的双光束干涉光的强度可表示为^[8]:

$$I(x) = [I_1(x) + I_2(x)] \left[1 + \gamma \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} D_{OPD}(x) + \pi \right) \right] \quad (8)$$

式中, I_1 和 I_2 分别为经待测玻璃上表面和下表面反射的光的强度, γ 为干涉条纹对比度, λ 为相干光源的中心波长。因此, 式(8)中的空间相位随光程差 D_{OPD} 的变化而变化。

根据光纤端面出射光的高斯空间分布, I_1 和 I_2 可分别表示为^[9]:

$$I_1(x) = RI_0 \frac{w_0^2}{w^2(r_1)} \exp\left(-2\left(\frac{x}{w(r_1)}\right)^2\right) \quad (9)$$

$$I_2(x) = R(1-R)^2 I_0 \frac{w_0^2}{w^2(r_2)} \exp\left(-2\left(\frac{x - 2d \cos \alpha \tan \beta}{w(r_2)}\right)^2\right) \quad (10)$$

式中, R 为玻璃的反射率, I_0 为光纤端面出射光的光强, w_0 为单模光纤的模场半径, w 为光斑半径, r_1 和 r_2 为轴向距离, 可分别表示为:

$$r_1 = \sqrt{2}b \quad (11)$$

$$r_2 = \sqrt{2}(h+a+2d) \quad (12)$$

根据式(8)~式(12), 可以模拟出玻璃厚度为 0.15 mm 时的干涉图像^[10-11], 如图 2(b)所示。

根据式(7)及式(8), 可以发现干涉图像是具有高斯包络的余弦信号, 干涉图像的空间频率可表示为:

$$f = \frac{p}{\lambda} \quad (13)$$

根据式(1)~式(7)及式(13), 空间频率 f 和待测玻璃厚度 d 之间的关系可通过模拟计算, 其结果如图 3 所示, 其中, 光源中心波长 $\lambda=851.19$ nm。

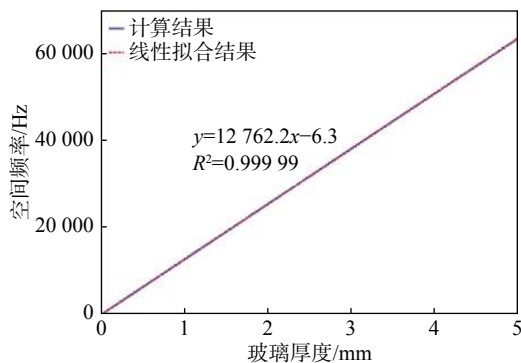


图 3 空间频率 f 和待测玻璃厚度 d 之间的关系

图 3 表明在光源波长一定的情况下, 干涉图像的空间频率与玻璃厚度呈较好的线性关系, 干涉仪的空间频率对厚度测量的响应度可以通过线性拟合得到, 为 12 762.2 Hz/mm。

2 玻璃测厚装置设计

2.1 系统结构

高精度光学玻璃厚度测量仪的结构示意图及实物图分别如图 4 和图 5 所示, 实验装置主要包括相干光源、单模光纤(HI780, Corning)、待测玻璃、线阵 CCD(TCD1304DG, Toshiba)、遮光盒、图像采集与处理电路板和计算机。考虑到待

测玻璃的厚度最大值近 3 mm, 其对应的光程差约为 8 mm, 因此光源的相干长度大于 20 mm 为宜, 对应的激光线宽为 0.04 nm。考虑到 CCD 在波长为 400~900 nm 的范围内具有较高的响应度, 而在该波段内的窄线宽激光光源种类较少, 主要有 DFB 激光器和 VCSEL, 而 DFB 激光器的价格昂贵, 装置中采用低成本的 VCSEL 作为相干光源, 其出射光功率约为 0.5 mW, 中心波长为 851.19 nm, 线宽为 0.02 nm, 对应于 36 mm 的相干长度。

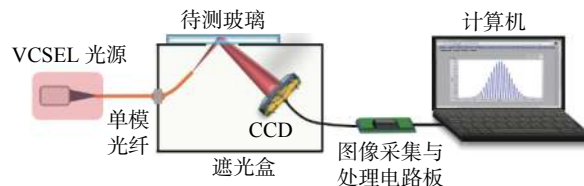


图 4 玻璃厚度测量实验装置的结构示意图

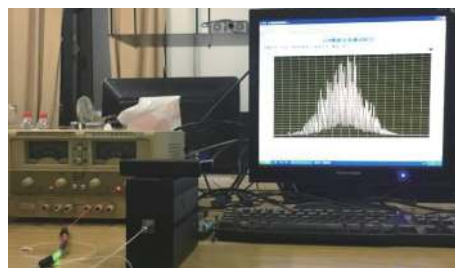


图 5 基于 SPMLI 的厚度测量实验装置的实物图

由式(13)可知, 干涉图像的空间频率与波长有关, 且由于 VCSEL 的中心波长随温度变化而漂移, 因此激光器的工作温度应控制为恒温 25℃。激光耦合到单模光纤中, 随后以 45°的入射角入射到待测玻璃上, 在被待测玻璃的上、下表面反射后到达 CCD 并产生干涉, 干涉光被线阵 CCD 探测。CCD 中光敏面的尺寸为 29.18 mm×0.5 mm, 有效像素为 3 648 个。光纤和 CCD 被放置在遮光盒中以避免环境光的干扰。此外, 在遮光盒的上方开有尺寸约为 10 mm×2 mm 的方孔, 以使出射光能够入射到待测玻璃上并且便于更换待测玻璃。CCD 由基于现场可编程门阵列(FPGA)的图像采集与处理电路板驱动, FPGA 将采集的图像信号通过 USB 接口传输给计算机。最后, 干涉图像由基于 LabVIEW 的计算机程序进一步处理。

2.2 系统电路设计

图像采集与处理电路板如图 6 所示。该电路硬件设计采用四层 PCB 电路板, 主要器件包括 EP4C22E22C8N 型 FPGA 芯片、TCD1304DG 型线阵 CCD、LTC2245 型模数转换器(ADC)和 FT232H

型 USB 转串口芯片等。计算机通过 USB 接口对电路板进行供电以及数据传输。

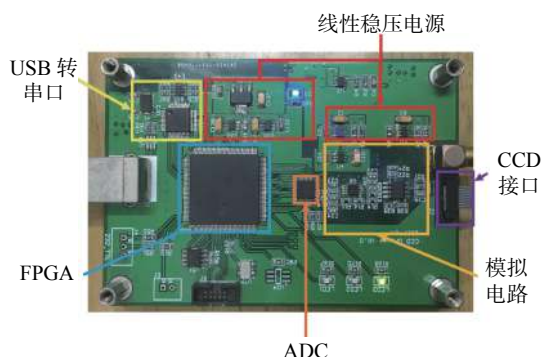


图6 图像采集与处理电路板实物图

TCD1304DG 型线阵 CCD 具有 3 648 个有效像素元,且具有高灵敏度和低暗电流的优点。每个像素元的尺寸为 $8\mu\text{m}\times 200\mu\text{m}$,相邻像素元之间由宽度为 $2\mu\text{m}$ 的沟道分隔^[12]。TCD1304DG 的波长响应范围为 400~1 100 nm。当光照射到 TCD1304DG 上时,电荷在像素元中不断积累,其积累量主要取决于光信号的强度以及光信号的持续时间。在主时钟信号 ϕCLK 、转移门信号 SH 以及积分清除门信号 ICG 这三路时序驱动信号的作用下,积累

在像素元中的电荷以一定的时间间隔串行转移,并以电压变化的形式进行输出,最终形成一段模拟量。TCD1304DG 具有两种工作模式,分别是普通工作模式和电子快门工作模式,本系统采用电子快门工作模式。

2.3 FPGA 程序设计

玻璃测厚装置的下位机系统程序与上位机相互配合,实现的功能是驱动 CCD 工作,将 ADC 采集到的数据通过串口传输给上位机软件并输出图像。根据这个要求,完成了 TCD1304DG 驱动程序代码的编写^[13]。为了确定程序是否符合设计要求,利用仿真软件对 CCD 的驱动时序进行了仿真,仿真结果如图 7 所示。

2.4 LabVIEW 程序设计

当以 FPGA 为核心的下位机系统将数据通过串口传输到计算机时,需要设计用于接收、存储、处理和显示的上位机软件^[14]。本系统的上位机软件采用 LabVIEW 进行编写。信号处理过程主要包括了去包络、小波去噪和高精度频率计算等。LabVIEW 程序设计流程图以及程序前面板分别如图 8 和图 9 所示。

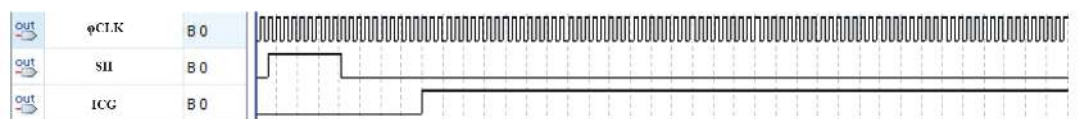


图7 CCD 驱动程序仿真结果

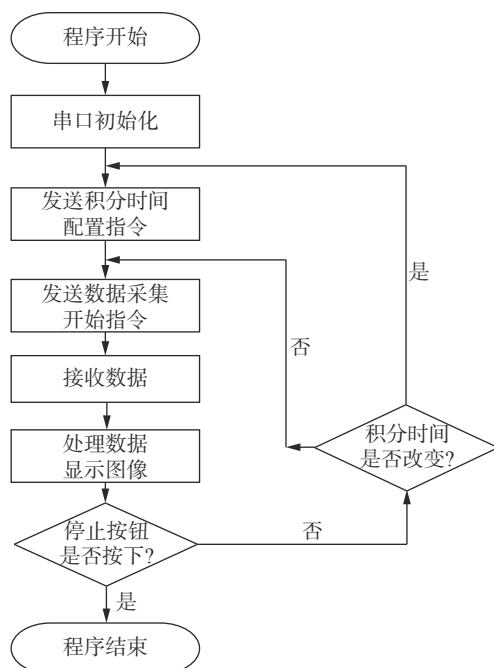


图8 LabVIEW 程序设计流程图

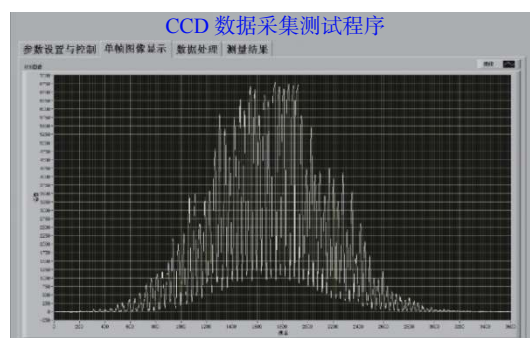


图9 LabVIEW 程序前面板

3 测试实验与结果分析

对厚度分别为 0.156 mm 和 0.54 mm 的玻璃进行测量, CCD 的积分时间设置为 10 ms, 采集的干涉图像如图 10(a)和图 10(b)所示。干涉图像随着待测玻璃厚度的增加而呈现不对称性,这是由经待测玻璃下表面反射的光的光强峰值右移所引

起。选择第 1 701~2 700 的像素点的测量值用于信号处理。利用快速傅立叶变换(FFT)可以较容易地计算处理后的干涉图像的空间频率,然而其精度受到 CCD 像素数的限制。为了提高测量精度,应用非零填充 FFT 及 Buneman 频率^[15]估计获得双光束干涉图像的空间频率。

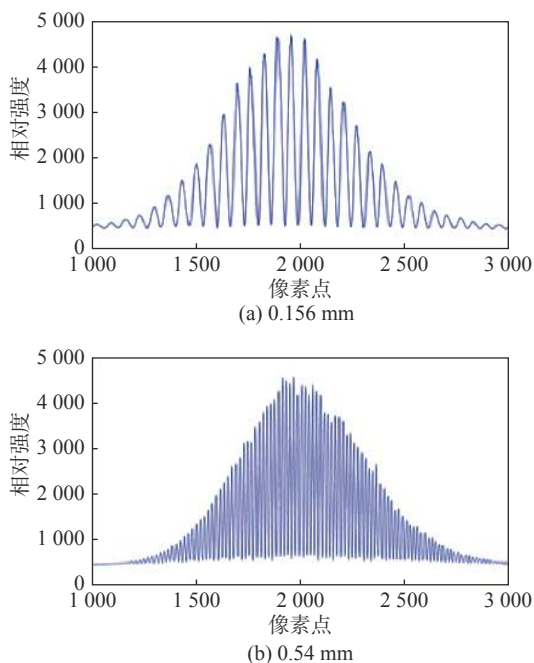


图 10 不同玻璃厚度的干涉图像

为了验证空间频率和玻璃厚度之间的线性关系,我们测量了 8 块厚度分别为 0.15, 0.193, 0.54, 0.83, 1.03, 1.504, 2.04, 2.512 mm 的玻璃,并对结果进行线性拟合,结果如图 11 所示,设计厚度测量系统的响应度为 12 951.9 Hz/mm。测量结果与图 3 中的仿真结果(12 762.2 Hz/mm)基本吻合。

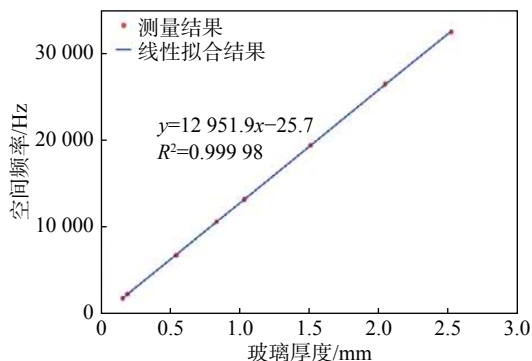


图 11 空间频率测量结果与玻璃厚度关系

在对响应度进行标定后,对 8 种厚度的玻璃进行了连续测量实验。测量结果平均值及标准差如表 1 所示,结果表明厚度测量分辨率达到纳米

级。由于单个余弦周期中的像素数量较少,因此对于较厚的玻璃,测量误差及标准差相对较大。对于玻璃厚度的静态测量,使用多次测量求平均值法可将分辨率提高到亚纳米级别。

表 1 玻璃厚度连续测量实验结果

标准值/ μm (Micrometer)	平均值/ μm (SPMLI)	标准差/nm
156	155.426	3.3
193	192.720	3.6
540	538.940	5.8
830	830.367	6.5
1 030	1 028.809	9.3
1 504	1 505.754	12.4
2 040	2 045.562	13.1
2 512	2 507.771	15.2

4 结束语

本文针对高精度玻璃测厚需求,提出并设计了一种结构简单的激光干涉测厚装置。该装置利用来自玻璃上、下表面的反射光产生的双光束干涉图像实现玻璃厚度测量。建立了干涉仪的数学模型,仿真结果表明,干涉图像的空间频率与玻璃厚度之间存在良好的线性关系。厚度测试范围为 15.6 μm ~2.5 mm,并且测量厚度可以通过改变干涉仪结构参数来扩展。厚度测量实验表明,测厚系统的响应度为 12 951.9 Hz/mm,同时,空间频率对玻璃厚度的响应是线性的,与仿真结果一致。连续测量实验结果表明,厚度测量可达纳米级分辨率。该实验的实现可以帮助本科生深入理解波动光学以及光电检测的相关原理。

参考文献

- [1] 王道光, 齐景山, 刘淑娥, 等. 迈克尔逊干涉仪实验相对误差的探索[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(6): 251-253.
- [2] 黄剑, 詹维纳, 陈杨黎. 基于法布里-珀罗干涉的微悬臂偏移检测系统[J]. 光子学报, 2018, 47(12): 1-7.
- [3] MORENO-HERNANDEZ C, MONZON-HERNANDEZ D, HERNANDEZ-ROMANO I, et al. Single tapered fiber tip for simultaneous measurements of thickness, refractive index and distance to a sample[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22141-22148.
- [4] KIM Y, HIBINO K, SUGITA N, et al. Measurement of absolute optical thickness of mask glass by wavelength-tuning Fourier analysis[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3169-3172.

- [5] PARK J, BAE J, JIN J, et al. Vibration-insensitive measurements of the thickness profile of large glass panels[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 32941–32949.
- [6] 王伟,周峻峰,邵剑波,等. 迈克尔逊干涉仪测量平行透明物厚度或折射率[J]. *实验科学与技术*, 2011, 9(2): 37–39.
- [7] 谭毅. 迈克尔逊干涉实验的仿真研究[J]. *实验室科学*, 2011, 14(2): 121–124.
- [8] 邱英,谭定忠,孟宪松,等. 基于CCD激光扫描尺寸测量实验装置的研制[J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(3): 220–221.
- [9] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社, 1984.
- [10] MARCUSE D. Loss analysis of single - mode fiber splices[J]. *Bell System Technical Journal*, 1977, 56(5): 703–718.
- [11] 毛少娟,陈玉丹,殷建玲. 基于MATLAB的物理光学仿真[J]. *教育教学论坛*, 2016(44): 100–102.
- [12] 朱正,张杨,孙晶华,等. 彩色线阵CCD实验系统研制[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(9): 104–107.
- [13] 黄晓江,白瑞林,邢伟伟,等. 基于FPGA的CCD局部图像读取系统的设计与实现[J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(4): 1292–1295.
- [14] 梁彝,李训浩,林江. 基于MATLAB与LabVIEW的信号处理分析与研究[J]. *实验科学与技术*, 2010, 8(6): 39–41.
- [15] CHEN K, YU Z, YU Q, et al. Fast demodulated white-light interferometry-based fiber-optic Fabry-Perot cantilever microphone[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3417–3420.

编辑 张俊

(上接第 113 页)

- [6] 许金钧,王尊本. 荧光分析法[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [7] 赛默飞世尔科技. 2014. 赛默飞世尔荧光分光光度计应用指南——使用Lumina测定罗丹明B荧光量子产率测量[EB/OL]. [2019-03-02]. <https://www.thermofisher.com/search/results?query=Lumina&persona=DocSupport&navId=0&resultPage=1&resultsPerPage=15&refinementAction=true&focusarea=%E6%90%9C%E7%B4%A2%E5%85%A8%E9%83%A8&sort=>.
- [8] WILLIAMS A T R, WINFIELD S A, MILLER J N. Relative fluorescence quantum yields using a computer-controlled luminescence spectrometer[J]. *Analyst*, 1983, 108(1290): 1067–1071.
- [9] LTD J Y. A Guide to recording fluorescence quantum yields[EB/OL]. [2019-03-02]. <http://www.horiba.com/scientific/products/fluorescence-spectroscopy/application-notes/quantum-yields/>.
- [10] MELHUISH W H. Quantum efficiencies of fluorescence of organic substances: effect of solvent and concentration of the fluorescent solute[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1961, 65(2): 229–235.
- [11] DONG H, DING L, YAN F, et al. The use of polyethyleneimine-grafted graphene nanoribbon for cellular delivery of locked nucleic acid modified molecular beacon for recognition of microRNA[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(15): 3875–3882.
- [12] GUO L, WU S, ZENG F, et al. Synthesis and fluorescence property of terbium complex with novel schiff-base macromolecular ligand[J]. *European Polymer Journal*, 2006, 42(7): 1670–1675.
- [13] WANG Na, WANG Liangchen, YANG Hong, et al. Fluorescent sensors based on organic polymer-capped gold nanoparticles for the detection of Cr(VI) in water[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 2019: 1–10.

编辑 张俊