

A New Non-Contact Method for Measuring Glass Thickness with Laser Interference

Dongjie Tan, Guoye Guan, Fang Lin*

College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu Sichuan
Email: *linfang@scu.edu.cn

Received: Jan. 1st, 2017; accepted: Jan. 14th, 2017; published: Jan. 18th, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A new non-contact method with laser and computer employed has been proposed in this paper, which could be applied to measure thickness of transparent objects, such as glass. The method, which had lower requirement for components and manual operations, was based on Michelson interferometer and would not cause damage to test samples. Under the conditions of college-physics laboratories, its precision could reach 0.1 mm. In addition, a new set of integrated design scheme, which might help improve equipment portability, measurement convenience and precision, was put forward.

Keywords

Non-Contact Measurement, Michelson Interferometer, Glass Thickness, Laser Interference

一种利用激光干涉非接触式测量玻璃厚度的新方法

谭东杰, 关国业, 林 方*

四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都
Email: *linfang@scu.edu.cn

收稿日期: 2017年1月1日; 录用日期: 2017年1月14日; 发布日期: 2017年1月18日

*通讯作者。

摘要

本文提出一种结合激光与计算机实现非接触式测量玻璃等透明物体厚度的新方法。该方法基于迈克尔逊干涉仪，利用转动待测样品造成干涉条纹移动间接测量样品厚度，对器件要求较低，操作简便且不会对待测样品造成损坏。在大学物理实验室条件下，该方法测量精度即可达到0.1 mm。在此基础上，本文还提出了一套封装一体化改进设计方案，有利于提高便携性、测量便利性与精度。

关键词

非接触式测量，迈克尔逊干涉仪，玻璃厚度，激光干涉

1. 引言

接触式测量仪器(如游标卡尺、螺旋测微器等)目前能满足大部分日常生产生活需要；然而在某些特殊情况下，高精度的非接触式测量装置具有不可替代性。例如，在玻璃仪器的制造过程中，往往需要测量处于熔融状态玻璃的厚度和折射率等参数。此时，接触式测量方法不仅可能会影响材料的形状与结构，而且精度十分有限。因此，不少工业生产需要高精度的非接触式测量方法和仪器。

目前，工业上已有利用激光二维扫描非接触式测量物件尺寸的技术[1]-[7]。该技术利用物件对激光的遮挡，在接收屏上产生并记录光强差，从而确定待测物件的轮廓，因此可用于测量物件尺寸。该方法影响测量精度的主要因素是激光成像的稳定性与准确性。为此，光学系统设计时必须做到像面照度分布均匀、杂散光少、成像几何畸变小等，不仅设计较为复杂繁琐，仪器制造成本较高，而且对透明物件的测量效果较差。

本文受到一种非接触式位置测量方法[8]启发，在迈克尔逊干涉仪基础上，设计了一种非接触式测量透明物件(如玻璃)厚度的新方法。在迈克尔逊干涉仪的分束板和可移动反射镜之间放入一自制可转动载物台，将待测样品置于载物台上，转动载物台带动样品发生相对反射镜的微小转动，使得分束激光光程差出现微小变化，即可通过读取干涉条纹变化数来间接测量样品厚度。此方法的优点在于器件成本较低，在大学物理实验室条件下即可达到较高精度。

2. 迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊干涉仪[9]通过将入射光分振幅形成双光束而产生干涉。如图 1(a)所示，光源 S 发出光束，入射到分束板上，分别经反射和透射形成强度相等的光束①和光束②，再经过反射镜 M_1 和 M_2 反射后即可在观察区域形成干涉图样。图中 M_2' 是 M_2 对于分束板反射面所成的虚像。根据激光波长还有 M_1 、 M_2 的相对位置，即可定量计算干涉条纹产生条件。

迈克尔逊干涉仪等效光路如图 1(b)所示。 S_1 、 S_2' 分别是点光源 S 相对 M_1 、 M_2' 形成的两个虚光源，它们到观察点 A 的光程差为

$$\Delta = S_2'A - S_1A, \quad (1)$$

若 $L \gg d$ ，由图中几何关系可得近似表达式

$$\Delta \approx 2d \cos \theta \left(1 + \frac{d}{L} \sin^2 \theta \right) \approx 2d \cos \theta, \quad (2)$$

由此可得干涉亮纹与暗纹出现条件分别为

亮纹： $\Delta = k\lambda$;

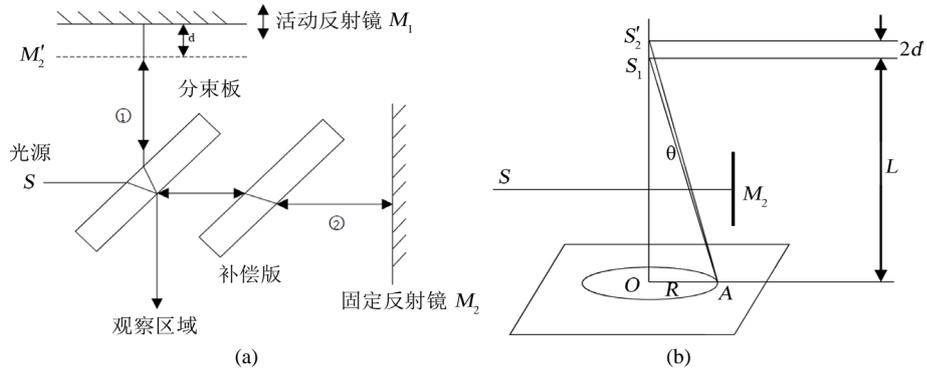


Figure 1. (a) Schematic diagram of Michelson interferometer, (b) equivalent light path of Michelson interferometer

图 1. (a) 迈克尔逊干涉仪原理示意图, (b) 迈克尔逊干涉仪等效光路图

暗纹:

$$\Delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda. \quad (3)$$

其中 k 为整数。如果 M_1 与 M'_2 平行, 则可在光屏上观察到以 O 点为圆心的环形干涉条纹, 如图 2 所示。

3. 非接触式测量玻璃厚度

利用迈克尔逊干涉仪非接触式测量玻璃厚度的实验装置如图 3 所示。实验利用自制可转动载物台来承载待测样品并带动样品转动。载物台中间部分是木制圆形可转动平台, 外圈是带有角度刻度的固定底座; 中间平台部分画出了两条相互垂直的直径 r_1 和 r_2 , 其中 r_1 的延长部分是用于读取角度的指针, 如图 4(a)所示。载物台被放置在迈克尔逊干涉仪分束板和反射镜 M_1 之间, 待测玻璃样品则被放置在载物台中间平台上, 一边与直径 r_2 重合, 如图 4(b)所示; 激光干涉光束在玻璃样品中的光路则如图 4(a)所示。其中 α 为入射角, β 为折射角, γ 为放入样品后光线的偏转角度, x 为样品的厚度, h 为放入样品前光在空气中直线传播的光程。由图中几何关系可得

$$\begin{aligned} \Delta &= h \cdot \left(\frac{1}{\cos \gamma} - 1\right), \\ \alpha &= \beta + \gamma, \\ \frac{h}{\cos \gamma} &= \frac{x}{\cos \beta}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 Δ 为放入样品前后产生的光程差。联立方程组(4)可得两束激光到达光屏时光程差为

$$\begin{aligned} \Delta &= x \cdot \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\cos \beta}, \\ n &= \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 n 为待测样品折射率。若样品折射率非已知参数, 可事先通过其他仪器或方法[10] [11]测出; 也可在测量厚度的同时, 采用附录所述方法测得。于是, 式(5)可写成

$$\Delta = x \cdot \frac{1 - \cos \left[\alpha - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) \right]}. \quad (6)$$

控制转盘转动一定的角度，即改变入射角 α 的大小，可以得到两个不同的光程差，即

$$\Delta_1 = x \cdot \frac{1 - \cos \left[\alpha_1 - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]},$$

$$\Delta_2 = x \cdot \frac{1 - \cos \left[\alpha_2 - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right) \right]}.$$
(7)

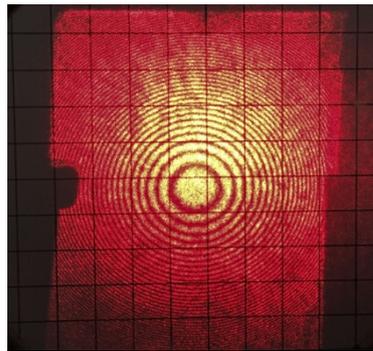


Figure 2. Concentric interference fringes formed by Michelson interferometer with laser source

图 2. 激光点光源通过迈克尔逊干涉仪形成的同心环形干涉条纹

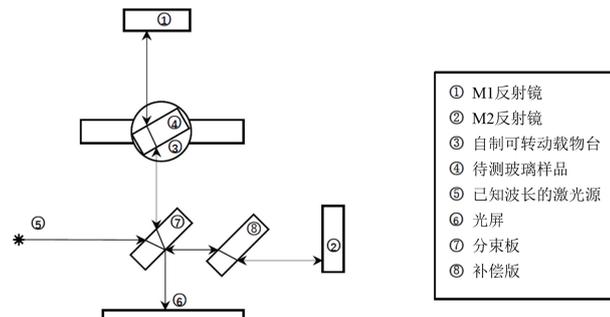


Figure 3. Schematic diagram of experimental device

图 3. 实验装置俯视示意图



Figure 4. (a) Self-made rotatable carrier table, (b) actual placement position of glass sample, (c) light path inside and near by the sample

图 4. (a) 自制可转动载物台实物图, (b) 玻璃样品实际摆放位置, (c) 激光在样品内部及附近空间光路示意图

公式(7)两式相减, 可得

$$\Delta_1 - \Delta_2 = x \cdot \left(\frac{1 - \cos \left[\alpha_1 - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]} - \frac{1 - \cos \left[\alpha_2 - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right) \right]} \right); \quad (8)$$

同时, 光程差由 Δ_1 变为 Δ_2 的过程, 体现为光屏上干涉条纹数的变化, 即

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{l\lambda}{2}, \quad (9)$$

其中 l 为干涉条纹变化数, λ 为激光波长。式(8)、(9)联立即可得厚度 x 的计算公式, 即

$$x = \frac{\frac{l\lambda}{2}}{\frac{1 - \cos \left[\alpha_1 - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]} - \frac{1 - \cos \left[\alpha_2 - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right) \right]}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right) \right]}}. \quad (10)$$

实验中, 首先读取转动平台固连指针的读数 α_{10} , 则初始入射角 $\alpha_1 = 2\pi - \alpha_{10}$; 转动载物台, 记录转动过程中干涉条纹变化数 l ; 转过一定角度后, 再次记录下指针读数 α_{20} , 则此时入射角为 $\alpha_2 = 2\pi - \alpha_{20}$; 将所得数据代入式(10), 利用数学软件 Mathematica[®]即可计算出样品的厚度。

表 1 展示了用上述方法测量多个玻璃样品厚度的结果。以电子游标卡尺测得的数据作为样品厚度标准值。实验结果显示, 上述方法实现了对玻璃或其他透明物体厚度的非接触式测量, 测量值与标准值的

Table 1. Measured values of glass thickness obtained by the non-contact method proposed in this paper

表 1. 用非接触式测量方法得到的玻璃厚度实测数值

标准厚度(mm)	组别 i	测量值(mm)	相对偏差(%)	平均值(mm)
3.85	1	3.80	-1.21	3.82±0.04
	2	3.89	1.03	
	3	3.77	-2.04	
4.81	1	4.77	-0.89	4.85±0.04
	2	4.89	1.73	
	3	4.88	1.42	
7.85	1	7.94	1.14	7.83±0.05
	2	7.79	-0.82	
	3	7.77	-1.03	
9.86	1	9.91	0.52	9.84±0.04
	2	9.81	-0.51	
	3	9.80	-0.64	
11.90	1	11.86	-0.35	11.89±0.05
	2	11.82	-0.64	
	3	11.99	0.74	

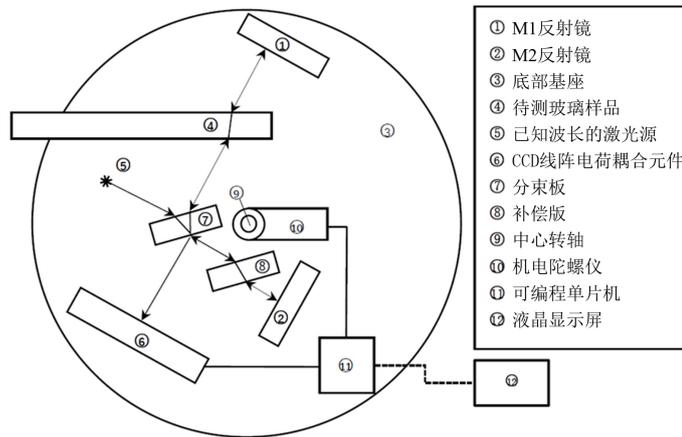


Figure 5. Internal structure of the improved integrated non-contact measuring device

图 5. 改进后的一体式非接触式测量装置内部结构示意图

相对偏差绝对值最大不超过 2.04%，且随着样品厚度增大呈逐渐降低趋势。绝对精度则达到了 0.1 mm 量级，已可满足日常生活需要。实验中，误差主要来源于两个方面，一是人眼无法读取非整数条纹移动，二是平台固连指针读取角度值时误差较大；前者可通过引入 CCD 对干涉条纹成像处理的方法克服，后者则可以使用微型机电陀螺仪精确测值，从而提高测量精度，如下文所述。

4. 小型一体化改进设计方案

本文提出的利用迈克尔逊干涉仪非接触式测量厚度的新方法，原理简单且不需要高精度的昂贵仪器。然而，大学物理实验室所用的迈克尔逊干涉仪体积较大，不便于携带；自制载物台读取角度时精度较低；人眼无法分辨干涉条纹非整数变化；需要将数据录入计算机借助数学软件计算厚度，步骤繁琐且不够直观。为克服以上缺点，本节将提出一种小型化、一体化的装置改进设计方案，以达到方便测量和提高测量精度的目的，主体结构如图 5 所示。

将小型化光学元件固定封装在可绕中心轴定轴转动的扁圆柱状外壳内，构成一体化测量仪。外壳内封装激光光源并由内置电池供电。外壳侧面设置开口，将待测透明样品通过开口置入激光光路中。转动测量仪，利用与转轴联动的微型机电陀螺仪精确测量旋转角度。用 CCD 取代实验室条件下的光屏用于记录干涉条纹的变化。测量仪内置可编程单片机，单片机与机电陀螺仪和 CCD 相连以接收两者读数。将公式(10)固化于单片机中，则单片机可根据机电陀螺仪输入的角度数值和 CCD 输入的条纹变化数实时计算透明样品厚度并直接显示在液晶显示屏上。通过以上改进，可大幅提高测量装置的便携性、测量便利性和精度，设计测量精度可达到 1 μm 。

5. 总结

本文提出的非接触式测量玻璃厚度的新方法，是基于迈克尔逊干涉仪的二次开发和改进，利用转动样品使干涉光光程发生微小变化，从而引起干涉条纹的变化来间接测量玻璃厚度。在大学物理实验室且通过人眼读取条纹变化数的条件下，该方法已可达到等同于游标卡尺的精度。进一步的一体化改进设计方案则采用工业上广泛使用的微型机电陀螺仪、CCD 和单片机取代人工，简化了测量步骤，同时将设计测量精度提高到 1 μm 量级。

该非接触式测量方法为工业生产中无损测量透明物体(如熔融状态下的玻璃，软凝聚态透明材料，等等)的厚度提供了一种简便、精确、廉价的方案，具有较大的研究发展和实用化价值。

参考文献 (References)

- [1] 秦石乔, 陈玉教, 苏勇, 黄勇, 钟钦. 高精度角度自动测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 1999(11): 13-15.
- [2] 张景超, 王玉田, 杨程, 尚明丽. 基于 CCD 技术的玻璃测厚系统[J]. 压电与声光, 2010, 32(1): 149-151.
- [3] 徐新军, 章钦, 张国宏, 袁会敬, 李运恒. 基于 CPLD 的激光测径仪[J]. 玻璃与搪瓷, 2006, 34(1): 25-27.
- [4] 徐新军, 章钦, 张国宏, 袁会敬, 李运恒. JCJ- IIT 二维激光测径仪[J]. 河北省科学院学报, 2007, 24(1): 55-57.
- [5] 尚妍, 徐春广. 光学非接触廓形测量技术研究进展[J]. 光学技术, 2008, 34(s1): 216-217.
- [6] 坂口, 浩昭. 非接触式キャリパセンサの導入経験[J]. 紙パ技協誌, 2014, 68: 291-294.
- [7] 王彩霞. 线阵 CCD 非接触直径测量系统设计[J]. 自动化仪表, 2012, 33(4): 41-44.
- [8] 王志乾, 谢慕君, 乔彦峰. 一种非接触式位置测量方法的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 431-433.
- [9] 王植恒, 何原, 朱俊. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [10] 纪小辉, 陈彤. 基于光电技术的玻璃折射率测量[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 777-780.
- [11] 武旭华, 缪阳. 块状材料的折射率测量实验研究[J]. 计量学报, 2015, 36(6): 588-591.
- [12] 郭永康. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.

附录：利用光路成像测量玻璃折射率

由于激光具有集束、聚能的性质，使其在透明介质中可形成明显可辨的光路。因此可以通过对激光光路成像来测量并计算玻璃折射率，即[12]

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (\text{A1})$$

其中， n 为玻璃折射率， α 和 β 分别为激光在玻璃-空气分界面发生折射时的入射角和折射角。

在暗室条件下对激光光路进行垂直俯视成像，如图 A1(a)所示；使用绘图软件将激光光路和玻璃-空气分界面增强处理后(如图 A1(b)所示)，导入软件 Tracker[®]读取角度 a 和 b ，则激光入射角和折射角分别为 $\alpha = 90^\circ - a$ 和 $\beta = 90^\circ - b$ ；代入式(A1)即可算得玻璃样品的折射率。转动载物台，改变入射角多次测量可降低测量误差。实验数据如表 A1 所示，折射率测量值的相对不确定度为 0.678%。

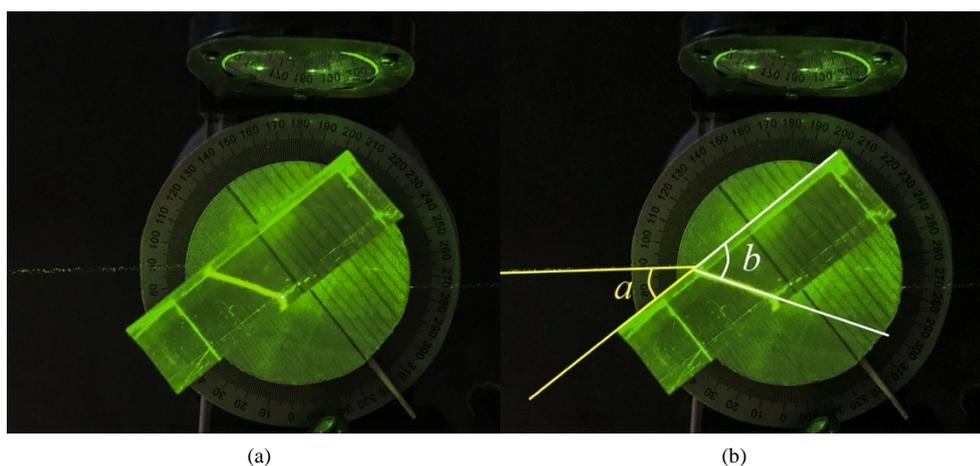


Figure A1. (a) Light path of laser refraction, (b) using image processing software to enhance the light path and the glass-air interface

图 A1. (a) 激光折射光路俯视图，(b) 使用绘图软件增强激光光路和玻璃-空气分界面

Table A1. Measurement of refractive index of glass

表 A1. 玻璃折射率的测量

组别 i	入射角 α_i (°)	折射角 β_i (°)	折射率 n_i	平均值 \bar{n}
1	60.554	32.077	1.640	1.623 ± 0.011
2	59.178	31.209	1.657	
3	51.419	29.207	1.602	
4	39.995	23.390	1.619	
5	60.852	33.151	1.597	

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org