

文章编号:1005-4642(2021)06-0037-04

利用激光散斑测量透明材料的折射率

张 莉,刘元硕,荣振宇,杨伊凡,刘蓬源,韩玉晶

(济南大学 物理科学与技术学院,山东 济南 250022)

摘 要:提出了通过利用激光散斑测量光束横向位移量来测量透明材料折射率的方法. 光线在被测材料表面的入射角为 0° 和 3° 的条件下,分别记录被测材料在不同厚度时的二次曝光散斑图像;在其功率谱的逆傅里叶变换光场中存在 3 个自相关强度分布,通过测量相邻 2 个自相关峰峰值点的间距,即可计算出在该材料厚度不同时所引入的光束横向位移量. 再根据光束横向位移法原理计算出透明材料的折射率,并通过实验验证了该方法的可行性.

关键词:折射率;散斑照相术;光束横向位移;自相关峰

中图分类号:O348.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.06.005

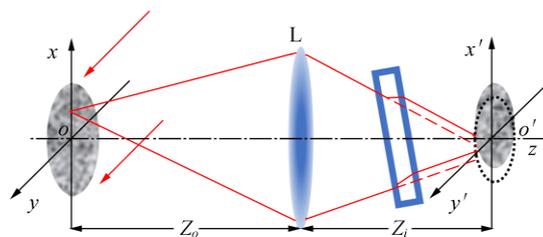
折射率是生物医学、化学化工、食品检测等领域的重要监测指标. 在测量的折射率方法中,有基于几何光学的折射定律,包括最小偏向角法^[1]、全反射法^[1]、光束横向位移法^[2-5]等;也有基于光的干涉原理,利用待测介质对光程差的改变,通过测量干涉条纹的变化来测量其折射率^[6-7];此外,也可以将 2 种方式结合起来,借助光束横向位移使得干涉条纹也发生横向位移,以此测量折射率^[8].

在光束横向位移法当中,光束横向微小位移量的精确测定是实验测量的关键. 本文在此前提出的利用激光散斑测量横向微位移^[9]工作的基础上,提出一种基于散斑照相术测量透明材料折射率的方法,该方法具有结构简单、操作方便等优点.

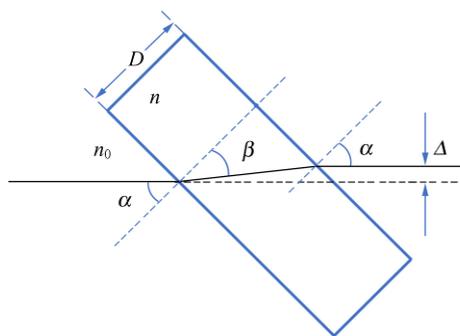
1 实验原理

利用激光散斑测量透明材料折射率的实验光路图如图 1(a)所示. 一束扩束准直的激光束照射到粗糙物体的表面 xoy , 成像透镜 L 将物体表面所形成的散斑在其像平面 $x'o'y'$ 上成像,成像系统的光轴为 z 轴方向. 在像平面前放置一块由透明材料制成的平行平晶,并使其入射面法线与 z

轴平行,处于像平面上的图像传感器(例如 CCD)将采集的散斑强度分布 $S_1(x',y')$ 保存为图像.



(a) 实验光路图



(b) 实验原理图

图 1 利用激光散斑测量透明材料折射率的实验光路图与原理图

收稿日期:2020-10-11; **修改日期:**2021-01-18

基金项目:济南大学校级教研项目(No. JZC1906);济南大学院级教研项目(No. 20wljy03);济南大学博士基金项目(No. XBS1611)

作者简介:张 莉(1976—),女,山西朔州人,济南大学物理科学与技术学院讲师,硕士,主要研究方向为光学信息处理. E-mail:ss_zhangl@ujn.edu.cn

通讯作者:荣振宇(1978—),男,山东威海人,济南大学物理科学与技术学院副教授,博士,主要研究方向为光学信息处理. E-mail:ss_rongzy@ujn.edu.cn



将平行平晶绕其竖直轴旋转 α 角, 其法线在 xoz 平面内与 z 轴方向成 α 角. 由于平行平晶对光束的折射作用, 导致光束在 x 轴方向上被引入 Δ 的横向位移量(如图 1(b)所示):

$$\Delta = D \sin \alpha \left[1 - \frac{n_0 \cos \alpha}{n \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n} \sin \alpha\right)^2}} \right], \quad (1)$$

其中, D 为平行平晶的厚度, n 为平行平晶的折射率, n_0 为空气的折射率. 由此导致像平面 $x'o'y'$ 上所获得的散斑图像相比较于 $\alpha=0$ 时也同步发生了 Δ 的横向位移, 此时采集的散斑强度分布记为 $S_2(x', y')$. 因此二者的强度分布如下:

$$S_2(x', y') = S_1(x' - \Delta, y'). \quad (2)$$

通过计算机将 2 幅散斑图像的强度相加, 得到二次曝光的散斑强度分布为:

$$S(x', y') = S_1(x', y') * [\delta(x', y') + \delta(x' - \Delta, y')], \quad (3)$$

其中, $*$ 为卷积计算符号.

将二次曝光散斑强度分布做傅里叶变换后, 其功率谱分布为:

$$I_G(\xi, \eta) \Big|_{\xi=\frac{x'}{\lambda f}, \eta=\frac{y'}{\lambda f}} = |F\{S_1(x', y')\}|^2 \cdot 2[1 + \cos(2\pi\Delta\xi)]. \quad (4)$$

通过(4)式可以看出该功率谱是由未发生横向位移的散斑功率谱 ($|F\{S_1(x', y')\}|^2$) 和 1 组空间周期为 $T_f = \frac{\lambda f}{\Delta}$ 的余弦条纹相互调制的结果.

将(4)式进行逆傅里叶变换, 则有:

$$F^{-1}\{I_G(\xi, \eta)\} = [S_1(x', y') \otimes S_1(x', y')] * [2\delta(x', y') + \delta(x' - \Delta, y') + \delta(x' + \Delta, y')], \quad (5)$$

其光场强度分布为:

$$|F^{-1}\{I_G(\xi, \eta)\}|^2 = |S_1(x', y') \otimes S_1(x', y')|^2 * [4\delta(x', y') + \delta(x' - \Delta, y') + \delta(x' + \Delta, y')], \quad (6)$$

其中, \otimes 为相关计算符号. 通过(6)式可以看到: 在功率谱的逆傅里叶变换光场的光强分布中, 分别以 $(x'=0, y'=0)$, $(x'=\Delta, y'=0)$, $(x'=-\Delta, y'=0)$ 3 个点为中心分布着 $S_1(x', y')$ 的自相关强度光场. 由于自相关光场在其分布的中心有着极大的自相关峰, 因此在上述光场中测量相邻 2 个自相关强度峰在 x 轴方向上的间距, 便可计算出光束在该方向上所发生的横向位移量 Δ . 同理, 可以将上述方法推广至任意方向发生的光束横向位移量的测量.

根据(1)式可知, 当平行平晶的入射面法线与

z 轴所成 α 角保持不变时, 散斑或光束的横向位移量 Δ 与平行平晶的厚度 D 成线性关系, 即:

$$\Delta = kD, \quad (7)$$

其中, $k = \sin \alpha \left[1 - \frac{n_0 \cos \alpha}{n \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n} \sin \alpha\right)^2}} \right]$. 对线性关系中的斜率表达式进行整理, 可得:

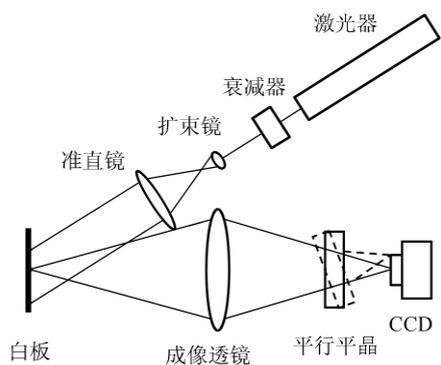
$$n = n_0 \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\left(1 - \frac{k}{\sin \alpha}\right)^2}}. \quad (8)$$

因此, 实验中在保持 α 角不变的条件下, 测量平行平晶在不同厚度 D 时光束的横向位移量 Δ , 再将测量结果依据(7)式进行线性拟合, 最后将拟合斜率 k 以及 α 角代入(8)式即可计算出平行平晶所用透明材料的折射率 n .

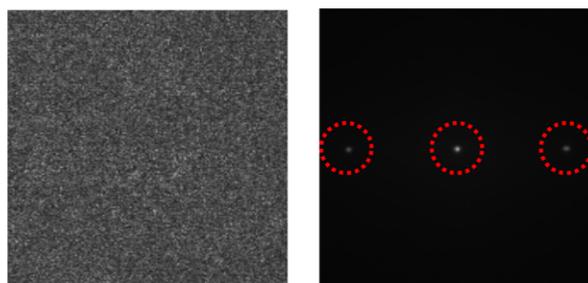
2 实验装置与实验结果

基于上述实验原理, 搭建了如图 2(a)、(b)所示的实验光路. 激光器发出的激光通过由 2 块偏振片组合成的衰减器进行光强调控, 再经扩束准直后照射在白板上, 将厚度为 $D=5$ mm 的平行平晶放入安装在精密旋转台上的固定架[如图 2(c)所示]内, 并通过自准直的方法调整其法线与成像系统的光轴平行, 调节 CCD 的位置使其能够获得清晰的散斑图像.

实验中先利用 CCD 记录下厚度为 $D=5$ mm 的平行平晶在初始状态下的散斑图像 S_1 ; 然后转动精密旋转台, 使得平行平晶的法线与成像系统的光轴形成的夹角 $\alpha=3^\circ$, 并记录下散斑图像 S_2 . 为了提高实验的测量精度, 将另外 4 块完全相同的平行平晶依次加入固定架, 并记录组合厚度分别为 $D=10, 15, 20, 25$ mm 时对应 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=3^\circ$ 的散斑图像. 将同一厚度所记录的 2 幅散斑图像导入 Matlab 软件做等权叠加, 得到该厚度的二次曝光散斑分布, 通过图像处理, 便可计算出在该厚度条件下, 平行平晶组合由 $\alpha=0^\circ$ 转至 $\alpha=3^\circ$ 所引入的光束横向位移量. 当平行平晶组合厚度 $D=10$ mm 时, 所记录的 $\alpha=0^\circ$ 的散斑图像如图 3(a)所示, $\alpha=3^\circ$ 的散斑图像如图 3(b)所示, 等权叠加得到的二次曝光散斑分布如图 3(c)所示, 最终经过处理得到的最终光场强度分布如图 3(d)所示, 图 3(d)中 3 个亮点即是 3 个初始散斑图像的自相关强度峰.

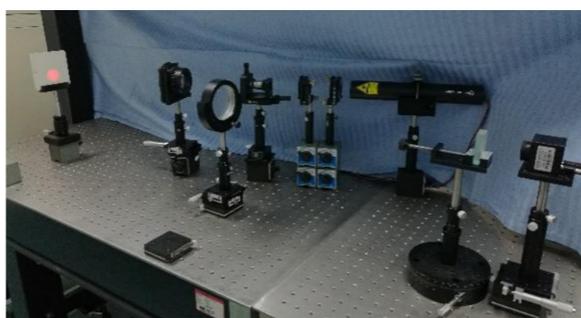


(a) 实验光路示意图

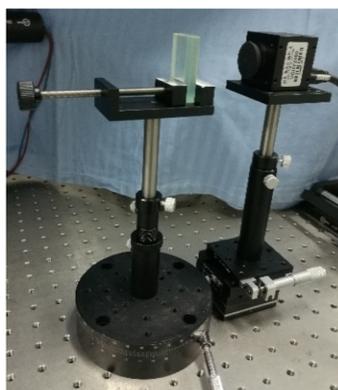


(c) $D=10\text{ mm}$ 时的二次曝光散斑图像 (d) 处理后光场的自相关强度分布图

图 3 实验记录及处理的自相关光场分布图



(b) 实验光路实物图

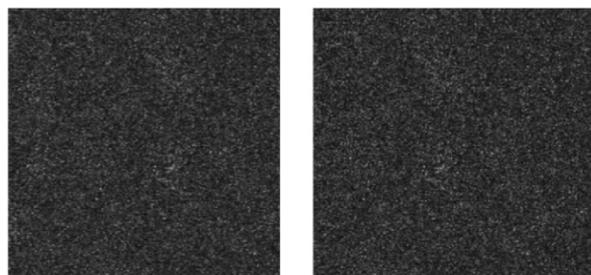


(c) 平行平晶固定架

图 2 实验装置图

3 测量结果与分析

根据光路示意图,搭建如图 2(b)所示的实验光路. 实验中采用 He-Ne 激光器,其波长为 $\lambda=632.8\text{ nm}$;成像镜头焦距为 $f=300\text{ mm}$;采用 GCM-1106M 型精密旋转台,其角度分辨率 $\pm 1'$;一组同规格的平行平晶(折射率为 1.51)的厚度均为 5 mm;使用像素尺寸为 $2.4\ \mu\text{m}\times 2.4\ \mu\text{m}$ 的 CCD 记录散斑光场. 实验中先在固定架中放入 1 块平行平晶,调整精密旋转台分别记录 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=3^\circ$ 时的散斑图像. 通过计算机对所采集的 2 幅图像进行处理,即可测量出厚度为 5 mm 的平行平晶在 $\alpha=3^\circ$ 相对于 $\alpha=0^\circ$ 时所引入的光束横向位移量 Δ . 然后,在固定架中依次放入 2~5 块平行平晶,重复上述操作,即可测量出不同厚度的平行平晶所引入的光束横向位移量 Δ 的变化,测量结果如表 1 所示. 将位移量 Δ 与厚度 D 进行线性拟合(拟合曲线如图 4 所示),所得拟合斜率 $k=0.0177\pm 0.0006$ ($P=95.5\%$),拟合相关系数 $R^2=0.9994$. 将拟合的斜率值 K 及旋转角度 $\alpha=3^\circ$ 代入(8)式,即可计算出平行平晶所用透明材料的折射率 $n=1.509\pm 0.007$ ($P=95.5\%$).



(a) $D=10\text{ mm}, \alpha=0^\circ$ 时的散斑图像 (b) $D=10\text{ mm}, \alpha=3^\circ$ 时的散斑图像

表 1 实验测量数据

m	D/mm	Δ/mm
1	5	0.096 0
2	10	0.175 2
3	15	0.271 2
4	20	0.357 6
5	25	0.446 4

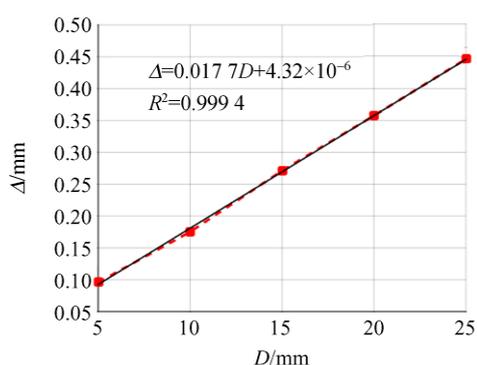


图 4 光束横向位移量 Δ 与平行平晶厚度 D 的线性拟合

4 结 论

本文提出了采用激光散斑二次曝光技术测量光束横向位移量进而测量透明材料折射率的实验方法。与已有实验方法^[2-5]相比,该实验方法在平行平晶转角较小($1^\circ \sim 5^\circ$)的情形下依然可以实现光束微小横向位移量的测量。为了提高实验的测量精度,实验过程中在平行平晶的光线入射角度保持不变的条件下,测量平行平晶不同厚度所引入的光束横向位移量,再通过线性拟合计算出平

行平晶所用透明材料的折射率。

参考文献:

- [1] 杨述武. 普通物理实验(三. 光学部分)[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,1993:61-73.
- [2] 刘成林. 用光束位移法测定透明玻璃板的折射率[J]. 物理实验,2002,22(10):34-35.
- [3] 李梦朝,谢杰,常相辉,等. 非接触千分尺的设计及实验验证[J]. 大学物理,2017,36(12):57-61.
- [4] 王鑫,曾翹楚,柴钰奇. 测量透明平行玻璃板折射率及厚度[J]. 物理实验,2017,37(8):51-53.
- [5] 闫玺,张景超,李贺光,等. 基于激光透射法测量平板玻璃的厚度[J]. 物理实验,2012,32(5):1-5.
- [6] 赵斌,何雄韬. 测劈尖角度及折射率的研究[J]. 大学物理,2004,23(4):28-30.
- [7] 徐文韬,李全伟,李吉鹭,等. 用迈克耳孙干涉仪测量厚透明材料折射率[J]. 物理实验,2012,32(6):35-39.
- [8] 贾小文,范海英,赵云飞,等. 利用牛顿环装置测量平玻璃折射率[J]. 物理实验,2019,39(1):27-30.
- [9] 张莉,杨伊凡,荣振宇,等. 激光散斑法测量横向位移及其应用[J]. 物理实验,2019,39(12):11-14.

Measuring the refractive index of transparent material with laser speckle

ZHANG Li, LIU Yuan-shuo, RONG Zhen-yu,
YANG Yi-fan, LIU Peng-yuan, HAN Yu-jing

(School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: A method for measuring the refractive index of transparent material by measuring transversal displacement of laser beam based on laser speckle was proposed. When the incident angle at the surface of the material being measured is 0° and 3° , the secondary exposure speckles of the material with different thickness were recorded respectively. As there were three autocorrelation intensities distribution in the inverse Fourier transform of the power spectrum, the transversal displacement of the beam introduced by the different thickness could be calculated by reading the distance between the two adjacent autocorrelation peaks. The refractive index of transparent material could be calculated by the principle of beam transversal displacement method. The experiment results demonstrated the feasibility of the method.

Key words: refractive index; speckle photography; beam lateral displacement; autocorrelation peak

[责任编辑:郭 伟]