

doi:10.3788/gzxb20164506.0612002

基于马赫曾德干涉光路的光压测量装置设计

赵静, 林鸿湘, 邱棠, 陈静芳

(华南农业大学 电子工程学院, 广州 510000)

摘要: 基于马赫曾德干涉原理, 设计搭建了可调制与放大干涉条纹的光压测量装置. 由频率和功率可调制脉冲激光产生光压, 使真空中两面高反镀铝薄膜产生微小形变(位移), 从而使由氦氖激光器发射、经半反半透镜分束的参考光和信号光的光程差改变, 即干涉条纹发生改变. 用 CCD 记录干涉条纹位移量, 数据处理获得干涉条纹位移量和薄膜形变量的关系, 计算出脉冲激光在薄膜处的光压. 分别讨论了脉冲激光入射角度、频率等参量对检测结果的影响, 并通过双角度入射方法消除了热辐射效应的影响. 该检测装置可测得最小光功率为 15.0mW 所产生的光压大小为 13.42 μPa , 线性工作范围为 15.0 mW (13.42 μPa) 至 200 mW (1179 μPa), 且工作稳定、灵敏度高, 测量结果准确.

关键词: 应用光学; 光学技术与仪器; 马赫曾德干涉仪; 光压测量; 压力传感器; 激光干涉测量; 薄膜; 脉冲调制

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0612002-7

Light Pressure Measuring Based on Device of Mach-Zehnder Interference

ZHAO Jing, LIN Hong-xiang, QIU Tang, CHEN Jing-fang

(College of Information Science and Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, 510000, China)

Abstract: A device of light pressure detection was designed. The device based on Mach-Zehnder interference theory, and had modulation and amplification interference optical path. The deformation (displacement) of double reflection aluminum film caused by the laser pulse with different frequency and power. The light generated by HeNe laser was split to the reference light and the signal light by a semi-reflecting and semi-transmitting mirror. The optical path difference of the reference light and the signal light was changed because of the thin film shift. Therefore, it caused the movement of interference fringes. The displacement of interference fringes were recorded by CCD, and then the relationship of fringes movement and the film deformation was calculated. At last, the light pressure was obtained. The effects of pulsed laser incident angle, frequency and other parameters were discussed in detail and the thermal radiation effect is eliminated by using the method of double incidence angle. The device could measure the minimum pressure (13.42 μPa) produced by the minimum optical power of 15.0mW. The linear range is from 15mW (13.42 μPa) to 200 (13.42 μPa). The device works steadily, with high sensitivity and accuracy.

Key words: Applied optics; Optical technique and instrument; Mach-Zehnder interferometers; Light pressure detection; Pressure sensors; Laser interferometry; Thin films; Pulse modulation

OCIS Codes: 120.5060; 260.3160; 140.01403; 120.5475

0 引言

当光入射到物体上时, 光子与物体相互作用, 将自身的动量传递给物体, 从而对物体产生力的作用, 这种

现象称为光压. 光压与入射光功率、入射角度、物体表面反射率有关. J. C. 麦克斯韦根据电磁理论阐述了光压现象^[1-2]. 1899 年俄国物理学家 P. N. 列别捷夫首次完成对光压的测量^[3]. 其实验原理是在真空中测得扭

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60908038)资助

第一作者: 赵静(1976—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电检测、光学信号处理. Email: edithzj@126.com

收稿日期: 2015-12-29; 录用日期: 2016-03-11

<http://www.photon.ac.cn>

秤在受光压力作用下的偏转角度的大小,进而推算出压力大小.最终验证了麦克斯韦电磁光压理论.该测量方法对真空度要求高,受当时条件限制,实验采用了大功率弧光灯,其光源的方向性没有激光器的好.高亮度、窄带宽、方向性好的激光器的诞生,使得光压测量精度得到大大提高.近年来,光压在航天太阳帆^[4]、光压驱动纳米机械^[5]等研究领域得到国内外学者广泛关注.

目前主要的光压测量方法大都是在列别捷夫的实验装置基础上的改进^[6-7],即在光压作用下,扭秤扭转,通过测量转动角度的大小推导出光压大小.也有直接使用压力观测仪(压力陶瓷)进行测量的^[8];将压力作用在测量仪上,使测量仪的电信号发生相应改变后,对电信号进行放大,最终得到电压与测量压力大小之间的关系.

光学干涉法具有非接触、快速、测量精度高、易于实现的优势.对干涉场产生的亮暗交替干涉条纹的间距、位置等参量进行测量,可获得被测量的有关信息,适用于极小光压的高精度测量.其中,法布里干涉仪具有谐振腔结构,采用扩展光源进行精细距离测量^[9];泰曼格林干涉仪具有类似谐振腔结构,使用点光源^[10]进行测量;迈克尔逊干涉仪^[11]是将平行光束经分束器分为两束光,一束光出射后经反射镜原路返回分束器与另一束光形成干涉测量;全息干涉光路^[12]测量原理是激光通过分束器后,两束光经不同光程再汇聚形成干涉信号,使用晶体对干涉条纹的光强进行放大与信号处理,最终建立干涉信号与光压的关系.

本文采用马赫曾德干涉光路^[13],测量原理是将平行光束经分束器分为两束光,两束光经过不同路径,再次相遇形成干涉.与法布里干涉仪和泰曼格林干涉仪相比,该系统可调性更高,其光路是一种单光路无反程测量光路,测量误差比迈克尔逊干涉仪更小.

1 测量原理与装置

1.1 测量原理

1.1.1 光压计算

依据 J. C. 麦克斯韦理论,光压的理论计算公式为^[2]

$$P = \frac{I(1+R)}{c \times S} \quad (1)$$

式中 I 为光能量, S 为单位面积, I 在单位时间内垂直入射到 S 表面, R 为反射率, c 为真空光速, P 为接收面压强.假设平面法线与入射辐射源的角度为 θ , 那么接收面压强 $P(\theta)$ 为^[14]

$$P(\theta) = \frac{I(1+R)}{c \times S} \cdot \cos^2 \theta \quad (\text{Pa}) \quad (2)$$

1.1.2 马赫曾德光路的改进

传统马赫曾德光路^[11]如图 1(a)所示,氦氖激光束经分束器,分束为参考光和信号光两路,经过另一个分束器两路光再次相遇时即形成干涉条纹图样.

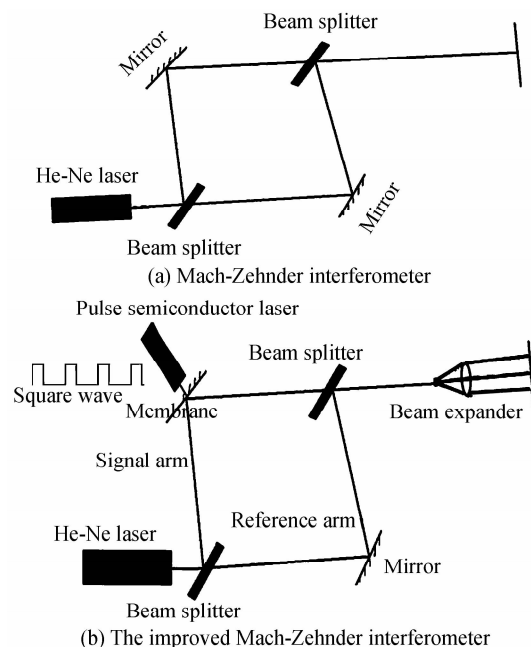


图 1 测量装置

Fig. 1 Experimental set-up

本文对传统马赫曾德光路进行了改进,如图 1(b)所示.在信号光路中,将一片双面高反射的镀铝薄膜(Membrane)替代传统马赫曾德光路的单面反射镜(Mirror).可调频率的半导体脉冲激光器(Pulse semiconductor laser)的光束以方波信号的形式照射到薄膜的另一个面上,产生光压,使薄膜形变(位移).薄膜产生的位移改变了信号臂与参考臂的光程差.当信号臂的光与参考光相遇时,发生干涉,不同光程差的载波光与参考光相遇,得到不同的干涉结果.实验过程中,用高分辨率电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)记录干涉条纹在不同实验条件下薄膜的相对位移量.经图像处理^[15-17]得到条纹的位移量,建立位移量与脉冲激光器的光功率关系.另外,本装置将扩束器(Beam expander)后置于干涉光路处,以减少光束在各镜面与光学器件孔径光阑限制下光能的损耗,提高干涉条纹对比度.装置中的氦氖激光器稳定性好,在装置中各物理参量不变的情况下,薄膜形成的形变量恒定.本文将其定义为零位移,这样测量光路中氦氖激光器本身的光功率带来的影响就可以忽略不计.

1.1.3 热辐射度的作用力消除原理

消除热辐射度力的原理如图 2.同一功率脉冲激光器分别以 θ_1 和 θ_2 的角度入射,在薄膜上形成的形变量对应压强大小为 $P(\theta_1)$ 和 $P(\theta_2)$.

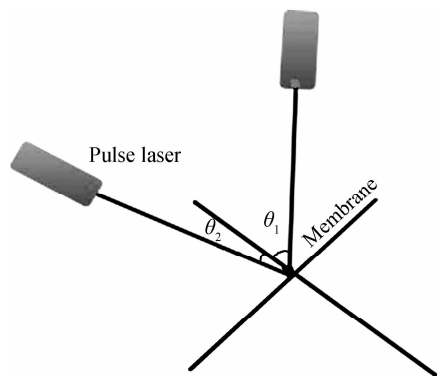


图2 同功率脉冲激光器不同角度入射
Fig. 2 Pulse laser of the same power with the different incident angles

由于两个角度入射点一样,在角度差异为 30° 以内的情况下,可近似认为光斑大小一样,即热辐射效应产生的形变量大小对应压强大小是一样的.可以把热辐射度产生压强大小设为 T .角度差异越小, T 差异越小,但是角度差变小光压差变小,测量难度变大,实验取角度差约为 15° .另外,假设同一功率脉冲激光器垂直入射光压产生压强大小为 D ,且不存在热辐射效应影响,由光压产生的压强大小分别为 $P(\theta_1)$ 和 $P(\theta_2)$,分别除以 $\cos^2\theta$ 就得到了激光垂直入射时产生的光压大小,即

$$\frac{P(\theta_1)}{\cos^2\theta_1} - \frac{P(\theta_2)}{\cos^2\theta_2} = D_1 - D_2 = 0 \quad (3)$$

考虑热辐射效应的影响,且由于同样大小光斑压强大小 T 一样,实际测量的形变量对应压强大小包含了热辐射部分,即

$$\Delta = P(\theta_1)' - P(\theta_2)' = (D_1 + T) - (D_2 + T) \neq 0 \quad (4)$$

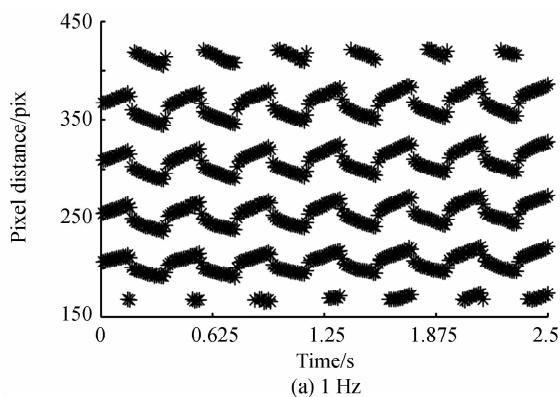
联立式(3)和(4)得到每个角度压强大小为

$$P(\theta_1) = \frac{\Delta 2 \cdot \cos^2\theta_1}{\cos^2\theta_1 - \cos^2\theta_2} \quad (5)$$

$$P(\theta_2) = \frac{\Delta 2 \cdot \cos^2\theta_2}{\cos^2\theta_1 - \cos^2\theta_2} \quad (6)$$

式中 $P(\theta_1)$ 和 $P(\theta_2)$ 为无热辐射影响的光压.热辐射形成压强大小 T_1 和 T_2 应该满足

$$T_1 = P(\theta_1) + T_1 - P(\theta_1) = P(\theta_2) + T_2 - P(\theta_2) = T_2 \quad (7)$$



1.2 测量装置

1.2.1 脉冲光源

脉冲激光器的功率与频率可以通过自制的信号发生器进行调节.脉冲激光器在 $1 \sim 24$ kHz频率范围内发射激光脉冲,功率大小连续可调,最大可调功率为200 mW.脉冲信号的输入在后续数据处理中有助于提取相应信号,利用热辐射对薄膜产生的微小形变与入射信号的不同步性(热辐射的吸收与辐射过程与光压作用频率不会完全同步)排除部分噪音的干扰.

1.2.2 薄膜

实验采用两面镀铝高反薄膜,见图3.薄膜厚度为 $150 \mu\text{m}$,反射率为91.67%.高反射率可降低热辐射影响,同时保证干涉光路形成清晰干涉条纹,提高测量精度.镀铝薄膜被安置在真空环境中的减震平台上,以避免环境干扰.检测过程中,利用扭秤原理,脉冲激光入射到薄膜近、中、远不同点上,得到振动振幅不同的干涉条纹,从而提高装置的可调性.装置中,要求调节脉冲激光的入射点与氦氖激光的入射点处在共轭的几何位置,即两束激光的光斑在薄膜两面的同一点上,以保证测量的灵敏度和准确度.

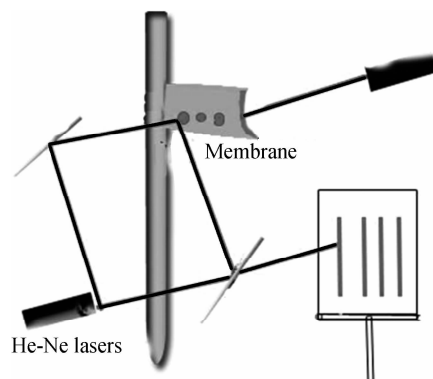
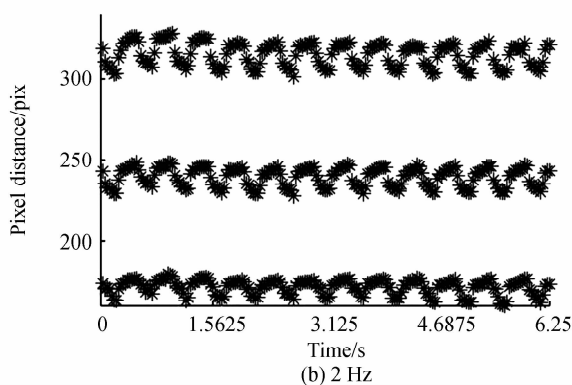


图3 薄膜
Fig. 3 Thin film

2 测量结果与讨论

2.1 不同频率干涉条纹的位移

功率恒为32 mW的激光束入射点恒定.脉冲激光束以 $\theta=39.71^\circ$ 的入射角度入射到镀铝薄膜上,依次入射 $1 \sim 4$ Hz的脉冲激光束,得到四个频率下的条纹位移量,如图4.



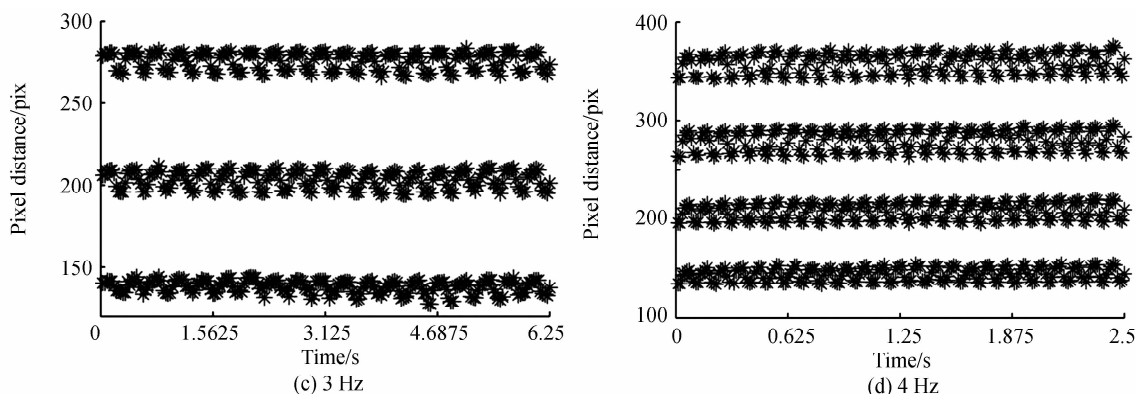


图4 脉冲激光同光功率不同频率干涉条纹位移变化

Fig. 4 Fringe displacement under the same pulsed laser light with different frequency

纵轴为条纹位移量,以像素为单位. 每一条线代表一条条纹的位移变化曲线,两条条纹之间的距离就是条纹明纹中心的距离. 随着脉冲激光器输入频率的增长,干涉条纹的震动幅度变得越小. 同时条纹的震动频谱随着输入频率相应地变化. 实验使用 1Hz 脉冲信号调制,较其他高频率调制具有更大程度的形变量,处理精度更高的特点.

2.2 不同角度干涉条纹的位移

两个角度之间的差值不能过大,过大的角度使得入射光斑大小变化过大,热辐射对薄膜产生的微小形变不一致,误差增大. 实验中脉冲激光器功率为 32.9 mW,

入射频率为 1 Hz,激光束以固定位置和固定角度入射到镀铝薄膜上. 采集图像,提取干涉条纹位置变化量,结果如图 5.

图 5 表示每一条条纹随着时间呈现近似方波状变化,这与脉冲激光器的方波信号输入相对应. 图片横轴以时间为单位,输入 1Hz 方波信号时,图形对应为 1 Hz 的波形. 每一条条纹位移量除以明纹中心间距可以得到相对位移条数. 角度大的震动幅度小于角度小的,实验图像符合式(1)和式(2)原理. 角度越大光压越小,由于脉冲激光器在过大角度入射时光斑会产生变形,并且角度越大测得光压越小,因此实验采用入射角度 θ 在 30° 以内.

2.3 测量结果

表 1 为不同光功率下各物理参量. 入射脉冲激光器在不同光功率 I 下,两个入射角度下测得条纹位移量(光压与热辐射共同作用记为 $T_n + P_n$). 根据式(5)、(6)推导出每个一角度下的压力大小(P),对应相对位移量记为 P_n ,根据热辐射效应式(7) T 的大小,对应相对位移量记为 T_n (Thermal radiation). 最后根据式(2)

表 1 不同光功率下各物理参量

Table1 Physical parameters under different light power

I/mW	$(T_n+P_n)@39.7^\circ/N$	$(T_n+P_n)@54.3^\circ/N$	Δ/N	$P_n@39.7^\circ/N$	$P_n@54.3^\circ/N$	T_n/N	D_n/N
15.0	0.191	0.125	0.028	0.066	0.038	0.125	0.112
35.9	0.515	0.451	0.064	0.150	0.086	0.446	0.253
43	0.733	0.658	0.075	0.178	0.102	0.555	0.300
48.4	1.049	0.962	0.087	0.202	0.116	0.846	0.341
55.3	1.332	1.217	0.105	0.249	0.143	1.02	0.421
60.8	1.442	1.302	0.116	0.273	0.157	1.106	0.462
64.2	1.510	1.394	0.120	0.282	0.162	1.140	0.476
85.1	1.913	1.712	0.166	0.291	0.167	1.501	0.659
101.4	1.808	1.759	0.191	0.343	0.197	1.523	0.759
108.1	2.050	1.832	0.218	0.390	0.224	1.538	0.866
134.3	2.149	1.901	0.248	0.512	0.294	1.566	0.986
150.6	2.278	1.990	0.288	0.583	0.335	1.602	1.145
155.6	2.421	2.119	0.302	0.677	0.389	1.711	1.200

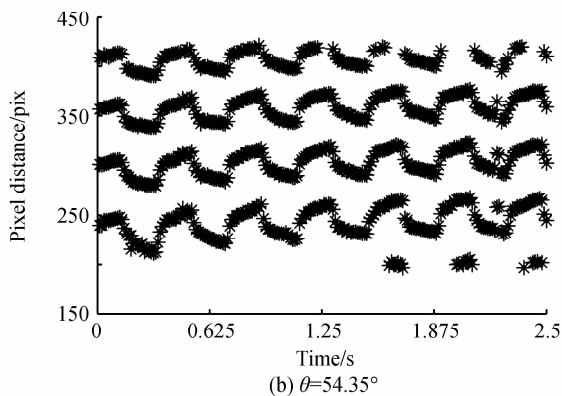
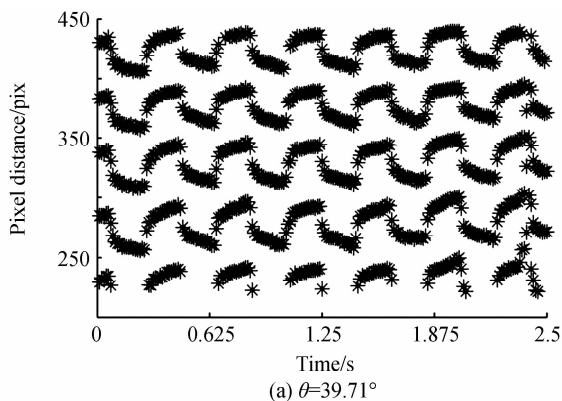


图 5 脉冲激光光功率为 32.9 mW 不同入射角 θ 干涉条纹位移变化

Fig. 5 Fringe displacement under 32.9 mW pulsed laser light with different incidence Angle

可推导特定角度下转换为垂直入射相应光压的大小对应相对位移量 D_n (Normal incidence). 各压强大小以条纹相对位移量表述.

2.4 数据拟合

通过式(1)光压与光功率的关系,得到在脉冲激光器的入射光功率为 I/mW 的情况下,入射光斑大小为 7.069 mm^2 时,接收到的光压为 $I \times 8.95 \times 10^{-7} \text{ Pa}$,其中材料的反射率 $R=0.9167$. 例如在本实验中 I 为 1 mW 的情况下,接收到的光压为 $8.95 \times 10^{-7} \text{ Pa}$. 将所有入射光功率转化为光压力,并将光压大小与干涉条纹相对位移条数拟合得到图 6.

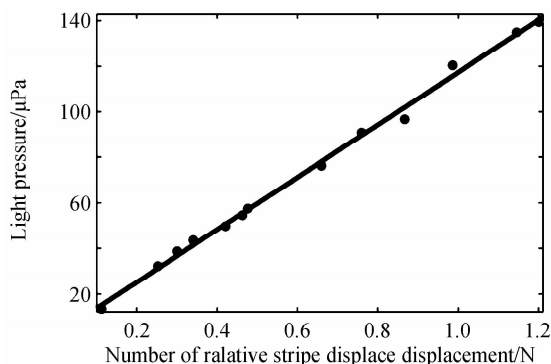


图 6 入射光压与干涉条纹位移拟合图
Fig. 6 Light pressure and the relative number of stripes 经线性拟合,得

$$P(n) = 115.1 \times n + 2.138 \text{ (R-square: } 0.9967 \text{)} \quad (8)$$

式中 $P(n)$ 为干涉条纹位移量下对应的光压,单位为 μPa , n 为相对条纹位移量. 拟合误差在合理范围内.

对两个角度的光压与相对位移量进行拟合,见图 7. 小角度的拟合公式为

$$P_{\theta_1}(n) = 217.5 \times n + 0.1768 \text{ (R-square: } 0.9792 \text{)} \quad (9)$$

大角度的拟合公式为

$$P_{\theta_2}(n) = 378.4 \times n + 0.2181 \text{ (R-square: } 0.9772 \text{)} \quad (10)$$

在同一光压下,小角度拟合公式相应系数小于大角度,同样的光压在小角度产生相对位移条数少于大角度相对位移条数. 即角度越大形成的相同位移量需要更多的光压.

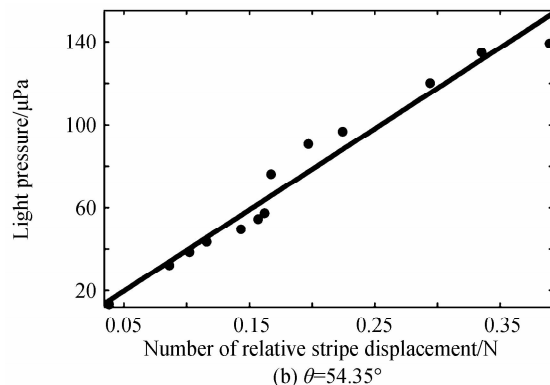
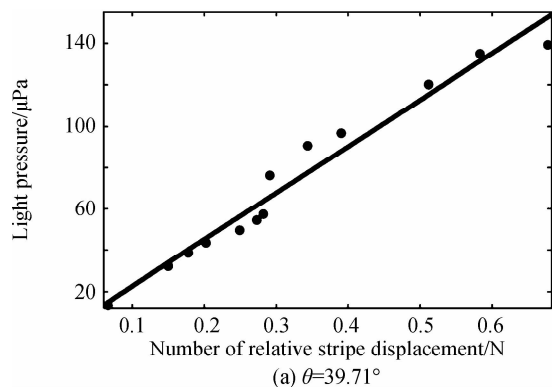


图 7 两角度下光压大小与相对条纹位移数关系

Fig. 7 The relative displacement of article number with light pressure from two angles

2.5 讨论与分析

2.5.1 有效数据的选取

一般采集的信号可能存在三种情况,如图 8. AB 段为未稳定状况下记录的干涉条纹,由于热辐射效应的影响,使信号呈上升状态. 经过一段时间,热辐射效应基本稳定,信号基本趋于稳定, BC 段显示的即为这种情况. 在平稳信号中,可能会出现 CDE 段信号的情况,这是由于外界环境的干扰,应将其去除. 同时,证明热噪音受放热过程与信号频率不同步性,稳定后可以减少一部分热辐射效应影响,脉冲激光器的使用更具有消除热辐射效应影响的优点. 有效数据为整体信号平稳状态下的数据.

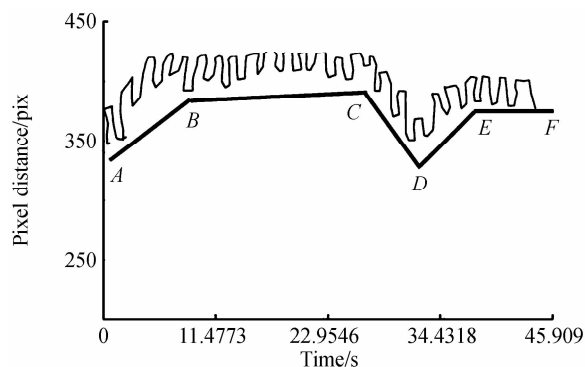


图 8 干涉条纹位移变化

Fig. 8 The interference fringe displacement variation not in stable situation

3.5.2 热辐射的不同步性

图 9 为光功率与热辐射度力产生条纹变化数量的拟合图像. 拟合结果为

$$N(T) = 12.97 \cdot T_n^{0.04708} - 14.71 \text{ (R-square: } 0.9393 \text{)} \quad (11)$$

热辐射产生的形变量对应干涉条纹的相对数量,与入射光功率呈非线性关系. 材料本身在吸热放热与空气的热传递是非线性相关,这在一定程度上证明输入脉冲信号产生的热辐射度力与光压不是以同步频率

变化的,利用热辐射度噪音信号与光压之间的不同步性可以在一定程度上减少热辐射噪音的影响.利用实验中的压力相差消除热辐射效应才能得到真正的光压.

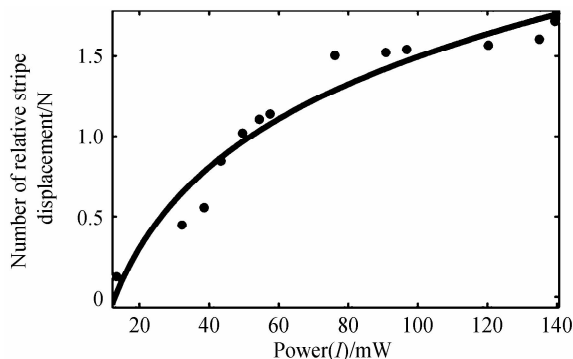


图9 入射功率与热辐射位移条纹数拟合图

Fig.9 Incident power and thermal displacement

2.5.3 马赫曾德测量光压的优势

马赫曾德光路结构简单,经改进后可直接调整干涉光路的夹角与投影距离,经扩束后的光斑大小也可调控.其它光压测量方法^[6-12]需要消除热辐射效应,因此要求实验在高真空度下进行.而马赫曾德光路是对光压作用于薄膜上时产生的形变量进行测量,可通过改变测量光的入射光角度,以消除热辐射效应的影响,无需高真空环境.与文献^[13]高频输入脉冲激光束方法相比,本文所用方法采用了低频率输入脉冲激光,不需要超薄镀膜,就可以得到更大的形变量.光扭秤法^[6-7]在测量时会引起接收面转动,角度随之改变,进而入射方向相对也改变的,而本装置能够一直保证入射光保持垂直入射,同时不需要复杂的电路设计^[8],利用角度差异消除热辐射度效应,因而不需极高真空条件.

3 结论

基于马赫曾德干涉原理设计搭建了测量光压的高灵敏度实验装置.装置可测得最小光压为 $13.42 \mu\text{Pa}$,线性工作范围为 13.42 到 $1179 \mu\text{Pa}$.相比已报道的检测装置,不但精度能够提高到微帕量级,而且易实现、稳定性较好.据我们所知,本文是第一次采用马赫曾德干涉光路实现光压测量.

在下一步的工作中,为了进一步扩大装置检测的线性范围,可提高脉冲激光器的光功率,并进行激光束聚焦.另一方面,项目组将对不同材质和参数的薄膜应变模量进行讨论,通过选择机械韧性更好、受热辐射干扰更少的薄膜,进一步提高检测灵敏度和稳定度.为航空、纳米科技等领域的光压检测提供新思路 and 可行方案.

致谢

感谢华南农业大学电子工程学院杨初平老师对论文的帮助.

参考文献

- [1] MAXWELL J C. A Dynamical theory of the electromagnetic Field[M]. Austria: Alphascript Publishing, 2010.
- [2] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism [M]. Oxford:Oxford University Press, 1937.
- [3] LEBEDEW P. Untersuchungen über die druckkr? fte des Lichtes[J]. *Annalen Der Physik*, 1901, 311(11):433 - 458.
- [4] ZHANG Teng-fei, CHANG Hui-cong, WU Ying-pen, et al. Macroscopic and direct light propulsion of bulk graphene material[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(7):471 - 476.
- [5] SHE Jian, Light pressure drive human science and technology [J]. *Encyclopedic Knowledge*, 2009(24):24-25.
施坚. “光压”驱动人类科技[J]. 百科知识, 2009(24):24-25.
- [6] MAO Yan-zhe, SONG Chang-an. Qualitative research in the light pressure and light in a vacuum[J]. *Gansu Science and Technology*, 2007, 23(10): 91-92.
毛延哲, 宋长安. 光压和光能在真空中的定性研究[J]. 甘肃科技, 2007, 23(10): 91-92.
- [7] YAN Yang-lv, CHEN Chong-hui. Demonstration and design of measuring device of light pressure [J]. *Physics and Engineering*, 1996(03):25-26.
严映律, 陈聪慧. 光压的演示及测量装置设计[J]. 物理与工程, 1996(03):25-26.
- [8] CUI Jin-song, LI Cheng-ren, LIU Yu-feng. Manufacture light pressure apparatus[J]. *Physical Experiment*, 1999, 19(1):29-30.
崔金松, 李成任, 刘玉凤. 光压观测仪的研制[J]. 物理实验, 1999, 19(1):29-30.
- [9] MA Bao-hong, ZHANG Zhan-jie. Method in FP interferometer principle and application analysis [J]. *Journal of Luoyang Teachers*, 2012, 31(11):29-30.
马宝红, 张战杰. 法布里珀罗干涉仪原理及应用分析[J]. 洛阳师范学院学报, 2012, 31(11):29-30.
- [10] SHEN Shao-meng, Based on the principle of Twyman-Green wave aberration test methods and test equipment [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011:41-45.
申劭萌. 基于 Twyman-Green 原理的波像差测试方法与测试设备研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011:41-45.
- [11] MENG Qing-gang. The application of Michelson interferometer [J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2011(36):61-62.
孟庆刚. 迈克尔逊干涉仪的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2011(36):61-62.
- [12] [HAHN J, PETROV M, PRITTER J, et al. Measuring the pressure of light with an adaptive holographic interferometer based on sillenite-type crystals [C]. Dago- Proceedings , 2005, 1614-8436.
- [13] ZEHNDER L. Ein neuer interferenzrefraktor[J]. *Springer*, 1891(11): 275-285.
- [14] POAR T. Oblique reflection of a laser pulse from a perfect elastic mirror[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 48-51.
- [15] TIAN Ai-ling, LIU ting, LIU jian, et al. A single interferogram of high precision wavefront reconstruction technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2015, 44(4):1203-1207.

- 田爱玲,刘婷,刘剑,等.单幅干涉条纹图的高精度波面重建技术[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(4):1203-1207.
- [16] WANG Xi-lian, LI Ling, XIN hua-mei. Comparative study on the noise reduction technology of speckle pattern interferometry[J]. *Modern Electronics Technique*. 2015, **38**(11), 63-66.
- 王喜连,李玲,辛化梅. 散斑干涉条纹图降噪技术比较研究[J]. 现代电子技术, 2015, **38**(11), 63-66.
- [17] BING feng, DENG mian, TANG fu-jiao, *et al.* Michelson interferometric fringe automatic measurement method [J]. *Optoelectronic Technology*. 2015, **45**(1), 95-96.
- 宾峰,邓敏,唐付桥,等. 迈克尔逊干涉条纹自动测量方法[J]. 光学与光电技术. 2015, **45**(1), 95-96.