

文章编号: 2095-2163(2020)02-0221-04

中图分类号: TN248

文献标志码: A

基于楔形金属外形干扰的氦氖激光谐振腔模式研究

何路遥, 李 阳, 高秀敏

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了探索金属几何尺寸(例如直径等)的光电检测技术,对激光检测金属物的形变与缺陷的原理进行了摸索研究。基于光学谐振腔能产生丰富的高阶模式现象,文中使用开腔式氦氖激光谐振腔产生的激光,对在金属干扰下的高阶模式进行分析。该实验采用楔形铝箔作为干扰金属,改变铝箔与激光中心的距离,研究在不同干扰范围内产生光斑的变化趋势与特性。通过CMOS图像传感器采集光斑细节图,结果显示铝箔靠近激光中心且不遮挡中心时,竖直方向移动铝箔,光斑图的边缘信息缺失并发生旋转,不同方向的光束消失再现的时间不同。该实验研究的干扰特性,可用于激光检测领域如金属外表面缺陷检测、外形检测等领域的研究。

关键词: 氦氖激光器; 激光谐振腔; 高阶模式; 金属检测

Research on He-Ne laser cavity mode based on the interference of wedge-shaped metal

HE Luyao, LI Yang, GAO Xiumin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] In order to explore the photoelectric detection technology of metal geometry (such as diameter), the principle of laser detection of metal deformation and defects is explored. Based on the optical cavity, a rich high-order mode phenomenon can be generated. In this paper, the laser generated by the open-cavity He-Ne holmium laser is used to analyze and summarize the high-order modes under metal interference. In this experiment, wedge-shaped aluminum foil is used as the interference metal, and the distance between the aluminum foil and the laser center is changed. The trend and characteristics of the spot generated under different interference ranges are studied. The spot detail map is collected by the CMOS image sensor. The result shows that when the aluminum foil is close to the center of the laser and does not block the center, the edge information of the spot pattern is missing and rotated by moving aluminum foil vertically, and the time of disappearing and reproducing of the light beams in various directions is different. The interference characteristics of this experimental study can be used in the field of laser detection such as metal surface defect detection and shape inspection.

[Key words] He-Ne laser; laser cavity; high-order mode; metal detection

0 引言

激光技术自受关注以来,广泛应用于激光武器、航空航天、激光侦察与通信等军事领域^[1],同时在测速、反伪、工业加工和通信等领域也做出了重要贡献^[2]。其中,激光器作为激光技术的重要组成部分,光束质量直接影响着激光技术的发展,各种光学谐振腔的出现,提升了光束的相干性、方向性、单色性、高亮度等一系列重要特征。

氦氖激光谐振腔由于结构简单、便于制造、造价低、输出激光的准直性与相关性好等优点,在工业加工和检测方向是极好的相干光源。在激光腔的研究领域,已有西安电子科技大学在氦氖激光谐振腔的特性研究与模式重现上做出研究,主要从波动方程和亥

姆霍兹方程出发,介绍氦氖谐振腔的多种高阶高斯模式,并结合谐振腔模式提出一种改进算法介绍腔模式的计算方法^[3];在理论上也有王晓峰等人^[4-5]主要研究谐振腔自在现模的数值分析与模拟分析,改进了现有的迭代解法;许志广等人^[6]针对氦氖激光谐振腔的理论分析,做了影响各项参数的因素分析工作,为高性能激光器提供理论依据。而针对于金属外表面研究领域,沈洪斌等人^[7]使用激光电子散斑干涉技术对金属的形变进行研究,搭建干涉系统并对物体三维面内进行测量。

但多年来对谐振腔的研究都基于理论,本文在这两者基础上,对谐振腔激光检测金属物形变与缺陷的原理进行了摸索研究。实验使用开腔式的氦氖

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1313800)。

作者简介: 何路遥(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:光电检测系统与控制;李 阳(1988-),男,讲师,主要研究方向:基于原子自旋效应的极弱磁测量、抗弛豫碱金属原子气室制作研究;高秀敏(1978-),男,研究员,主要研究方向:光学性质可控性、光谱检测技术、光学成像研究。

收稿日期: 2019-10-28

激光谐振腔,对金属干扰下的高阶模式进行实验采集与对比分析。该实验可为检测领域中的模式激光检测,如物体直径的测量和外表面缺陷检测等具体场景进一步提供实验基础。

1 光学谐振腔理论简介

光场作为一种电磁场,满足经典电动力学理论,即电场强度 E 、电位移矢量 D 、磁场强度 H 、磁感应强度 B 满足麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \vec{\tilde{N}} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \vec{\tilde{N}} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \\ \vec{\tilde{N}} \times \vec{D} = \rho; \\ \vec{\tilde{N}} \times \vec{B} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中, \vec{j} 是电流密度, ρ 是电荷密度。

当假设介质中的电荷密度 ρ 和电流密度 \vec{j} 均为 0,且介电常数与介质的磁导率仅随空间变化时,得出 \vec{E} 和 \vec{H} 满足的关系式,即波动方程:

$$\vec{\tilde{N}}^2 \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + [\vec{\tilde{N}}(\ln \mu)] \times [\vec{E} \cdot \vec{\tilde{N}}(\ln \varepsilon)] = 0, \quad (2)$$

此时将光场标量化:假设 \vec{E} 只含一个方向分量,则标量 U 替代 \vec{E} 。得到标量波动方程:

$$\vec{\tilde{N}}^2 U - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

若定义一个频率为 ω 的标量时间作为上述方程的实解,即有:

$$U(r, t) = A(r) \cos[\omega t - g(r)], \quad (4)$$

其中, r 为任一点矢径,将 $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ 代入式(4)则可以表示为:

$$U(r, t) = \text{Re} [A(r) e^{-i[\omega t - g(r)]}] = \text{Re} [U(r) e^{-i\omega t}], \quad (5)$$

又有 $U(r) = A(r) e^{ig(r)}$ 为复振幅,由标量波动方程推出复振幅的亥姆霍兹方程为:

$$\vec{\tilde{N}}^2 U(r) - k^2 U(r) = 0. \quad (6)$$

由理论推导可知:若是确定了光场 r 处的 $U(r)$ 就能得到完全描述此点场分布的 $U(r, t)$ 。由于谐振腔约束腔内电磁场,腔内模式取决于麦克斯韦方程组和腔的边界条件。此时腔内电磁场存在于一系列本征状态中,一定的震荡频率和空间分布作为本征态的性质也就构成了光腔模式。因此改变腔

的结构即为改变边界条件,也就改变了激光谐振腔的腔内震荡模式。

本实验中采用的开腔式氦氖激光腔,在所述的理论上,通过调整同轴腔镜的俯仰角使得光线与轴线的夹角发生变化,傍轴光线在腔内往返多次后形成新的稳场分布,实现了谐振腔在一定调节范围内可以产生多种高阶模式的实验前提。

2 金属干扰实验设置与条件

2.1 基于氦氖激光腔的调控装置

本实验激光器使用的是西安超凡光电生产的 Last-III 型氦氖激光调控实验装置,该装置氦氖激光放电管输出稳定度在每小时 $\pm 8\%$ 以内,且可连续运转时间不小于 12 h,设备维护简便,可操作性强。激光腔主要参数见表 1。

表 1 氦氖激光腔主要参数

Tab. 1 Main parameters of He-Ne laser cavity

| 部件参数 | 数值 |
|---------------|-----------------|
| 放电管长度/mm | 450 |
| 放电管外径/mm | $\phi 40 \pm 1$ |
| 输出波长/mm | 632.8 |
| 输出最大功率/mW | 8 |
| 工作电流/mA | 6 |
| 全反射镜(曲率半径)/mm | 150 |
| 输出镜(曲率半径)/mm | 150 |
| 激光电源/V, Hz | 220, 50 |

使用十字小孔成像准直法使得十字在反射镜上所成像与放电管中心光点重合,使放电管中心、输出镜与全返镜轴心在同一轴上,此时微调反射镜,可以看到反射镜所成光斑在随反射镜的俯仰角的变化而变化。通过 CCD 同步采集图像,选取一个高阶状态,静置 20 min,使氦氖谐振腔的光场稳定在此刻模式。实验装置示意图如图 1 所示。

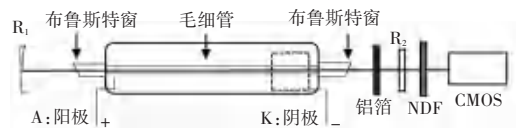


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

图 1 中, R_1 为全反射镜, R_2 为全反射镜, A、K 为毛细管的阴阳极,分别接电源电压的正负极, NDF 为滤光片,楔形铝箔放置在右侧布鲁斯特窗与 R_2 之间; CMOS 为图像传感器。器材底座均距离轴心高度为 175 mm,光斑大小位于 R_2 的轴心位置呈椭圆状光斑。实验装置实物图如图 2 所示。



图 2 实验装置实物图

Fig. 2 Physical drawing of the experimental device

2.2 金属干扰下腔模式设置

本实验的研究对象为楔形铝箔, 首先铝箔作为一种常见的金属材料, 密度小, 便于做各种剪裁与记录测量, 且铝箔不透光、有很多工业应用场景; 其次, 楔形作为一种类似于金属毛刺的形状, 以楔形角所在的点为顶点, 横切面的直径从 0 开始递增, 作为实验的变量是连续的。

设光斑中心, 也就是轴线所在位置上的点为 O 点。楔形角的顶点逐渐逼近轴线上的 O 点时, 记录每一次的逼近距离并观察此时光斑模式的变化。逼近过程如图 3 所示。

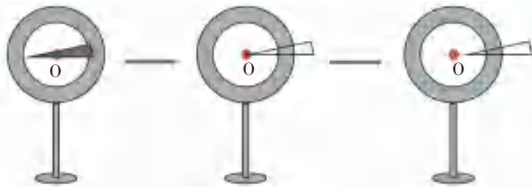


图 3 铝箔干扰模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of interference mode of aluminum foil

3 实验结果与分析

调节氦氖激光腔, 当腔与腔镜共轴时, 全反射镜上会出现红色光斑, 使光斑尽可能位于全反射镜的中心点, 用 CCD 采集图像时, 调整 CCD 的位置让高阶模式图呈均匀左右对称的椭圆型光斑, 固定 CCD 的位置使其距离输出镜 155 mm。楔形铝箔的角度小于 10° , 全反射镜上出现的光斑直径为 4 mm。无铝箔干扰时, CCD 采集的高阶模式如图 4 所示。



图 4 无铝箔干扰光场模式

Fig. 4 Light field mode without interference from aluminum foil

由图 3 可知, 轴线与镜架的交点为 O 点, 任意水平放置铝箔的位置后固定, 遮盖住光束通过的焦点 O, 竖直方向上移动铝箔, 使氦氖激光腔产生的激光自上而下射向铝箔, 阶段性采集图像效果见图 5。

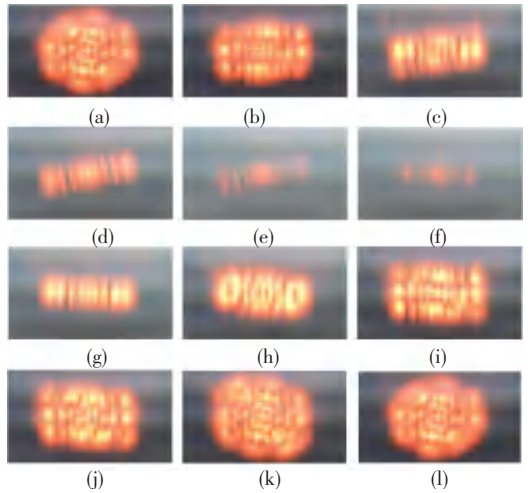


图 5 铝箔遮住激光中心

Fig. 5 Aluminum foil covers the laser center

由图 5 可知, 图 5(a) 是光束未接触铝箔状态, 图 5(b)~(e) 是铝箔在竖直方向上从下往上通过光束, 图 5(e)~(f) 间有一段时间无法接受到任何光斑, 这时是激光中心焦点完全被遮挡, 继续向上直至焦点激光擦过楔形铝箔的底部边缘, 光斑逐步出现, 但此时图 5(e)~(f) 的光斑发生了轻微旋转, 图 5(l) 表明铝箔完全离开激光束。

铝箔恰好接近激光中心 (距 0.5 mm) 的图像效果见图 6。由图 6 可知, 铝箔恰好接近激光中心时, 衍射的光斑旋转更为明显, 图 6(h)~(i) 旋转约为 90° 。观察图 6(c)~(e) 可知旋转的光斑并非同一方向的光斑, 而是铝箔在干扰当前模式下的不同方向的激光, 不同方向的激光消失直至再现的过程。

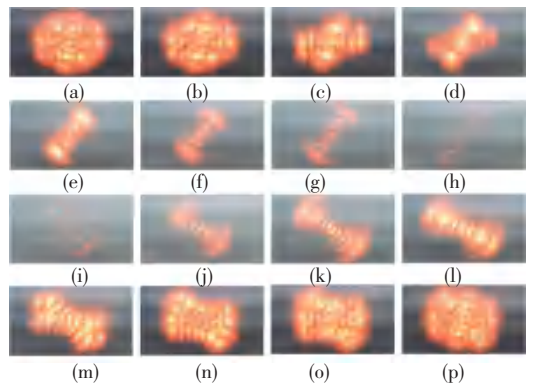


图 6 铝箔恰好接近激光中心 (距 0.5 mm)

Fig. 6 Aluminum foil is just close to the laser center (distance: 0.5 mm)

铝箔恰好接近激光中心 (距 1 mm) 的图像效果见图 7, 铝箔逐渐远离激光中心 (距 1.5 mm) 的图像效果见图 8。图 7 与图 8 表明楔形铝箔逐渐远离激光中心时, 这种不同方向的激光束在自己的方向上做着类似于图 5 的运动。

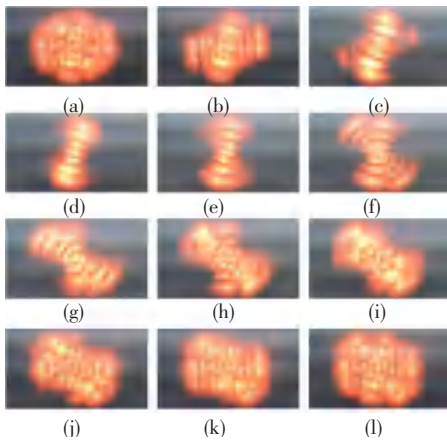


图7 铝箔靠近激光中心(距1 mm)

Fig. 7 Aluminum foil close to laser center (distance 1 mm)

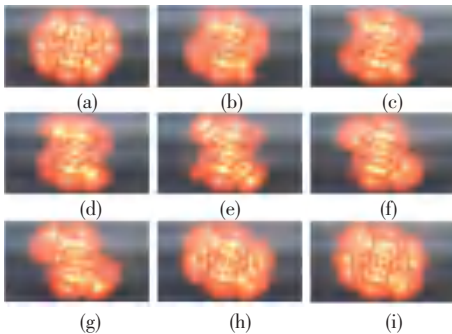


图8 铝箔逐渐远离激光中心(距1.5 mm)

Fig. 8 Aluminum foil gradually moves away from the laser center (distance: 1.5 mm)

4 结束语

本文采用 Last-III 型氦氖激光调腔平台,在全反射镜与氦氖激光腔中放置楔形铝箔干扰谐振激光腔产生的高阶模式,用 CMOS 图像传感器采集光斑。通过实验有如下现象产生:当铝箔完全遮挡激光中心时,出现了边缘信息逐渐缺失直至整个光斑消失再复现的一系列过程,此时光斑有轻微旋转,角度小于 30° ;当铝箔恰好靠近光斑中心时,距离约为 0.5 mm 时,能看到 90° 的旋转,且能观察到光场中不同方向的激光束消失又再现的过程;当铝箔逐渐远离光斑中心,分别距离中心为 1 mm 和 1.5 mm 时,高阶光场里不同方向的光束做着相同的消失又再现的过程。

上述现象可得出:金属对高阶模式的干扰,使高阶光场中不同方向光束运动变化的模式发生规律性改变,且当金属越靠近光斑中心时,单向光束的变化轨迹越清晰。

参考文献

[1] 高畅. 激光技术应用现状与分析[J]. 物理通报,2007(11):50.
 [2] 刘祁. 激光技术的应用与展望[J]. 数字通信世界,2019(4):59.
 [3] 徐银新. 激光谐振腔模式研究[D]. 西安:西安电子科技大学,

2010.

[4] 王晓峰,康冬丽,树俊波,等. 激光形成过程和谐振腔自再现模的数值分析[J]. 大学物理,2011,30(11):10.
 [5] 段存丽,王涛,范明国,等. 激光谐振腔近场自再现模式分布的研究[J]. 激光与红外,2014,44(5):496.
 [6] 许志广,张书练,李岩,等. 猫眼谐振腔氦氖激光器理论分析[J]. 物理学报,2006,35(9):4665.
 [7] 沈洪斌,张磊,刘秉琦,等. 激光电子散斑干涉测量受热金属形变[J]. 科学技术与工程,2008,8(14):3921.
 [8] EICHLER H J, EICHLER J, LUX O. Optical resonators [C]// Lasers. Cham: Springer, 2018: 231.
 [9] DENTE G C, TILTON M L. Regenerative modes in laser resonators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(3): 1.
 [10] 高致慧. 激光谐振腔自再现模的波型特征[J]. 光子学报,2000,29(8):726.
 [11] 许志广. 猫眼谐振腔氦氖激光器及其位移传感器[D]. 北京:清华大学,2006.
 [12] SCHEPERS F, BEXTER T, HELLWIG T, et al. Cavity-external spatial gain shaping for selective higher-order mode excitation [C]//CLEO: Science and Innovations. USA: Optical Society of America, 2019; JTU2A. 61.
 [13] ANDERSON D Z. Alignment of resonant optical cavities [J]. Applied Optics, 1984, 23(17): 2944.
 [14] LIANG Wei, ILCHENKO V S, ELIYAHU D, et al. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser [J]. Nature communications, 2015, 6: 7371.
 [15] WU Chao, LI Gen, TANG Xiahui. Edge-wave method for calculating the output mode of strip unstable resonators [J]. Applied optics, 2016, 55(21): 5531.
 [16] 齐淑霞,刘圣,李鹏,等. 高效产生任意矢量光场的一种方法[J]. 物理学报,2019,68(2):024201.
 [17] SHATTAN M B, MILLER D J, COOK M T, et al. Detection of uranyl fluoride and sand surface contamination on metal substrates by hand-held laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Optics, 2017, 56(36): 9868.
 [18] KAWAGUCHI Y, OHMURA H, SATO T. Detection of trace substances adhered to a metal surface by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2017, 32(3): 609.
 [19] BARRÉ N, ROMANELLI M, LEBENTAL M, et al. Waves and rays in plano-concave laser cavities: I. Geometric modes in the paraxial approximation [J]. European Journal of Physics, 2017, 38(3): 034010.
 [20] PASCAL A, BITTNER S, DIETZ B, et al. Waves and rays in plano-concave laser cavities: II. A semiclassical approach [J]. European Journal of Physics, 2017, 38(3): 034011.
 [21] GUO Dongmei, WANG Ming, HAO Hui. Displacement measurement using a laser feedback grating interferometer [J]. Applied optics, 2015, 54(31): 9320.
 [22] MONTINARO N, CERNIGLIA D, PITARRESI G. A numerical and experimental study through laser thermography for defect detection on metal additive manufactured parts [J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2018, 12(43): 231.
 [23] KANKO J A, SIBLEY A P, FRASER J M. In situ morphology-based defect detection of selective laser melting through inline coherent imaging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 488.