

文章编号: 1001-3806(2010)06-0835-04

激光辐照面阵 CCD 探测器的杂散光斑现象

钟杰¹, 翁继东², 罗振雄¹, 刘振清¹, 叶雁¹, 李作友¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究短脉冲强激光辐照下同轴数字全息图像中的杂散光斑, 进行了短脉冲强激光辐照和停止激光辐照情况下 CCD 图像采集的实验, 采用粒子衍射原理和 CCD 输出电信号的过程分析了 CCD 图像灰度的变化, 得到了像素上灰尘的衍射及 CCD 吸收激光能量导致复位电平失常是杂散光斑及阴影产生的原因, 受热效应和记忆效应的影响, 激光辐照停止后 CCD 图像采集失常。结果表明, 激光辐照停止后随着热量的消散, 杂散光斑逐渐消失, 去除灰尘并延长 CCD 的图像采集时间间隔, 避免 CCD 产生热积累能有效消除杂散光斑。

关键词: 光电子学; 杂散光斑; 过饱和效应; 面阵 CCD; 热效应; 激光能量

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.031

Study on stray facula of array CCD detector irradiated by laser pulse

ZHONG Jie¹, WENG Ji-dong², LUO Zhen-xiong¹, LIU Zhen-qing¹, YE Yan¹, LI Zuo-you¹

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. National Key Laboratory of Shock Wave and Denotation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to investigate the stray facula in the in-line digital hologram with an array CCD detector irradiated by short intense laser pulse, variable images were gathered with CCD under laser irradiation or not. Different image grey was analyzed based on the diffraction fringes of the particles and the output electrical signal of the pixel. The stray facula was induced by diffracting dust in the pixels and the abnormal behavior of the reset level due to laser absorption of CCD. Without laser irradiation, the image gathered by CCD was quite abnormal due to the thermal effect and memory effect of CCD. The results showed that the stray facula vanished slowly with the elimination of heat during a long time. Finally, the image gathered by CCD can recover normally and the stray facula vanished completely when the dirty was removed and the time interval of the gathering image was prolonged.

Key words: optoelectronics; stray facula; supersaturation effect; array CCD; thermal effect; laser energy

引言

近年来,随着电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)及计算机技术的高速发展,有关数字全息的实验研究^[1-5]得以展开,由于 CCD 集光电转换、电荷存贮及电荷传输等功能于一体,而激光光源具有亮度高、方向性好等特点,使得 CCD 易受强激光辐照而显现出一些特殊的工作状态,甚至受到一定的软损伤^[6],引起 CCD 的光学和电学性能退化,其中光学性能退化主要表现为光饱和和光饱和串音现象,前者是

光辐照区域出现饱和,信号输出为最大值;后者不仅是光辐照区饱和,未被光辐照的区域也有信号输出,从而影响采集图像的质量;而电学性能的退化主要表现为半导体材料电学参量的改变。

由于 CCD 采集图像的质量影响着物场的信息分辨,采用短脉冲激光器进行不同能量激光对同轴粒子场全息记录图像影响的研究,但在研究中发现:当脉冲激光能量较高时,CCD 采集图像中出现中心灰度饱和的少量小圆斑,随着激光对 CCD 的辐照,小圆斑内的灰度值降为 0 级,且数量增加,最后形成大面积的杂散光斑及黑色阴影,而激光辐照停止后,杂散光斑仍然存在,CCD 不能立即恢复正常的图像采集,这不仅影响了图像的记录和视场,而且导致物场的部分记录信息丢失。作者针对杂散光斑的产生及消失,进行了相关实验和 CCD 输出电信号的理论分析,给出了杂散光斑现象的合理解释。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10804102)

作者简介:钟杰(1977-),女,工程师,主要从事激光全息、X 光照相方面的研究工作。

E-mail: jiezong123@126.com

收稿日期:2009-12-08;收到修改稿日期:2010-03-31

1 实验光路

在同轴数字全息研究中, CCD 信号输出的位数越高, 要求曝光量的范围越宽, 所允许的亮暗对比度越大, 影响着粒子记录图像的信噪比, 因此, 有必要研究脉冲激光能量对粒子场全息记录图像的影响。采用的同轴数字全息实验光路如图 1 所示, 光路由短脉冲激

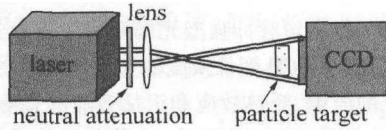


Fig. 1 Experiment diagram of the in-line digital holography

光器、中性衰减片、短焦透镜、粒子靶和 CCD 组成, 激光波长为 532nm, 脉宽为 200ps, 脉冲激光输出的最大能量为 70mJ, 外触发单次输出激光, 透镜焦距为 16mm, 粒子靶的放大比为 1.03, CCD 的像素数为 3072×2048 , 像素尺寸为 $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$, 信号输出为 16bit (65535 级灰度), CCD 的图像采集时间为 3s。

为保证 CCD 采集图像中不出现光饱和以及光饱和和串音的现象, 要求 CCD 光敏面上的曝光量均应低于饱和曝光量^[7], 因此, 采用衰减片来调节曝光量以避免 CCD 的曝光饱和或不足, 并在 CCD 前面放置能量计用以检测脉冲激光的能量密度(输出激光的能量稳定度为 8%), 当激光能量密度为 $37\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时, CCD 采集图像中出现光饱和现象。光路中采用短焦透镜进行激光光斑的放大, 一是光路调节方便, 易于满足 CCD 视场的要求, 二是减少了多个光学元件之间平行度引起的干涉条纹的影响。

2 实验结果

激光能量密度为 $18\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时进行粒子靶图像的采集, 在全息图右上角区域出现大量杂散光斑及阴影, 如图 2a 所示, 不仅影响了图像的记录视场, 而且丢失

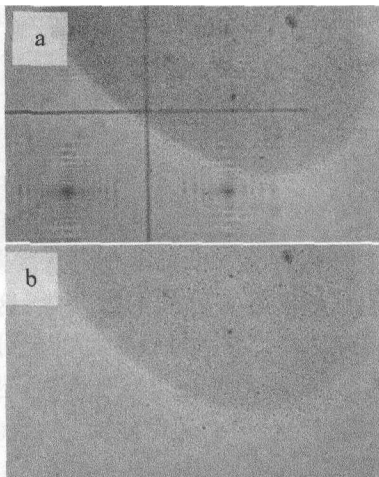


Fig. 2 Stray facula with different object field

了物场记录图像的信息量。为排除粒子靶产生杂散光斑的可能性, 去掉粒子靶将物场设为空场, 其它实验条件不变, 但仍得到杂散光斑的图像, 如图 2b 所示。图 2 中两幅图像的采集时间间隔为 4h。

为了观察和研究杂散光斑的产生过程, 在激光能量密度为 $16\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时进行空场图像的采集, 采集时间间隔为 2min 左右, 如图 3 所示。在图像的右上角局

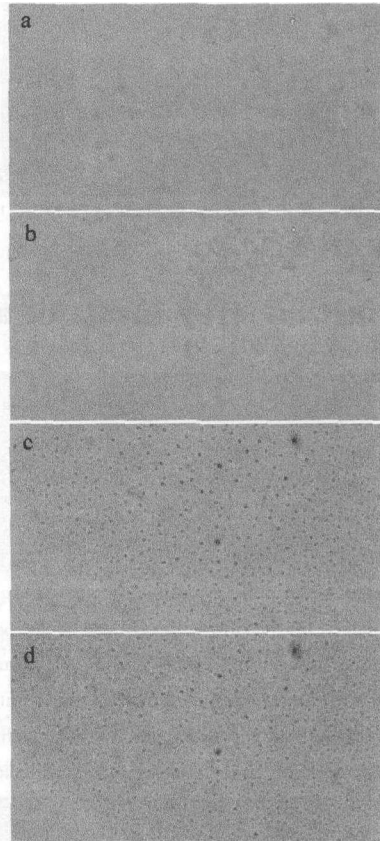


Fig. 3 Stray facula with the same laser energy density

部区域中首先出现中心呈白色的圆斑(灰度级多为 65535, 完全饱和), 圆斑周围还有暗的衍射环纹, 进而圆斑的中心逐渐变黑(灰度级多为 0), 类似于参考文献[8]中所述的 CCD 过饱和现象, 然后出现大面积的杂散光斑, 最后图像中的杂散光斑逐渐增多、阴影加深, 杂散光斑的整个产生过程将近为 16min。通过对杂散光斑图像的分析 and 光学元件的清理, 排除了光路中器件对图像的影响, 进而推测杂散光斑为 CCD 像素上的灰尘发生衍射及衍射条纹迭加所致。

对于杂散光斑及其阴影的消失过程也进行了实验研究, 在脉冲激光辐照 CCD 产生杂散光斑后, 进行了暗室环境下的图像采集, 采集时间间隔为 2min 左右, 如图 4 所示, 在完全无光辐照的情况下 CCD 仍能采集到图像, 不仅采集图像的平均灰度(平均灰度级为 34500 ~ 36500)变化不大, 而且杂散光斑随着时间的推移由下至上逐步减小直至消失(零散分布的小圆斑由黑变白, 其中心灰度级则由 0 增大至 65535), 杂散光

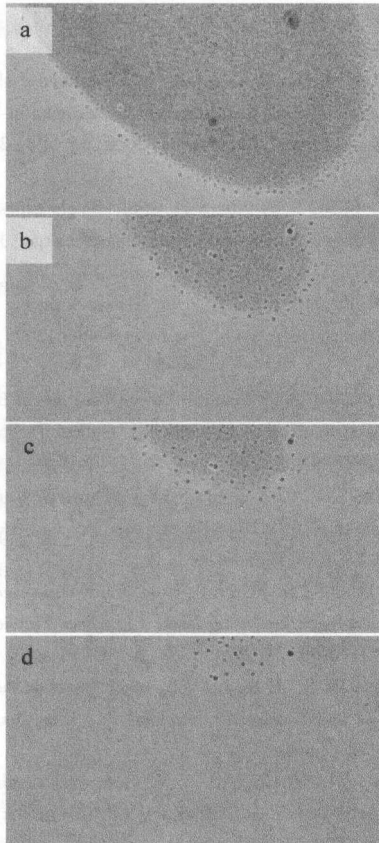


Fig. 4 Vanish of the stray facula without laser irradiation

斑的整个消失过程持续了 8min 左右,但 CCD 恢复正常采集(暗室环境下 CCD 采集的图像应为全黑,灰度级接近于 0)的时间为 15min 左右,进而推测:杂散光斑及阴影还是 CCD 被强激光辐照后产生的热效应^[9-10]和记忆效应现象。

3 杂散光斑现象分析

CCD 与激光相互作用时,CCD 的感光芯片接收光并生成电信号,再经模拟信号处理电路进行放大、采样和滤波等处理,最后输入到图像采集卡进行 A/D 转换并存储。因此,完成光电转换的 CCD 芯片是相机中最关键的部件,也可以说物场光强变化所引起的采集图像变化,其实质就是 CCD 输出电信号的变化所引起的采集图像灰度级变化,图像的灰度级变化与输出电信号的大小成正比。

根据参考文献[8]中的分析,对 CCD 输出电信号的过程理解为:将 CCD 芯片上的每个像素等效为一个读出电容,其电信号输入分别为信号电荷和复位脉冲,首先将信号电荷转移到读出电容引起电容两端的电压变化,再由复位脉冲使读出电容两端的电压恢复至复位电平,最后数据电平与复位电平之差即为读出电容输出的电信号。其中,数据电平是信号电荷转移至读出电容时电容两端的电平,复位电平是读出信号电荷之前读出电容两端所维持的电平。其过程如图 5 所

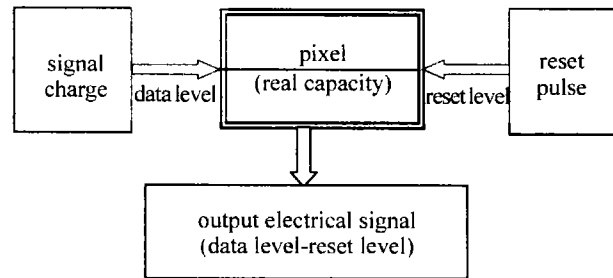


Fig. 5 The diagram of the pixel with the electrical signal

示。将 CCD 输出电信号与激光辐照、图像灰度级三者关联起来就是:无光照时,数据电平与复位电平相等,图像灰度级最低;光饱和时,数据电平与复位电平有一个最大差值,复位电平不变,图像灰度级最高;光过饱和时,复位电平发生反常变化,并与处于饱和的数据电平相等,图像灰度级类似于无光照时的情况。

通过对杂散光斑现象和 CCD 输出电信号的分析,对杂散光斑产生原因的解释为:短脉冲强激光入射的瞬间 CCD 感光探测器响应,像素上的灰尘形成中心最亮的圆形衍射条纹,导致采集图像中出现零散分布的中心灰度饱和的小圆斑;随着激光辐照的次数增多,灰尘吸收辐照激光的热量并进行热传递,导致与其对应像素的复位电平失常,CCD 的输出电信号降低,图像灰度级降低,呈现过饱和的状态,衍射圆环叠加的增强导致阴影加深(尤其是右上角的大尺寸灰尘),最终形成大面积的杂散光斑。

短脉冲强激光辐照 CCD 后产生杂散光斑,当激光停照后,杂散光斑及阴影由黑变白、由下至上逐渐消退,但 CCD 持续一段时间才逐渐恢复到正常工作状态。其原因分析为:相同实验条件下,随着激光功率密度增加,强激光辐照 CCD 产生的载流子过剩导致晶格受热,而 CCD 的遮光铝膜层对 532nm 波长激光的吸收也很强^[11],沉积在铝膜层的 532nm 波长的激光能量为 $g = \alpha(1 - R)I = 11.2 \times 10^4 I$,其中 α 为铝膜对此波长激光的吸收系数,取为 $1.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$; R 是铝膜对此波长激光的反射率,取为 92%; I 是激光的功率密度分布,与 CCD 芯片的径长、厚度和辐照时间相关。因而灰尘和 CCD 吸收激光能量后形成的热积累导致晶格温度升高、复位电平失常,使得 CCD 产生热效应和记忆效应,图像采集失常,随着温度的回落,CCD 也逐渐恢复了正常的图像采集功能。

通过对杂散光斑产生及消失现象的实验观察,并结合 CCD 输出电信号过程的理论分析,认为杂散光斑是灰尘受脉冲激光辐照时的衍射、CCD 的热效应和记忆效应所致,对 CCD 进行清洁和维护后,并降低了 CCD 采集图像的频率(15min 左右的间隔),发现杂散光斑现象消除,CCD 采集图像的功能也基本恢复正常。

4 结论

在粒子场同轴数字全息 CCD 采集图像中出现了大面积的杂散光斑,严重影响了物场信息的记录。通过对杂散光斑产生及消失现象的实验观察和 CCD 输出电信号的理论分析,得出:CCD 像素上的灰尘受激光照射产生衍射条纹导致采集图像中出现中心灰度过饱和的小圆斑,随着灰尘及 CCD 对激光能量的吸收导致 CCD 复位电平失常,进而出现中心灰度过饱和的大面积杂散光斑及阴影,并产生热效应和记忆效应,使得激光辐照停止后 CCD 的图像采集功能失常,严重影响后续图像的正常采集。因此,在激光辐照 CCD 的图像采集实验中,要注重对 CCD 进行日常的维护,减少 CCD 对激光能量吸收的热累积,以避免杂散光斑的产生,降低 CCD 热效应和记忆效应对图像采集的影响。

参考文献

- [1] KREIS T, ADAMS M, JüPTNER W. Digital in-line holography in particle measurement[J]. SPIE,1999,3744:54-64.
- [2] PEDRINI G, GUSEV M, SCHEDIN S, *et al.* Pulsed digital holographic interferometry by using a flexible fiber endoscope [J]. Optics and Lasers in Engineering,2003,40(5/6):487-499.
- [3] LUO Zh X, LI Z R, LIU Zh Q, *et al.* Application of in-line digital holography to micro-jet particles measurement [J]. Explosion and Shock Waves,2007,27(3):278-282(in Chinese).
- [4] LI Z B, ZHENG G, ZHANG L X, *et al.* Influence of some parameters for particle diameter measurement using digital in-line holography [J]. Opto-electronic Engineering, 2008, 35 (8): 24-29 (in Chinese).
- [5] WANG L, FENG S T, NIE S P, *et al.* Single exposure 3-D object digital holography based on multi-filtering technique[J]. Laser Technology,2007,31(4):354-357(in Chinese).
- [6] ZHOU J M, FU Y Y, GUO J, *et al.* Research on the soft damage of CCD induced by pulse laser[J]. Laser Journal,2005,26(2):20-21 (in Chinese).
- [7] CAO Y L, GAO Ch Q. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. Optical Technique,2004,30(5):583-586(in Chinese).
- [8] ZHANG Zh, CHENG X G, JIANG Z F. Excessive saturation effect of visible light CCD[J]. High Power Laser and Particle Beams,2008,20(6):917-920(in Chinese).
- [9] LIU Z J, LU Q S, JIANG Zh P, *et al.* Study of damage effect in CCD detectors irradiated locally by laser [J]. Laser Technology,1994,18(6):344-347(in Chinese).
- [10] LIU T H, ZHONG H R, LU Q S, *et al.* Study on mechanism of laser damage in photoelectric detectors [J]. Laser Journal,2001,22(6):5-8(in Chinese).
- [11] JIANG N, ZHANG Ch, NIU Y X. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays [J]. Laser & Infrared,2008,38(10):1004-1007(in Chinese).

(上接第 834 页)

在 $1.7\mu\text{W}/\text{cm}^2 \sim 2.5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 之间时,熔覆表面质量相对比较好,并且熔覆时等离子体主要来源于熔覆粉末的气化击穿;激光与基体作用时间太长或太短,即蓝紫光强度太小或太大,都得不到较好的表面熔覆质量。镍 60 在激光功率为 2000W ~ 2400W、扫描速率为 4mm/s ~ 5mm/s、送粉率为 17.6g/min 时,熔覆层表面光滑且较平整,熔覆表面质量相对较好。

参考文献

- [1] HONG L, WU G. Laser basic manufacturing technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 259-300 (in Chinese).
- [2] ZHANG G Sh. Modern laser manufacturing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2006 :135-212(in Chinese).
- [3] LIU X B, WANG H M. The influence of processing parameters on laser cladding composite coatings on TiAl intermetallic alloy [J]. Laser Technology, 2006,30(1):67-69(in Chinese) .
- [4] BI G J, ANDRES G, KONRAD W, *et al.* Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006,44(12): 1348-1359.
- [5] YU D, ZHONG M L, LIU W J, *et al.* Real-time monitoring research of melt pool images in laser cladding process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34 (sl): 86-90 (in Chinese).
- [6] CHEN J, TAN H, YANG H O, *et al.* Research on the molten pool behavior in the process of laser rapid forming through in situ observation technique [J]. Applied Laser, 2005, 25(2):77-80 (in Chinese).
- [7] WANG Ch M. Multi-sensor real-time quality diagnosis and its theoretical basis for laser welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 128-133 (in Chinese) .
- [8] LIU J H, ZHU Sh G. Image processing on high-speed photography of CO₂ laser welding plasma [J]. Applied Laser, 2002, 22(6):342-344 (in Chinese) .
- [9] MUKHERJEE S, CHAKRABORTY S, MANNA L. Effect of process parameters on laser surface hardening of plain carbon eutectoid steel [J]. Computers Materials & Continua, 2009,10(3):217-228.
- [10] ARIF A. Effect of input variability on the quality of laser shock processing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(10):2603-2611.