

532 nm激光对面阵硅基CCD的影响研究

闫鑫渤, 张巍*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

本文探究了532 nm波长激光对面阵式硅基电荷耦合器件(CCD)的电磁干扰效应, 通过构建激光辐照CCD器件的多物理场仿真模型与实验验证平台, 重点揭示了CCD饱和像元数量与入射激光功率密度之间的非线性响应机制。基于半导体器件物理模型, 仿真计算获得了不同辐照功率下电荷迁移层的载流子分布特性。实验系统定量获取了CCD输出图像的灰度数据, 通过对比分析实验数据与仿真结果, 发现两者在饱和像元增长趋势及功率阈值方面呈现高度吻合, 验证了所建模型在预测激光致盲效应方面的有效性, 为光电对抗系统中CCD器件的激光防护设计提供了理论依据。

关键词

激光干扰, 多物理场仿真模型, 实验系统

Study on the Interference of 532 nm Laser on Area Array Silicon-Based CCD

Xinbo Yan, Wei Zhang*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

This study investigates the electromagnetic interference effects of 532 nm wavelength laser on area-array silicon-based Charge-Coupled Device (CCD). By constructing a multi-physics simulation model for laser-irradiated CCD devices and developing an experimental validation platform, the nonlinear response mechanism between the number of saturated pixels in CCD and the incident laser power density was systematically revealed. Based on semiconductor device physics models, the carrier distribution characteristics in the charge transfer layer under varying irradiation power

*通讯作者。

levels were numerically simulated. The experimental system quantitatively acquired grayscale data from CCD output images. Through comparative analysis of experimental data and simulation results, a high degree of consistency was observed in both the growth trend of saturated pixels and the power threshold parameters, which validated the effectiveness of the proposed model in predicting laser-induced blinding effects. These findings provide a theoretical foundation for the laser protection design of CCD devices in electro-optical countermeasure systems.

Keywords

Laser Interference, Multi-Physics Simulation Model, Experimental System

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

图像传感器的发展历史非常悠久,按照产品的类型区分,主要有 CCD、CMOS 和 CIS 传感器三种。本文主要的研究对象是 CCD 器件。1969 年, W. S. Boyle、G. E. Smith 和 G. F. Amelio 于贝尔实验室成功研制出了 CCD 器件[1],随着光电对抗技术的快速发展,电荷耦合器件(CCD)作为光电系统的核心传感器,其抗激光干扰能力已成关键研究方向。仙童公司的 R. H. Dyck,研究了不同类型 CCD 的串扰效应[2],张震对可见光 CCD 激光致眩现象和机理进行了理论与实验研究[3]其中 532 nm 波长激光因其大气透过率高、与硅基材料能带匹配等特点,对 CCD 的干扰机制研究具有典型意义,廖海等针对不同 CCD 的结构差异,进行了 532 nm 激光干扰的实验[4],另外蔡跃开展了 170 皮秒 532 nm 激光辐照面阵 CCD 的实验研究[5]。

研究尽管已有研究揭示了激光辐照导致 CCD 饱和失效的现象,但对饱和像元动态演化规律与激光功率的定量关联机制仍缺乏系统性分析,且仿真模型与实验数据的耦合验证尚未形成普适性结论,本研究针对此问题,通过有限元分析软件 COMSOL 和 MATLAB 构建多物理场仿真模型和数值计算模型,结合高精度实验平台,定量表征了面阵硅基 CCD 在 532 nm 激光辐照下的非线性响应特性,研究成果不仅揭示了激光-CCD 互作用的多尺度物理机制,更为光电传感器抗激光加固设计与干扰效能评估提供了理论及实验支撑。

2. 仿真计算研究

2.1. 仿真模型构建

三维 CCD 像元可分解为二极管截面和沟道截面两个独立的二维模型进行分析。其中,载流子的产生和存储在二极管中完成,而其转移过程则在沟道中实现,载流子溢出模型见图 1。

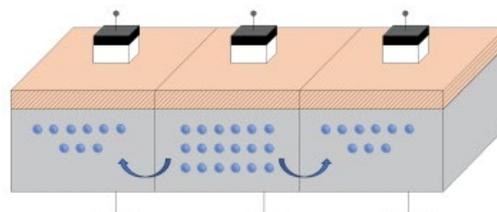


Figure 1. Carrier spillover model

图 1. 载流子溢出模型

本文的分析重点是设计并研究 VCCD(垂直 CCD)沟道的二维数值模型。理论上, 沟道中的信号电荷来源于二极管中的存储电荷, 但由于模型中省略了光电二极管结构, 为简化分析, 假设信号电荷直接由激光辐照产生。激光源加载在 G4、G5、G6 三个栅极构成的像元 2 上, 用以模拟激光引发的电荷变化。

二维数值模型的几何结构和仿真网格划分见图 2 和图 3, 总长度为 L, 栅深度为 D, 单个栅极的长度为 L_g , 栅间隙为 L_0 , 整个模型包括 5 个像元, 每 3 个转移栅构成一个完整像元, 具体结构与参数为, P 型均匀掺杂的硅基底, 掺杂浓度 N_a , 并接地, 在硅表面下方设有浅 N 型电子沟道, 采用高斯型掺杂分布, 结深为 d , 掺杂浓度为 N_d , 在硅表面上方覆盖一层厚度为 d_0 的二氧化硅 SiO_2 , 除金属电极外, 其余外边界均为绝缘边界, 栅极采用高压 V_g 和低压 V_l 控制, 初始化电压为 V_b , 入射激光功率为 P, 硅表面反射率为 R。模型结构参数见表 1。

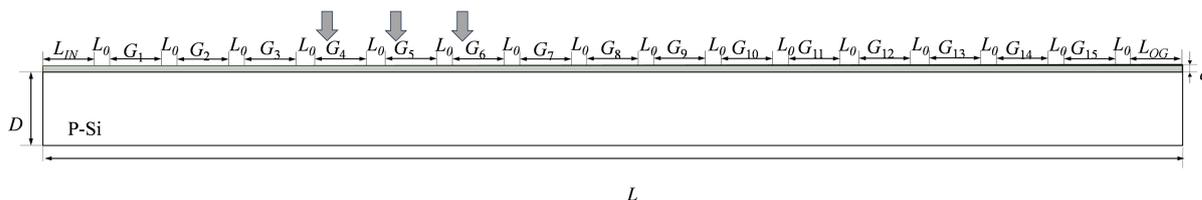


Figure 2. Simulation geometry structure
图 2. 仿真几何结构



Figure 3. Mesh model
图 3. 网格划分模型

Table 1. Model structural parameters
表 1. 模型结构参数表

参数	数值(单位)	参数	数值(单位)
L	51.8 μm	V_g	2 V
D	4.4 μm	V_l	-1 V
L_g	3 μm	V_b	5 V
L_0	0.05 μm	N_a	$3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
d	0.8 μm	N_d	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
d_0	0.075 μm	R	0.315

在 COMSOL Multiphysics 中, 构建了 CCD 沟道的二维几何模型, 并导入相关参数和公式, 对模型进行设置。

2.2. 仿真结果及分析

(1) 激光入射功率为 50 μW 时, 横向载流子浓度分布见图 4, 可以看出信号电荷储存在 G5 势阱中, 相邻的 G4 和 G6 栅极没有受到影响, 此时没有发生载流子溢出现象。

(2) 激光入射功率为 60 μW 时, 横向载流子浓度分布见图 5, 可以观察到此时, G5 栅极下载流子浓度提高, 且部分载流子已溢出至相邻势阱中, 此时发生了载流子饱和和溢出的现象。

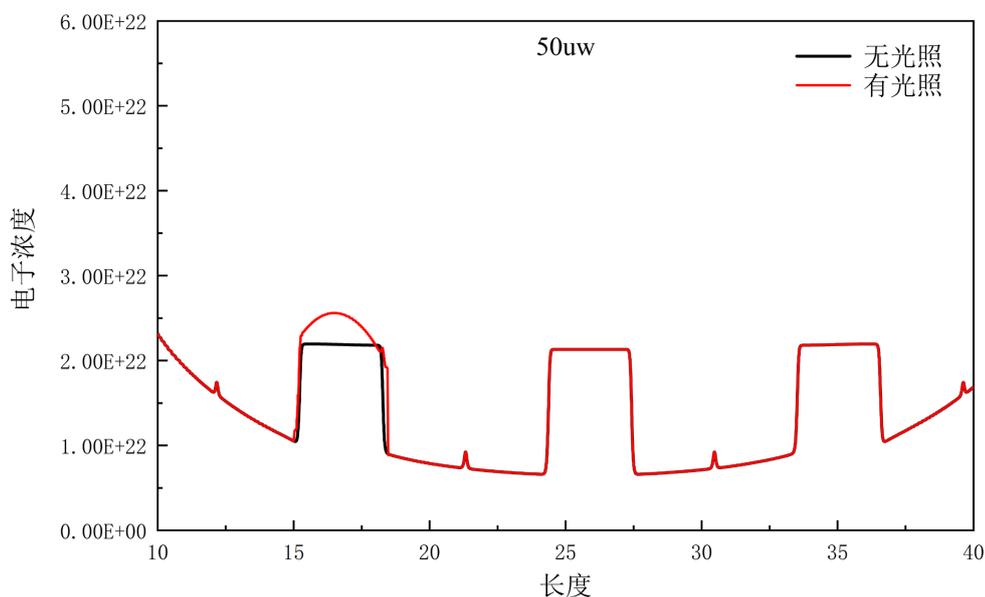


Figure 4. Carrier concentration distribution at 50 μW

图 4. 50 μW 载流子浓度分布图

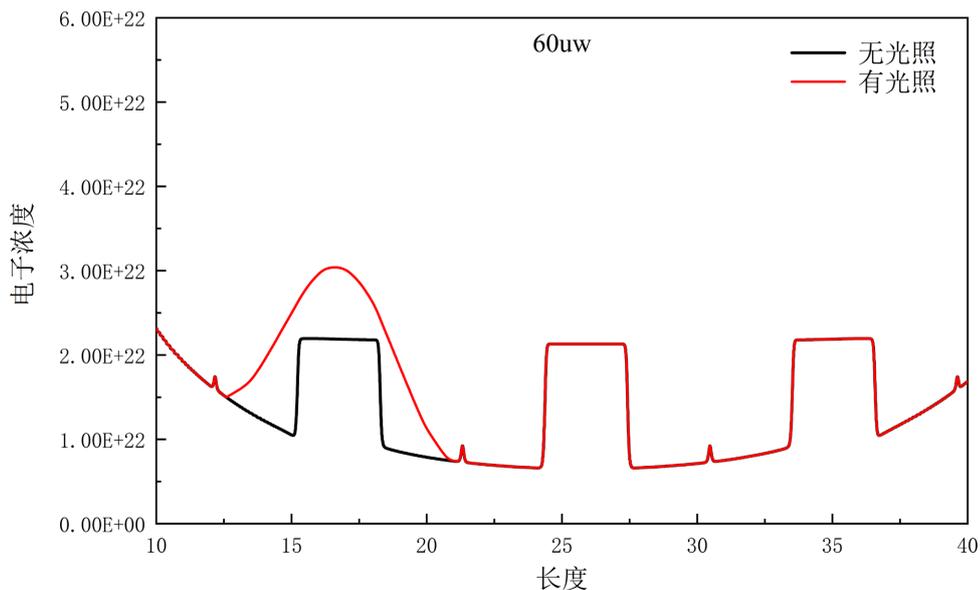


Figure 5. Carrier concentration distribution at 60 μW

图 5. 60 μW 载流子浓度分布图

2.3. 计算模型建立

上述有限元数值仿真计算模型是从 CCD 沟道像元内信号电荷的储存及溢出的角度对 CCD 串扰现象进行的分析, 但缺少关于整体 CCD 饱和像元数与入射激光功率的关系, 为了完善仿真, 通过数值计算软件 MATLAB 建立公式计算模型, 分析激光辐照时, CCD 感光芯上饱和像元数和激光功率之间的关系, 由于此仿真计算是从 CCD 整体界面的角度来建立的, 因此光生载流子涉及到的公式要进行调整如下。

当半导体受到激光辐照时, 其吸收的光子能量若超过带隙能量阈值, 将引发电子从价带跃迁至导带

的过程, 从而生成电荷, 设 CCD 受光面积为 A , 激光功率为 $P_{(t)}$, 产生的电荷量为:

$$Q_s = \eta q P_{(t)} AT / (h\nu)$$

式中 T 为光照时间, η 为量子效率。

设单个像元储存的载流子的最大数量为 Q_{th} , N 个像元最大能储存的电荷数量为 Q , 则有:

$$Q = N \cdot Q_{th}$$

由此可以推导出 CCD 饱和像元和激光入射功率的关系为:

$$N = \eta q P_{(t)} AT / (h\nu Q_{th})$$

上述公式中, 激光辐照时间 T 可在 MATLAB 仿真中自定义调节, Q_{th} 可依据上述有限元仿真结果, 单像元的激光饱和功率阈值 P_{th} 约可取为 $55 \mu\text{W}$, 则单像元储存的电荷数量阈值为:

$$Q_{th} = \eta q P_{th} AT / (h\nu)$$

当激光辐照的部分像元饱和时, 多余的光生载流子会向周围的像元扩散, 直到所有的光生载流子被完全吸收, 由于 CCD 内部存在水平方向的沟阻结构, 光生载流子在垂直方向上的扩散速度要快于水平方向, 扩散方式示意图见图 6。

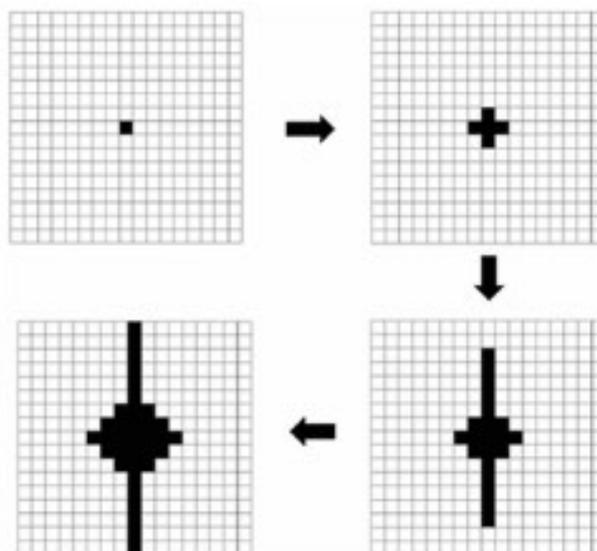


Figure 6. Schematic of carrier diffusion

图 6. 载流子扩散示意图

2.4. 数值计算结果与分析

基于上述原理及公式在 MATLAB 中建立仿真计算, 绘制出了关于激光在 CCD 界面上的饱和串扰图像及饱和像元数和激光功率之间的关系, 仿真结果见图 7。

从图中可以看出, 当激光功率达到 $60 \mu\text{W}$ 时, 开始出现饱和像元, 并且饱和像元数随激光功率的增加呈现线性增长的趋势, 且增长速率较快。然而, 随着激光功率进一步增加至 $80 \mu\text{W}$ 时, 串扰线开始出现, 饱和像元数的增长速率明显减缓, 增长曲线的斜率逐渐变小, 表明饱和像元的增加趋于平稳。这一现象表明, 饱和像元数随激光功率的增加并不是一直呈线性增加的, 增长速率会逐渐降低, 说明激光功率的进一步增加对 CCD 的响应逐渐减弱, 导致饱和像元数的增长速率显著降低。

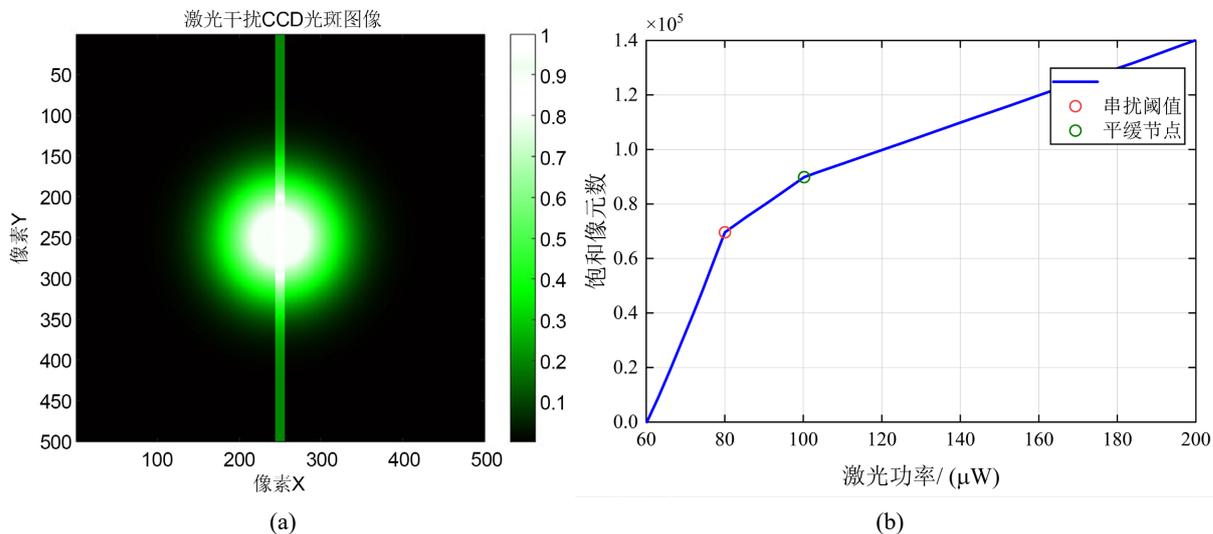


Figure 7. (a) Laser interference simulation results, (b) Relationship between saturated pixel count and laser power
 图 7. (a) 激光干扰仿真图, (b) 饱和像元数与激光功率关系图

3. 实验研究

3.1. 实验系统

实验中使用的激光器为 MGL-N-532A-3W 型号 532 nm 固体激光器, 通过调节激光器输出功率可以控制激光强度, 激光器输出激光功率为 3~5 W, 通过阅读前人对 532 nm 波长激光的实验研究, 已知其饱和功率密度通常在微瓦级别, 因此为了获得所需的激光功率范围, 实验中引用了 OD 值为 3.0 的衰减片, 根据衰减片的 OD 值与透射率 T 之间的关系式 $T = 10^{-(OD)}$, 可得出该衰减片对激光的透过率为 0.1%, 此外为了测量和记录激光功率, 实验所用的激光功率计型号为索雷博的 PM400, 检测功率范围为 50 nW~50 mW, 检测波长范围是 400 nm~1100 nm, 能够准确测量微瓦级别的激光功率。在本实验中, 所用 CCD 为台湾敏通的 37S10P 系列工业相机, 其光电传感器芯片为 1/3 Sony ICX405AK, 单像元尺寸为 9.8 $\mu\text{m} \times 6.3 \mu\text{m}$, 总像元数量为 537 (水平) \times 597 (垂直), 为了减小激光光斑面积, 实验系统中加入了聚焦透镜来调节光斑的大小。

实验系统示意图见图 8, 激光光源首先通过衰减片, 确保激光强度在一定的范围之内, 激光通过衰减片后, 光束被引导至分束器, 分束器将激光光束分为两路, 一路通过功率计监测激光功率, 另一路光束照射至 CCD 相机的探测器面, 对 CCD 的工作进行干扰, 光信号经过 CCD 相机的传感器阵列处理后, 图像信息被传输到连接的计算机上, 计算机系统实时接受并储存这些图像数据, 用于后续分析, 评估激光光束对 CCD 的干扰效果。

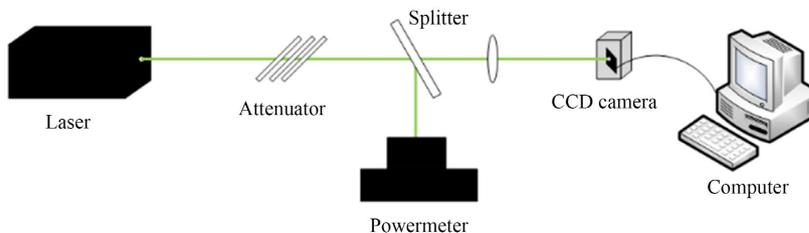


Figure 8. Schematic diagram of the experimental system
 图 8. 实验系统示意图

本文的实验系统全套搭建在超净间内, 配备了防震台以确保实验的稳定性。实验在白天进行, 因此实验室内会有一些的背景光。在后期数据处理时, 我们已考虑了背景光的影响并做了适当调整。

3.2. 激光干扰现象和结果分析

实验中通过调节激光器的功率值, 观察到不同激光功率下的 CCD 串扰图像, 选取其中激光功率分别为 80 μW 、200 μW 和 1.2 mW 的干扰图像见图 9。

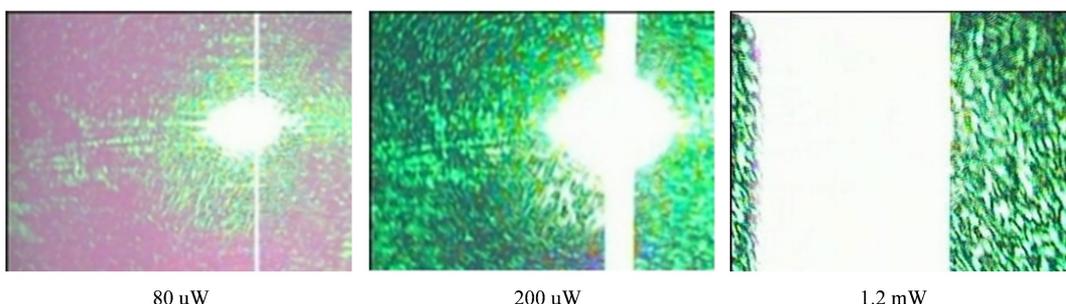


Figure 9. Laser-induced interference on CCD image
图 9. 激光干扰 CCD 图像

从上面的图 9 的三个图中可以观察到, CCD 在三个激光功率下皆出现了饱和串扰现象, 图像中心出现饱和光斑且伴随串扰线穿过饱和光斑中心, 随着激光功率的增大串扰现象逐渐加剧严重, 具体表现为中心饱和光斑面积增大, 串扰线逐渐变宽, 通过图像处理技术提取了不同激光功率下对应的 CCD 饱和和像元数, 绘制了饱和像元数和激光功率之间的关系见图 10。

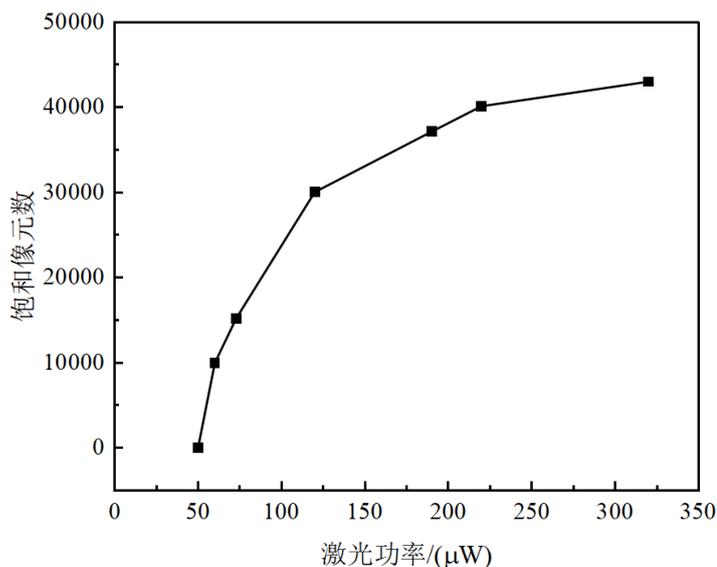


Figure 10. Relationship between saturated pixels and laser power
图 10. 饱和像元与激光功率关系图像

从图 10 中可以明显看到, 当激光功率增加时, 饱和像素数量的增长趋势并非始终呈线性关系, 具体而言, 随着激光功率的增加, 激光功率的增加导致饱和和像素数量的增长率呈现降低趋势。这表明, CCD 在经历串扰现象后对激光的响应变得不再线性, 饱和像素数量的增长趋于平缓, 在激光功率进一步增加

时, CCD 对激光的敏感度逐渐减弱, 导致饱和像素的数量不再按线性比例增加, 这与上述仿真的结果保持一致。

3.3. CCD 电子快门技术对成像的影响

电子快门是一种用于控制 CCD 图像有效积分时间的技术, 其通过自动调节积分时间来适应不同的光照条件。在动态电子快门的控制下, CCD 相机能够根据当前图像的信号强度自动调整有效积分时间, 从而优化图像曝光量。具体来说, 如果前一帧图像的入射光强度较强, 电子快门时间会在动态调节下缩短, 从而减少下一帧图像的曝光量, 避免过曝现象; 反之, 如果前一帧图像的光强较弱, 电子快门时间会适当增长, 从而延长下一帧图像的有效积分时间, 提高图像的亮度和细节, 针对该电子快门技术, 本文在实验中观察到了背景消失和干扰条纹的现象如下。

3.3.1. 背景消失现象

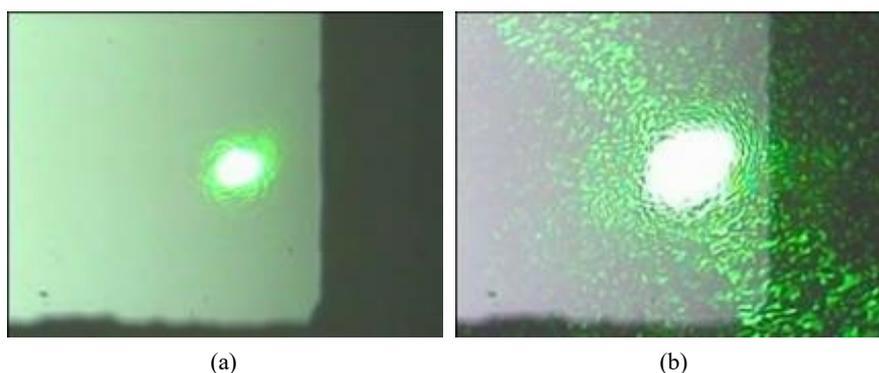


Figure 11. Background eliminated image
图 11. 背景消失图像

实验中捕捉到的 CCD 背景消失现象见图 11 图中(a)和(b)展示了在仅激光功率不同的情况下, 其他实验条件保持一致的两幅 CCD 图像。图(a)中, 激光功率为 $45 \mu\text{W}$, 背景轮廓非常明显, 图像细节清晰; 而在图(b)中, 随着激光功率的增加到 $50 \mu\text{W}$, 背景的亮度明显下降, 轮廓模糊, 只能看见背景的大致轮廓。这种变化的主要原因正是由于 CCD 相机的动态电子快门技术的作用。

3.3.2. 干扰条纹现象

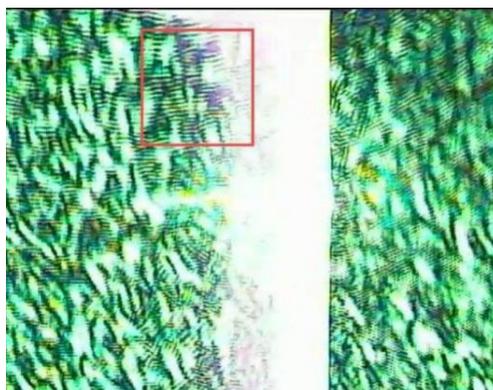


Figure 12. Interference fringe pattern
图 12. 干扰条纹图像

实验中捕捉到的干扰条纹图像见图 12, 可以看出在 CCD 饱和区周围存在大量细微规整的出彩色和黑色相间的干扰条纹, 分析干扰条纹产生的原因与 CCD 的图像读出方式有关, 实验中使用的 SonyICX405AK 行间转移 CCD 的读出方式为场读出, 在这种方式下, 每一幅图像的输出由奇场和偶场两部分组成, 每个图像对应两次积分时间和两次读出转移, 即分别对应奇场和偶场的读出操作, 正是这一机制为干扰条纹的产生提供了条件, 由于 CCD 具有电子快门调节能力, 使得奇场和偶场之间存在曝光差异, 因此产生了图像中的干扰条纹。

4. 结论

本文通过仿真和实验结合的方式对激光干扰 CCD 的现象进行了研究, 两者同时表明 CCD 在被激光辐照时, 饱和像元数并不是一直呈线性增长的, 随着激光功率的增大, 对 CCD 的响应逐渐减弱, 饱和像元数的增长速率逐渐减小。

参考文献

- [1] Boyle, W.S. and Smith, G.E. (1970) Charge Coupled Semiconductor Devices. *Bell System Technical Journal*, **49**, 587-593. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x>
- [2] Yagi, M. (2012) Crosstalk Analysis of Suprime-Cam FDCCDs Using Cosmic Rays in Dark Frames. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **124**, 1347. <https://doi.org/10.1086/668891>
- [3] 张震. 可见光 CCD 的激光致眩现象与机理研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [4] 廖海, 孙年春, 冯国英, 周传明. 532 nm 激光对面阵和线阵 CCD 损伤效应实验研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(5): 643-646.
- [5] 蔡跃, 叶锡生, 马志亮, 王立君, 冯国斌, 陈林柱. 170ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si-CCD 的实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 457-462.