

632 nm 激光对 CCD 干扰效果仿真与实验研究

高 润,牛春晖,李晓英,吕 勇,孟 浩
(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,北京 100192)

摘 要:为解释激光对 CCD 探测器的干扰机理,建立了激光辐照 CCD 探测器的有限元仿真模型。利用波长为 632 nm 的激光对 CCD 探测器进行干扰实验,通过图像处理的方法得到了光功率与饱和干扰面积的关系曲线。建立“水桶”模型以及利用半导体 PN 结电子、空穴扩散理论建立有限元仿真模型,将这两个模型分别进行激光对 CCD 探测器干扰效果的仿真计算,得到不同光功率下的饱和干扰面积,并与实验结果对比,结果表明:“水桶”模型并未能较好地解释实验现象,而有限元模型的仿真结果与实验结果更加接近。故可利用有限元仿真模型来预测实际激光对 CCD 探测器的干扰效果。

关键词:探测器;激光干扰;有限元法;仿真

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.05.008

Simulation and experimental research on CCD jammed by 632 nm laser

GAO Run, NIU Chun-hui, LI Xiao-ying, LÜ Yong, MENG Hao
(School of Instrumentation Science & Optoelectronic Engineering,
Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To explain the jamming mechanism of CCD that is irradiated by laser, the theoretical simulation model is established based on finite element method. The simulation model is used to calculate the saturation jamming area of Si-CCD irradiated by 632 nm lasers with different optical power. The "bucket" model is established, and the finite element simulation mode is established by using the electron and hole diffusion theory of the semiconductor PN junction, and then simulations of the effect that the laser interferes CCD are carried out for the two models. The saturation interference areas are obtained under different optical powers and compared with experimental results. The results show that "bucket" model can't explain the experimental phenomenon better, and the saturation interference area of the finite element simulation model is closer to the experimental results. Therefore, the finite element simulation model can be used to predict the actual interference effect.

Key words: detectors; laser jamming; finite element method; simulation

1 引 言

CCD 图像传感器具有体积小、灵敏度高、动态范围大、抗畸变等特点,已经广泛应用于卫星侦察、遥感等军事和科学领域^[1-11]。近年来对于激光干扰和损伤 CCD 探测器方面的研究已越来越广泛,研

究内容也越来越深入,有关激光干扰和损伤 CCD 探测器方面的实验已做了很多,不足的是多次实验的结果之间难以进行统一的对比分析,另外 CCD 探测器的损伤实验不仅实验成本高,且 CCD 种类繁多,做一两次实验又不具有代表性,为很好地解决这些

基金项目:北京市教委科研计划项目(No. KM201511232005, No. KM201311232006, No. SQKM201211232007)资助。
作者简介:高 润(1992-),女,在读研究生,主要从事光电对抗方面的研究工作。E-mail:15010736354@163.com
收稿日期:2015-09-08; **修订日期:**2015-10-12

问题,可利用日趋成熟的计算机仿真技术。利用计算机仿真软件研究激光对 CCD 探测器的干扰和损伤效果,不仅有助于降低研究成本,为实验提供可靠的参考数据,对 CCD 探测器的研制也具有一定指导性。所以激光干扰和损伤 CCD 探测器的仿真研究,已成为光电对抗领域内的重要课题,具有一定研究意义和应用前景^[2]。如今基于有限元分析算法编制的软件即有限元分析软件已经越来越为人熟知。有限元法是一种高效能、常用的数值计算方法,可应用于任何微分方程描述的物理场,得到了工程界的认可和广泛应用,而有限元分析法的广泛应用,使得很多研究项目进入了新天地。

目前国内外研究者在有关激光干扰探测器方面已做了一定仿真研究,主要集中在激光干扰光电导引头^[1]、CCD 探测器串扰效应^[2-3]、高重频激光的干扰效应^[4]、激光角度欺骗干扰半实物^[5]等仿真研究。有关激光对 CCD 探测器饱和干扰效应的仿真研究,一般文献只是对 CCD 探测器的串扰现象进行定性分析,并没有把仿真得到的激光对 CCD 探测器的干扰效果与实验结果结合起来对比分析。为此,利用波长为 632 nm 激光对 CCD 探测器进行干扰实验,通过图像处理的方法得到不同光功率下的饱和干扰面积曲线。建立“水桶”模型以及利用半导体 PN 结电子、空穴扩散理论建立有限元仿真模型,并将这两个模型分别进行激光对 CCD 探测器干扰效果的仿真计算,即可得到不同光功率下的饱和干扰面积,并把仿真结果与实验结果进行对比分析。

2 模型建立

CCD 是一个排列起来的 MOS(金属氧化物半导体)电容阵列,单个 MOS 电容结构如图 1 所示。

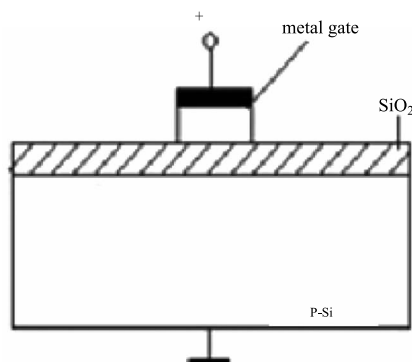


图 1 CCD 探测器结构

Fig. 1 Structure of CCD detector

每个 MOS 电容器也被称为一个像素元,每个像素元具有两个功能:一是在光敏区进行光电转换和

电荷储存,二是利用转移栅使电荷转移。

在半导体材料中,载流子的产生机制与材料的光谱吸收特性有关,半导体材料在光作用下吸收光子,引起电子跃迁形成电子和空穴,光生载流子的浓度可通过光谱积分获得:

$$G(z) = \int (1 - R) \alpha(\lambda) I(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} d\lambda \quad (1)$$

其中, $G(z)$ 表示光生载流子浓度; $(1 - R)$ 为光谱透射率; α 为材料吸收系数; I 为入射光强; λ 为光波长。光生载流子浓度 $G(z)$ 是光谱透射率 $(1 - R)$ 与材料吸收系数 α 对光功率密度在全光谱上的加权积分。

当强光辐照 CCD 探测器,光生载流子的产生时间约为皮秒量级,而光信号的积分时间约为微秒或毫秒量级,故半导体中将存在大量光生载流子,在载流子储存和转移的过程中,它们将有足够的时间向周围扩散,从而对其他像素元造成干扰^[6]。载流子的扩散方程如下列公式所示。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n - U_n \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p - U_p \quad (3)$$

其中, p 为空穴浓度; n 为电子浓度; q 为电荷量; J_p 为空穴电流密度; ∇ 为几何梯度算子; J_n 为电子电流密度; U_p 为非平衡空穴复合率; U_n 为非平衡电子复合率; t 为时间。

3 仿真模型

根据 MOS 结构,建立二维 CCD 仿真模型。图 2(a) 为本文建立的二维 CCD 仿真模型减少像素元数后的模型示意图。如图 2(a) 所示,在长为 L 、厚为 d 的半导体硅衬底上整体掺入 P 型掺杂 N_A ,在衬底表面生长一层厚为 d_0 的二氧化硅层,硅衬底两端分别是长度为 L_{IN} 的输入栅和长度为 L_{OC} 的输出栅,两极厚度都为 d_1 ,在两极下方衬底硅中掺入 N 型掺杂 N_D ,结深为 d_2 。中间为转移栅,栅极长度为 L_C 厚度为 d_1 ,栅极之间相距 L_0 。在栅极下的硅衬底中埋入 N 型沟道 N_{D1} ,结深 d_3 。利用欧姆接触在转移栅 V_C ,输出栅 V_{OC} 上加正电压,硅衬底基极接地。激光入射方式采取背照式,激光波长为 λ ,光功率 P ,在中间像素元下方硅衬底中设置长 L_1 ,厚为 d_4 的载流子复合区域以进行光电转换,依据式(1)得到光生载流子的浓度。在光积分时间 t_0 内,光生载流子有足够时间向其他像素元溢流,从而对其他像素元造成干扰。结构参数如表 1 所示。

表 1 全局定义参数

Tab. 1 The global definition parameters

parameter	Numerical value	parameter	Numerical value
N_D / cm^{-3}	1×10^{18}	d_0 / nm	20
N_{D1} / cm^{-3}	1×10^{20}	$d_1 / \mu\text{m}$	0.5
N_A / cm^{-3}	1×10^{17}	$d_2 / \mu\text{m}$	2
$L / \mu\text{m}$	37	$d_3 / \mu\text{m}$	1
$L_{IN} / \mu\text{m}$	5	$d_4 / \mu\text{m}$	8.5
$L_{OG} / \mu\text{m}$	5	V_G / V	8
$L_G / \mu\text{m}$	5	V_{OG} / mW	40
$L_0 / \mu\text{m}$	3	λ / nm	632
$L_1 / \mu\text{m}$	5	P / mW	10
$d / \mu\text{m}$	10	$t_0 / \mu\text{s}$	100

利用有限元法对模型进行数值计算,有限元法的本质是将任何约束以弱形式表现出来。利用有限元法在模型绝缘栅处设置边界条件,边界约束方程为:

$$n \cdot J_n = 0 \quad n \cdot J_p = 0 \quad n \cdot D = 0 \quad (4)$$

其中, D 为扩散系数。建立约束网络,为计算精确把模型进行网络剖分。网络剖分采用三角形网络,因为三角形单元对几何轮廓有较强的适应能力。在模型中对干扰效果影响较大的区域进行细化,从而增加网格数量以增加精确度,网格剖分效果如图 2 (b) 所示。最后对模型进行仿真计算,由于直接法可处理线性 and 非线性方程且保证有解析解,故选用直接法耦合计算。

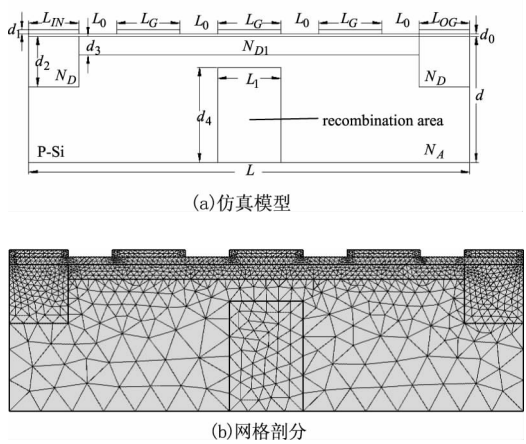


图 2 仿真模型与网格剖分

Fig. 2 Simulation model and the mesh subdivision

利用有限元法对模型进行仿真计算,得到激光对 CCD 的干扰效果如图 3 所示。

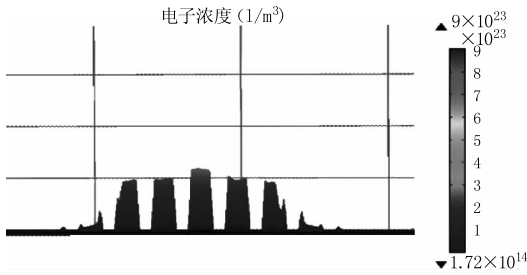


图 3 模型仿真结果

Fig. 3 Model simulation results

如图 3 所示,图中长柱表示受到激光干扰的像素元在其积分势阱内储存的电子浓度,浓度值可从图右侧浓度分布表查看,从图 3 中可数出共有 7 个像素元受到激光干扰。在模型中可通过改变模型参数,仿真得到 CCD 不同程度的干扰效果。

4 波长为 632 nm 激光对 CCD 干扰效果

4.1 器件参数

实验选用 CCD 型号为“MINTRON PK-01”,该 CCD 的影像传感器为 1/3 in (CCD 靶面尺寸为宽 4.8 mm,高 3.6 mm,对角线 6 mm),总像素数为 537 × 597。

4.2 实验过程

实验在暗室内进行,整个实验布局如图 4 所示。CCD 与激光器之间放有衰减片,先调节衰减片使 CCD 处于线性工作区的范围内,逐渐减小衰减,激光功率为 108 nW,1.14 μW,3.4 μW,8.8 μW,此时 CCD 仍处于线性工作区内,当光功率增加至 CCD 处于临界饱和状态时,调整光斑在 CCD 靶面位置,确定此时的激光辐照功率为像元饱和和阈值,用光功率计测得功率为 16.6 μW,继续增强激光功率,CCD 探测器进入饱和状态测得此时光功率为 49.8 μW。不同光功率下激光对 CCD 探测器的干扰效果如图 5 所示。

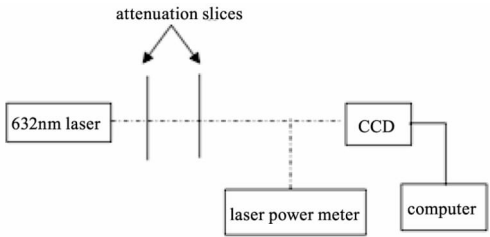
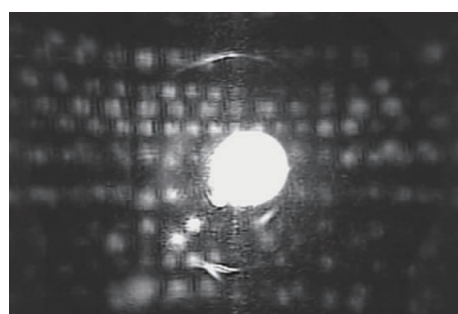


图 4 实验装置示意图

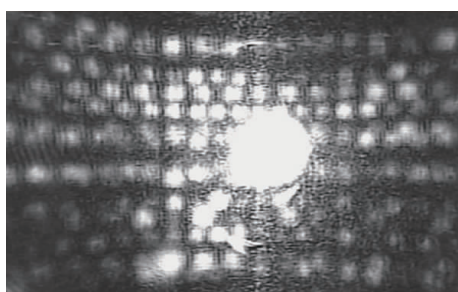
Fig. 4 Schematic diagram of experimental devices



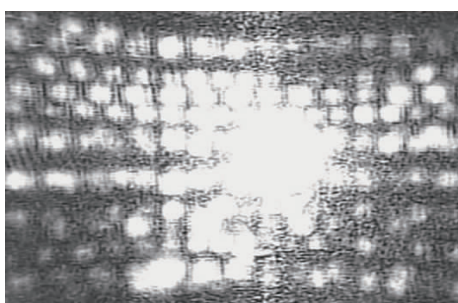
(a) 激光功率 108 nW



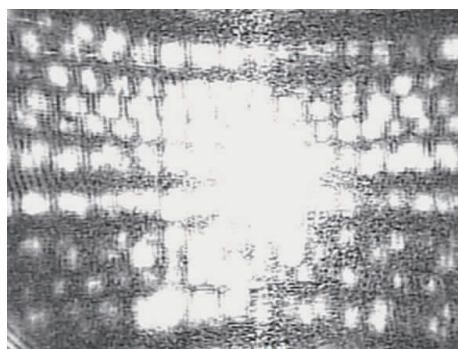
(b) 激光功率 1.14 μW



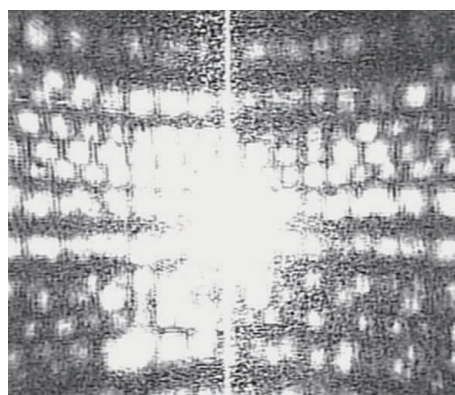
(c) 激光功率 3.4 μW



(d) 激光功率 8.8 μW



(e) 激光功率 16.6 μW



(f) 激光功率 49.8 μW

图 5 激光干扰 CCD 探测器的图像

Fig. 5 Images of laser jamming CCD detector

利用计算机采集激光干扰 CCD 探测器的输出图像。利用图像处理的方法先将输出图像变成灰度图,在灰度图像中,设定灰度值大于某一个阈值的像素点视为饱和,再对激光干扰的图像进行处理,得到不同光功率下 CCD 探测器的饱和干扰面积占整个探测器面积的比例关系^[6],如图 6 中曲线 1#所示。

4.3 仿真验证与分析

建立“水桶”模型并对实验结果进行仿真验证。当激光辐照半导体,半导体通过本征激发将大量光子转换成光生电荷,光生电荷 Q 可表示为:

$$Q = \eta q P A t_1 / h \nu \quad (5)$$

式中, η 为量子效率; A 为受光面积; t_1 光照时间; h 为普朗克常数; ν 是频率。当栅极电压开启,光生电荷进入势阱中,势阱储存的电荷量是一定的,故光生电荷会向邻近势阱扩散,对于这一扩散过程本文用“小桶”和“水滴”来形象类比,即为“水桶”模型。“小桶”喻为 CCD 上的每一个像素元,当光照射某个像素元时就像“水滴”在不断洒入“小桶”中,水盛满“小桶”后向四周溢流,使得没有光注入的小桶也被干扰。水的总量就是光生电荷量 Q ,由公式(5)可知电荷 Q 与光功率 P 成正比,小桶注入水后的饱和阈值为 Q_{th} ,小桶水满后向周围溢流,干扰的总像素元数 N 为: $N = \frac{Q}{Q_{th}}$,通过单个像素元面积可计算得到饱和干扰面积,设置与实验相同参数,故可仿真得到当光功率不同,CCD 探测器的饱和干扰面积占整个探测器面积的关系曲线如图 6 中曲线 3#所示。

利用有限元模型对实验结果进行仿真验证。设置与实验相同的光功率参数,通过仿真计算可得到不同光功率下,饱和干扰面积占整个探测器面积的

关系曲线如图6中曲线2#所示。

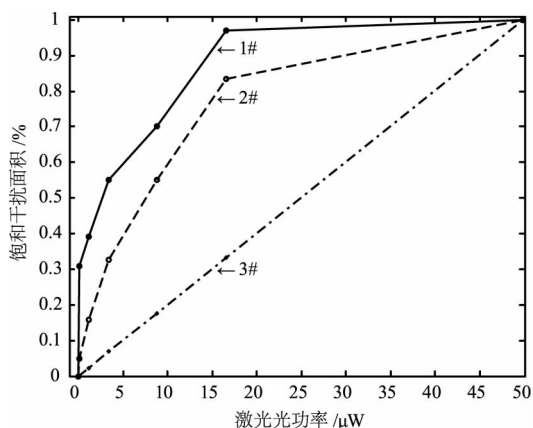


图6 激光光功率与饱和干扰面积的关系曲线

Fig. 6 Relationship between laser incident power and saturated jamming area

如图6中曲线1#和曲线2#所示,由实验和有限元仿真模型所得结果可知:饱和干扰面积不随光功率的增加而线性增长。而“水桶”模型所得仿真结果为:饱和干扰面积随光功率的增加而线性增长,如图6中曲线3#所示。

通过图6中曲线1#实验结果与曲线3#“水桶”模型的仿真结果对比分析可知:“水桶”模型并不能较好解释实验现象。分析原因是由于当光照射某个像素元时信号电荷如“水滴”一样不断收集在势阱中,但是在实际情况下阱深并非如小桶一样深度固定不变,当信号电荷不断聚集在势阱中时,势阱深度会随信号电荷间的相互作用而发生变化,直到电荷间的相互作用达到动态平衡后,势阱深度才会趋于恒定。所以“小桶”深度固定不变会成为光功率与饱和干扰面积成线性关系的重要原因,从而使得此仿真结果与实验结果存在较大差距。

根据有限元仿真模型得到的仿真结果如图6中曲线2#所示,与图6中曲线1#的实验结果对比可知:仿真曲线的变化趋势与实验曲线基本一致。分析原因是由于本文建立的仿真模型基本从本质上揭示了半导体内部的物理机制,这些物理机制使模型可根据电荷间的相互作用自动对势阱深度进行调节,故使得仿真结果更加准确。由于本文建立的有限元仿真模型没有考虑暗电流和光热作用对饱和干扰面积的影响,这会成为仿真数据和实验数据之间仍存在差距的主要原因。

综合图中三条不同光功率下的饱和干扰曲线,经比对分析可知:本文建立的有限元模型其仿真曲线的变化趋势与实验曲线基本一致,故可利用此模型来预测实际激光对CCD探测器的干扰效果。

5 结论

本文利用波长为632 nm激光对CCD探测器进行干扰实验,通过图像处理的方法得到光功率与饱和干扰面积的关系曲线,建立“水桶”模型以及利用半导体PN结电子、空穴扩散理论建立有限元仿真模型,分别对两个模型进行仿真计算,可得到不同光功率下的饱和干扰面积曲线,并与实验结果对比。仿真结果与实验结果对比分析可知:利用“水桶”模型得到的饱和干扰面积随光功率的增加而线性增长,此仿真结果并不能较好解释实验现象,而有限元仿真模型得到的仿真曲线其变化趋势与实验曲线基本一致,分析原因是由于本文建立的仿真模型基本从本质上揭示了半导体内部的物理机制,从而使得仿真结果更加准确。故可利用本文建立的有限元仿真模型来预测实际激光对CCD探测器的干扰效果。

参考文献:

- [1] YANG Xiwei, TONG Zhongcheng, WANG Yafu, et al. The simulation experiment of laser jamming on CCD imaging seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (7): 1243 - 1248. (in Chinese)
杨希伟, 童忠诚, 汪亚夫, 等. 激光干扰光电成像导引头的建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (7): 1243 - 1248.
- [2] GAO Weiwei. Simulation of the cross talk effect of lasers on the infrared imaging system [J]. Electronic Science and Technology, 2010, 23 (6): 35 - 37. (in Chinese)
高巍巍. 红外成像系统激光干扰饱和串音效应的仿真[J]. 电子科技, 2010, 23 (6): 35 - 37.
- [3] QI Fengjie. Study on cross-talk of laser jamming on inter-line transfer CCD [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35 (1): 23 - 25. (in Chinese)
齐凤杰. 激光干扰行间转移CCD串扰现象研究[J]. 半导体光电, 2014, 35 (1): 23 - 25.
- [4] YIN Ruiguang, ZHANG Wenpan, LIU Yanfang, et al. High-repetition-frequency laser jamming effect mathematical simulation based on measured data [J]. Infrared and

- Laser Engineering, 2013, 42(7): 1710 - 1715. (in Chinese)
- 殷瑞光, 张文攀, 刘艳芳, 等. 基于实测数据的激光高重频干扰效果数学仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1710 - 1715.
- [5] DANG Dongni, LI Bin, FAN Dongqi. Design of semiphysical simulation test system for laser jamming of angle deception[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(5): 398 - 401. (in Chinese)
- 党冬妮, 李斌, 范东启. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统设计[J]. 激光与红外, 2007, 37(5): 398 - 401.
- [6] LIU Yanwu. Experiment research on laser disturbing CCD detectors[J]. Laser Journal, 2011, 32(1): 55 - 56. (in Chinese)
- 刘延武. 激光干扰 CCD 系统的实验研究[J]. 激光杂志, 2011, 32(1): 55 - 56.
- [7] Schleijpen R M A, Dimmeler A, Eberle B, et al. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]//SPIE, 2007, 6738: 139 - 146.
- [8] ZENG Xiongwen, LU Qisheng, ZHAO Yijun, et al. The photoelectric characteristic research of CCD [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(1): 47 - 51. (in Chinese)
- 曾雄文, 陆启生, 赵伊君, 等. CCD 的光电特性研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 47 - 51.
- [9] RAN Feng, YANG Hui, HUANG Shuping. Design of real-time color video capture for area CCD [J]. Optics and precision Engineering, 2010, 18(1): 273 - 280. (in Chinese)
- 冉峰, 杨辉, 黄舒平. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 273 - 280.
- [10] WANG Shiyong. Study on laser-induced CCD detector vulnerability and survivability and fuzzy synthetic evaluation on CCD [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- 王世勇. 激光对 CCD 探测器干扰损伤的研究及模糊评估[D]. 长春: 中国科学院, 2002.
- [11] SHU Ping. CCD image sensor pixel modeling and simulation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- 舒平. CCD 图像传感器像元建模与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.