

文章编号: 1001-3806(2020)04-0418-06

近红外激光对图像传感探测器的干扰研究

张亚男, 牛春晖*, 赵爽, 吕勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 为了研究近红外激光对图像传感器的干扰机理, 利用波长为 1064nm 的连续激光辐照黑白电荷耦合器件相机, 观察激光对黑白相机的干扰现象, 将实验中采集到的数字图像进行处理, 提取了黑白相机在不同激光功率下的干扰程度曲线, 并进行了分析。结果表明, 图像传感器相机干扰包括干扰光斑和串音线, 激光功率越高, 干扰光斑半径越大, 串音线缓慢变宽, 相应干扰区域中饱和像元数越多, 干扰程度越严重; 对于 1064nm 激光对黑白相机的干扰过程, 饱和像元数量正比于激光功率基本呈线性增长; 对实验现象中出现的规律性点阵光斑和旁支串音线的新现象解释为与光学镜头的傅里叶频谱性质有关; 利用相关公式推导得出一般干扰过程的拟合曲线, 并根据图像传感器基本像元结构的电容势阱特点和载流子溢出方式来对干扰过程进行仿真模拟, 仿真结果与实验数据基本相符。该结果有助于近红外激光对 CCD 的干扰研究。

关键词: 激光技术; 数据拟合; 数字图像处理; 激光干扰; 饱和像元; 金属氧化物半导体结构

中图分类号: TP212.1; TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2020. 04. 004

Study on interference of near-infrared laser to charge-coupled device detector

ZHANG Ya'nan, NIU Chunhui, ZHAO Shuang, LÜ Yong

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information and Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to study the interference mechanism of near-infrared laser to image sensor, a monochromatic charge-coupled device(CCD) detector was irradiated by continuous laser with a wavelength of 1064nm. The interference phenomenon of laser to monochromatic camera was observed and the digital image collected by the experiment was processed. And the interference degree curves of monochromatic camera under different laser powers were extracted. After analysis, the following conclusions were obtained: CCD interference includes interference spot and crosstalk line. The higher the laser power is, the larger the interference spot radius is, and the crosstalk line is slowly widened. The more number of saturated pixels in the corresponding interference region, the more serious the interference degree. For the interference of 1064nm laser to monochromatic camera, the number of saturated pixels is almost linearly proportional to the laser power. Analysis of the new phenomena of regular dot-matrix and side-by-side crosstalk appearing in experimental phenomena is related to Fourier spectral properties of optical lenses. The fitting curve of the general interference process is derived by using the relevant formula. Finally, the interference process is simulated according to the characteristics of the CCD basic pixel structure capacitor potential trap and the carrier overflow mode. The simulation results are basically consistent with the experimental data.

Key words: laser technique; data fitting; digital image processing; laser interference; saturated pixel; metal oxide semiconductor structure

引言

电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)是由

作者简介: 张亚男(1994-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光干扰的研究。

* 通讯联系人。E-mail: Niuchunhui@bistu.edu.cn

收稿日期: 2019-09-11; 收到修改稿日期: 2019-10-15

美国贝尔实验室首次研发出来的新型光电器件, 金属氧化物半导体(metal oxide semiconductor, MOS)电容是其基本像元。CCD 图像传感器具有以下几项突出优点: 小质量、小体积、较长的使用寿命、高灵敏度、较大的动态范围、低功耗以及高准确度、高分辨率。基于它的突出优点, CCD 在国防、工业生产、医学界和其它科学研究领域中的应用非常广泛。现代光电对抗领域, CCD 受限于其抗干扰性能较低而极易被激光干

扰,高强度激光甚至能够烧毁探测器的传感器部件,造成CCD内部结构和材料的永久性损坏,使其无法成像。红外波段的激光由于具有很强的大气穿透能力,主要被用于军事中的激光制导以及激光雷达技术^[1-10]。自21世纪开始,出现大量有关激光干扰及损伤CCD的现象及原理研究,但大部分集中在干扰阈值的测量和干扰机理的分析。参考文献[10]~参考文献[15]中研究了激光对CCD及互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)探测器的干扰及损伤阈值,但是没有进行数值计算验证。参考文献[15]~参考文献[20]中研究了1064nm激光干扰CCD时激光的干扰机理,但是却缺乏仿真分析来具体说明。本文中通过搭建实验光路,模拟近红外激光辐照CCD探测器的干扰过程,进一步完善了1064nm激光对CCD的干扰机理,并对干扰情况作了定量计算和仿真,得出激光干扰过程中激光功率同CCD饱和像元的关系曲线和CCD受干扰时内部载流子扩散的仿真模型,与实验数据基本吻合,丰富了利用红外激光对CCD干扰的研究。

1 CCD工作原理和干扰机理

CCD的基本像元MOS结构主要包括:金属、氧化物和半导体。MOS电容以阵列方式排布在硅衬底上,通过MOS电容器的非稳态CCD得以正常工作。CCD的工作原理主要有:电荷产生、存储以及转移。

在硅衬底上生长一层厚度为d的SiO₂,其上再镀一层薄铝作为栅电极即构成MOS电容的基本结构,如图1所示。给栅极施加合适的偏置电压U_g,利用p-Si衬底较高的电子迁移率,MOS电容器的电压特性随之改变。若栅极不施加电压,MOS表面因为没有电场的作用,其表面载流子浓度同体内相等,MOS本身无电性,各个能带呈平坦状态,如图2a所示,其中E_p为p型半导体的费米能级,E_m为金属的费米能级,E_i为半导体材料的中心能级,E_v为价带顶。当给栅极施加

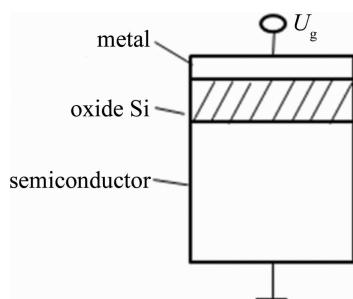


Fig. 1 Basic structure of CCD unit MOS

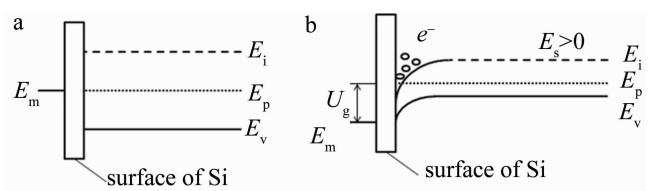


Fig. 2 Changes of energy band structure at the surface of p-type semiconductor
a—energy band diagram at $U_g = 0$ b—energy band diagram at $U_g > 0$

$U_g > 0$ 小电压时,从界面到主栅极末端的电场排斥了衬底上的空隙,即达到多数载流子的“耗尽状态”,此时表面势 $U_s > 0$,如图2b所示,多子体从地表耗尽形成耗尽层。

当外加电压 U_g 达到某个阈值 U_{th} 时,表面处形成电子势阱,在这一点上,MOS电容器可以存储电荷。若再以光照作用CCD表面,MOS电容将产生光生载流子为势阱注入电子-空穴对,电荷包的不断注入使得电势升高,势阱深度则会相应变浅。

图3为三相CCD图像传感器的电荷包转移过程示意图。通过改变CCD电极的电压,电荷包得以传输。电势差使得电荷由高电势流向低电势,直到两极拥有相同数量的电荷。图3中,t₁时刻为初始时间,在电极 ϕ_1 上加上正偏压,其余电极电压为0V,此时电极 ϕ_1 下储存着大量的电荷。一段时间后, ϕ_1 下存储的电荷转移到 ϕ_2 ,电极 ϕ_2 电压升高, ϕ_1 相应降低,其余不变。在t₂时刻下,电极 ϕ_1 电压降到0,电极 ϕ_2 的电压上升为 ϕ_1 的初始值,此时第一势阱内的电荷全部流入第二势阱,从t₂时刻开始, ϕ_2 以相同的方式向 ϕ_3 继续输送电荷,t₃时刻,存储在 ϕ_2 电极下的全部都转移到了 ϕ_3 ,因此 ϕ_3 电极的电势最高, ϕ_1 和 ϕ_2 电势都为0,以此类推,实现了电荷的转移,如图3所示。

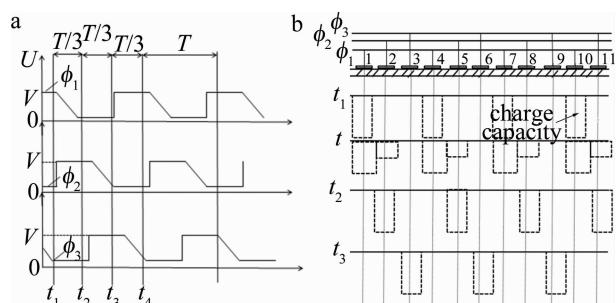


Fig. 3 Charge packet transfer process of three-phase CCD image sensor
a—CCD charge packet transfer potential waveform b—charge capacitance diagram of charge packet transfer

图3a为CCD电荷包转移电势波形图。从图中可以看出三相CCD的时钟波形。相差的周期为T/3,即代表电荷包向右移动一个电极所用的时间。在该周期

中,时钟脉冲由 $t_1 \sim t_4$ 视为一个周期 T 。图 3b 为电荷包转移的电荷容量示意图。对应各个时钟脉冲,势阱中的电荷量在电势差下进行量变,实现了电荷转移。对于 p 型半导体 Si 材料,产生的信号电荷 Q_s 为:

$$Q_s = eSgt_0I \quad (1)$$

式中, t_0 为 CCD 相机的快门时间; $g = \eta(1 - R)/(h\nu)$, R 为 CCD 像元表面的反射率, η 为量子效率, h 为普朗克常数, ν 为入射光的频率; I 为入射光的功率密度; e 为单位电荷量; S 为受光面积。像元的电势会随着信号电荷的增加而逐渐降低,直到表面电势下降到与邻近 MOS 电容的表面势相等时,信号电荷便向邻近势阱转移。此时 MOS 电容串扰电荷阈值 $Q_{s,0}$ 表示为:

$$Q_{s,0} = V_g C_i - S\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_i N_a V_{s,0}} \quad (2)$$

式中, V_g 为像元的栅极电压, C_i 为 MOS 电容, ε_0 为未饱和像元绝缘层的介电常数, ε_i 为饱和像元绝缘层的介电常数, N_a 为半导体材料的受主杂质浓度, $V_{s,0}$ 为半导体与地之间的电压。

此外,光生载流子的产生速率公式如下:

$$v = \frac{I_0 \alpha \eta (1 - R_0) e^{-\alpha x}}{hf} \quad (3)$$

式中, I_0 是入射激光的能量密度, R_0 是 CCD 像元反射率, α 是吸收率, x 为光照后耗尽层深度, f 是激光的频率。由上式可推导出单个 MOS 像元饱和所需时间为:

$$t = \frac{[V_g C_i - (xw)\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_i N_a V_{s,0}}]hf}{I_0 \alpha \eta (1 - R_0) e^{-\alpha x}} \quad (4)$$

式中, w 为 MOS 像元受光区域的底面积。

因此,如果光积分时间过长或者光强度过高,耗尽区的电荷饱和并出现“溢出”现象,则会干扰相邻位置的信号,使图像不清晰,甚至无法区分。

2 激光干扰实验

2.1 实验系统

图 4 所示为实验光路图。实验中所用激光器波长为 1064nm,为近红外半导体连续激光器,连续衰减片实现对激光光强的控制。实验开始前,衰减片应调节到最大衰减以保护实验器材,防止其因激光太强而损坏;实验过程中,衰减片衰减程度由强到弱,用以控制

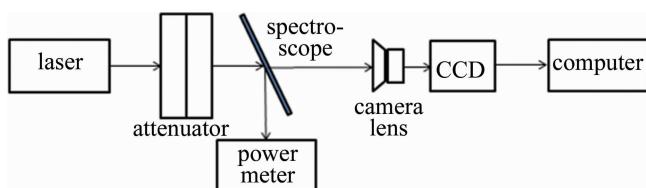


Fig. 4 The schematic diagram of the experimental system

激光辐照 CCD 的能量强度;分光镜将光束分为两束激光,一束用于测量激光能量,另一束辐照 CCD 相机,光路中的分光镜分光比为 1:1,实验环境为暗室,最后通过计算机获取干扰数据。实验中采用 Basler CCD 工业相机,黑白相机型号为: acA640-120gm Basler ace GigE,采用 Sony ICX618ALA 芯片,CCD 相机像素为 659×494 ,每个像素尺寸为 $5.6\mu\text{m} \times 5.6\mu\text{m}$ 。

2.2 实验结果分析

图 5 所示为波长 1064nm 激光干涉黑白 CCD 的输出图像。由于入射激光功率较高,实验一开始便出现串音现象,可观察到,当激光功率为 $162\mu\text{W}$ 时,中心光斑已经饱和,以明亮光斑为中心的矩形区域出现亮度稍弱的规律性 10×15 的亮斑矩阵,亮斑呈轴对称分布,共 10 行、15 列,位置越靠近中心光斑,亮度越高;反之则亮度越低。每列点阵光斑都会有一条同时穿过此列亮斑中心的串扰线,且同样距离中心串扰线越近,亮度越高;当激光功率为 3.43mW 时,亮斑矩阵仍是原来的 10 行、15 列,只是光斑中心和相应位置亮斑及串扰线变得更加明亮,中心光斑直径变大,CCD 中心饱和区域随之变大,串扰线宽度变宽,穿过中心光斑的串扰线相比其它串扰线宽度最宽。随着激光入射功率的增加,CCD 图像探测器受激光干扰的区域随之增加,干扰区域亮度进一步增大,饱和像素点数随之增多。当激光功率为 10.06mW 时,干扰区域纵向进一步增大,干扰区域亮度增加,干扰区域背景信息几乎完全遮盖,饱和区域随之增大,靠近中心光斑的串扰线同中心串扰线合并在一起,其它串扰线仍然继续变宽变亮,且原点阵外侧开始出现新的规律性亮斑和微弱串扰线。当激光功率增大到 45.3mW 时,原矩阵干扰区

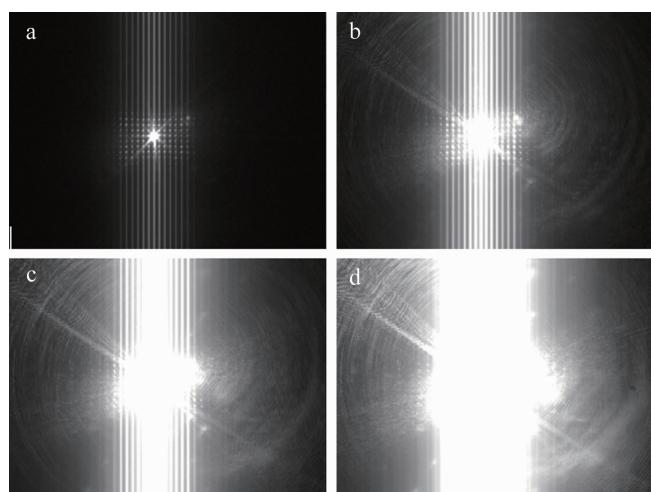


Fig. 5 Laser interference with CCD crosstalk
a— $162\mu\text{W}$ b— 3.43mW c— 10.06mW d— 45.3mW

域完全被光斑和串扰线遮盖,背景信息全无,干扰区域像素全部饱和,原矩阵干扰区域串扰线合并为更宽更亮的矩形干扰区域,新出现的点阵和串音线继续同上述点阵和串音线的变化规律随激光功率的增大而相应变化。

图6所示为1064nm激光功率与干扰光斑面积关系曲线。可以看出,CCD饱和像元数随着激光功率的增大逐渐增多。在激光功率为0.5mW~10mW间,饱和像元数量随激光功率的增长速度较快,此阶段为CCD的线性工作区域。当激光功率大于10mW,饱和像元数随功率的增大缓慢增加,最终趋于平缓,此时CCD全屏饱和。

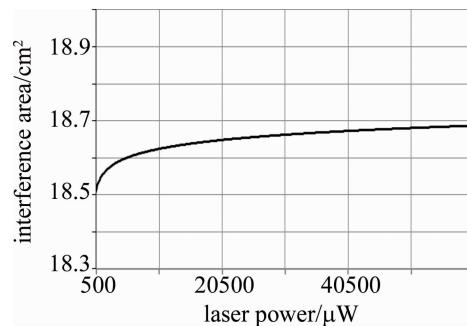


Fig. 6 Curve of relationship between laser power and interference spot area at 1064nm

综上所述,1064nm近红外激光辐照CCD的实验现象如下:激光功率较弱时,干扰区域为矩形规律性点阵,点阵各个亮斑距离中心光斑越近,亮度越高并呈轴对称分布,且出现若干串音干扰线,亮度同亮斑变化规律一致;随着激光功率增加,干扰光斑和串音线亮度相应变大,饱和区域随之增加,光斑和串音线的直径和宽度变大,串音线甚至会从中心串音线向周围一一合并,但是干扰点阵规模变化较小,只有激光功率相对较大时,才会小范围拓宽区域。

CCD结构中,光敏单元是并行排列的方式,垂直方向间的像元用沟阻隔离,光信号积分阶段,势阱中不断聚集光生载流子,对应干扰图像上的明亮光斑,光生载流子积满溢出后干扰到邻近势阱,使得没有激光辐照的区域有载流子的干扰,即干扰光斑直径变大,由于CCD结构中沟阻的制约,载流子在水平方向的溢出速度远小于垂直方向的溢出扩散速度,串音线随之出现,随着激光强度的增加,光生载流子不断增多,继续扩散,渐渐将饱和像元周围的像元填满,就会使得原来干扰区域饱和像元数量增多,干扰区域扩大。

对于1064nm激光干扰实验过程中出现的除中心光斑外的点阵光斑现象,根据点阵光斑分布的周期性

等间距的特性,可以用阿贝-波特成像原理解释,实验光学系统如图7所示。激光视为一束平行光,CCD表面网状结构分布可以看作2维光栅,光束经过相机镜头辐照在CCD表面网状阵列结构上,由于CCD表面覆盖一层微透镜,微透镜作用相当于傅氏镜,能够在其后方焦平面上将物体的频率成分显现出来,若焦平面内置入观察屏,使其处于焦平面上,则可在观察屏上看到周期性网格的傅里叶频谱,即一些衍射斑,而激光光斑则单独成像在像平面1上;若CCD成像面刚好与微透镜的频谱面重合,则激光在CCD成像的光斑便与频谱面上的点阵斑一同显示在像平面2上,最终CCD探测器上成像得到规则亮斑干扰图像,随着光强的增加,每个亮斑同中心光斑一样,当载流子填满势阱后,便会以特定方式溢出,从而产生串音线。

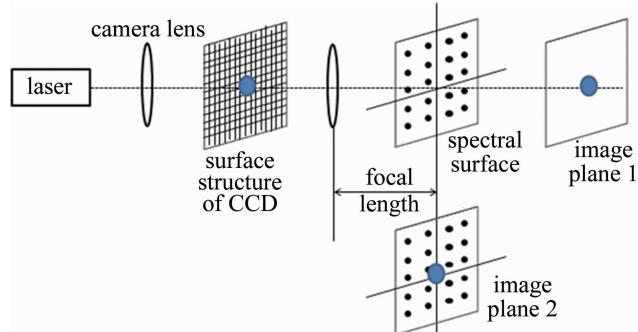


Fig. 7 Abbe-Porter imaging optical system

3 仿真分析

对于CCD像元间电荷的扩散过程,假设有一片紧密排布的“小桶”方阵,小桶形状和容量都相同,外界往中心小桶中不断注入“水滴”,水满则溢往周围小桶。将水滴比作光照,势阱中积累电荷,就如同不断的在“小桶”中聚集“水滴”,电荷在势阱中聚集满后,会向邻近势阱溢流。CCD基本像元结构以及像元间电

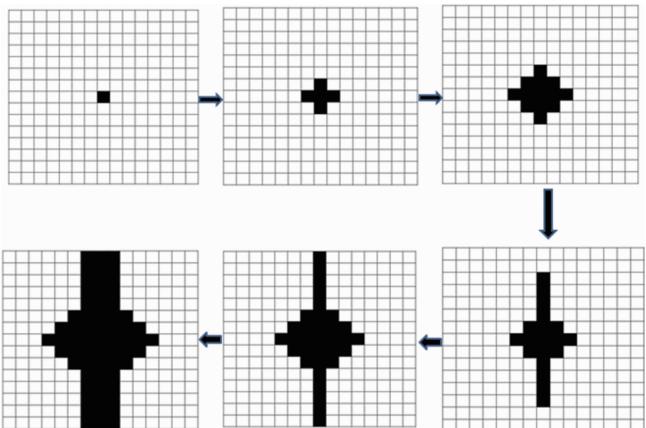


Fig. 8 Photon carrier diffusion model

子溢出方式如图 8 所示。假设激光辐照在 CCD 的一个中心像元上,该像元的光生载流子达到饱和,接着继续产生的载流子向临近的像元溢出,光生载流子填满周围的像元后,饱和的像元又会继续向周围像元溢出载流子,直到产生的载流子全部容纳在像元里,由于 CCD 水平方向沟阻结构的制约,载流子在水平方向的溢出速度远小于垂直方向的溢出扩散速度,所以光强达到一定程度后就会出现穿过光斑中心的垂直串扰线。

当强光辐照探测器后,光子能量超过带隙则实现电子跃迁,产生电荷,电荷可表示为:

$$Q = \eta q P S t' / (\hbar \nu) \quad (5)$$

式中, q 为电子电荷, P 为入射光功率, t' 为光照时间。“水滴”视为光生电荷量,已知电荷量正比于光功率,设定“小桶”盛满水的电荷阈值是 Q_{th} ,“小桶”盛满水后会向邻近“小桶”溢流,根据光生载流子扩散规律,可知饱和像元数满足:

$$N - w_i = 1 + \sum_{i=1}^m (4i) \quad (6)$$

式中, i 为载流子向外扩散的圈数,根据实验中 CCD 相机的像素数, i 取 $0 \sim 274$ 之间的整数, w_i 为 i 圈时的串音线上的饱和像元数。 N 个饱和像元的总电荷数 Q 为:

$$Q = N Q_{th} \quad (7)$$

则推导出一定时间、功率和 CCD 饱和像元数的关系为:

$$N = \eta q S P t' / (\hbar \nu Q_{th}) + w_i \quad (8)$$

基于上述实验现象中在功率较低时,串音线数量和亮度变化较为稳定,通过 MATLAB 统计得到功率小于 $500\mu\text{W}$ 时,串音线上平均饱和像素点数为 110 pixel。根据表 1 中激光器和 CCD 性能结构参数数据,利用 MATLAB 建立 CCD 光生载流子的“水滴”扩散模型,仿真干扰光斑如图 9 所示。

Table 1 Parameters of CCD

parameter	value
η	0.12
h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Q_{th}	$1.12 \times 10^5 \text{ C}$
ν	500Hz
q	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
t'	300s

根据图 8 中光生载流子扩散方式,计算不同功率下的光斑面积来设置初始饱和光斑区域,进而得出不同功率下的干扰情况和饱和像元数。图 9 分别为激光

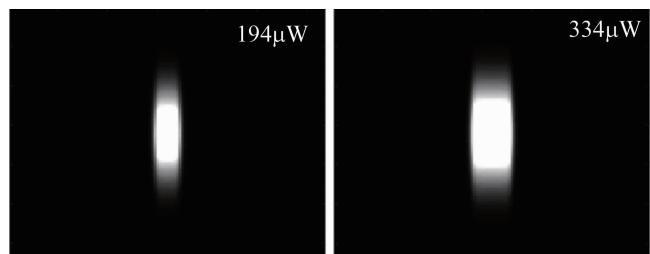


Fig. 9 Simulation of interference phenomena

功率 $194\mu\text{W}$ 和 $334\mu\text{W}$ 的串音仿真图。可以看出,干扰区域中心饱和光斑近似椭圆形,串音线穿过光斑中心,距离中心光斑越远像元饱和程度越低,饱和光斑集中在靠近中心光斑的区域,符合 CCD 结构特性和干扰机理。计算并绘制激光辐照 CCD 表面 300s 时饱和像元数随激光功率的变化曲线,如图 10 所示。

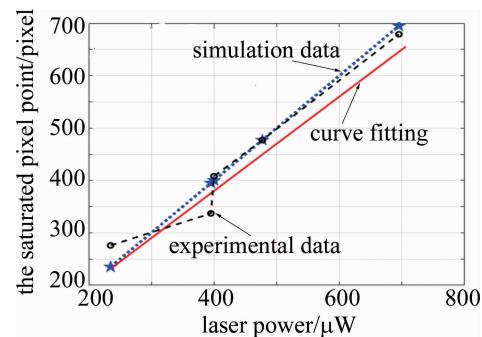


Fig. 10 Comparison of the number of saturated pixels with laser power

由图 10 可知,利用 MATLAB “水滴”模型仿真得出的仿真数据同公式拟合数据以及实验数据均吻合得较好。通过公式拟合、模型仿真以及实验数据的对比,可以将 CCD 光生载流子的扩散过程的理论分析,定量计算以及实际干扰过程紧密结合起来。对于仿真及拟合数据和实验数据的误差,分析为:仿真过程并未考虑实验过程中出现的点阵光斑和旁支串音线对饱和像素点数的影响,仿真过程只针对一个干扰光斑和穿过其中心的一条串扰线,此外,拟合曲线中饱和像素点数的计算中,串音线和光斑重合部分的饱和像元数没有剔除,实际串音线上的饱和像元数小于公式中的,这也造成了拟合与实验数据的误差。整体来说,根据图 10 中饱和像元数随激光功率的变化曲线对比图中仿真结果同实际数据的基本吻合可以证明此方法正确,并具有可靠性。

4 结 论

激光对 CCD 的干扰效应中,利用波长为 1064nm 的近红外连续激光辐照黑白 CCD 相机,获得了黑白 CCD 在不同激光功率下的干扰程度曲线,得出激光功

率越高,干扰光斑半径越大,串音线越宽,相应干扰区域中饱和像元数越多,干扰程度越严重以及饱和像元数量正比于激光功率基本呈线性增长的结论;针对实验中出现的规律性点阵光斑和旁支串音线,分析是光学镜头的傅里叶频谱性质所致;利用相关公式推导得出一般干扰过程的拟合曲线,并最后根据 CCD 基本像元 MOS 电容势阱的特点和载流子溢出方式来对干扰过程进行仿真模拟,仿真结果与实验数据基本相符。

参 考 文 献

- [1] ZHANG T F, ZHANG H X, MENG F, et al. Application of improved Hausdorff distance and quantum genetic algorithm in laser image guidance [J]. Laser Technology, 2016, 40(3) : 320-325 (in Chinese).
- [2] CHU Zh F, WANG D F, WANG J F, et al. A laser seeker jamming strategy based on wave gate decoy [J]. Laser Technology, 2016, 40(6) : 779-781 (in Chinese).
- [3] ZHANG D B, SONG Y H, WANG Q Sh, et al. Error analysis of laser divergence angle measurement [J]. Laser Technology, 2016, 40(6) : 926-929 (in Chinese).
- [4] LI H, WANG Zh M, ZHANG F F, et al. Single-frequency all-solid-state laser technology [J]. Laser Technology, 2016, 40(1) : 141-147 (in Chinese).
- [5] GUO Sh Y, HU X, YAN Zh A, et al. Research development of space-borne lidar in foreign countries [J]. Laser Technology, 2016, 40(5) : 772-778 (in Chinese).
- [6] ZHU Y H, HE F T, PENG X L. Research of characteristics of a laser speckle of plastic optical fiber [J]. Laser Technology, 2016, 40(1) : 122-125 (in Chinese).
- [7] LIANG W W, TAN R, GUO H, et al. Study on laser warning probability curve in different background sunlight [J]. Laser Technology, 2016, 40(6) : 830-833 (in Chinese).
- [8] WU X Y, CUI J Y, ZHENG W, et al. Key technology on high-sensitivity detection in spaceborne laser radars [J]. Laser Technology, 2017, 41(6) : 881-885 (in Chinese).
- [9] LI C, ZHAO P E, PENG T, et al. Technical research of 3-D wind lidar [J]. Laser Technology, 2017, 41(5) : 703-707 (in Chinese).
- [10] ZHANG J H, ZHENG Y Ch, SHANG W D, et al. Research of space-based photon counting laser detection for space debris [J]. Laser Technology, 2017, 41(3) : 312-317 (in Chinese).
- [11] LIN J Y, SHU Zh, HUANG G H, et al. Laser damage threshold for CCD and CMOS image sensors [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(6) : 475-478 (in Chinese).
- [12] WANG X, NIE J S, LI H, et al. Interference experiment of 1064nm high-repetition laser on visible CCD detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(s2) : 387-390 (in Chinese).
- [13] SHENG L, ZHANG Zh, ZHANG J M, et al. Experimental study on a visible light CMOS camera irradiated by 632.8nm CW laser [J]. Modern Applied Physics, 2015, 6(3) : 181-185 (in Chinese).
- [14] WANG J Y, HONG G L, PIAO H Y, et al. Study on airborne scanning lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9) : 2584-2589 (in Chinese).
- [15] SHAO M, ZHANG L, ZHANG L L, et al. Comparative study on saturation effect of 1.06 μ m laser jamming CCD and CMOS cameras [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1) : 163-167 (in Chinese).
- [16] FENG A X, ZHUANG X H, XUE W, et al. Damage characteristics of polysilicon under wavelengths of 1064nm, 532nm and 355nm laser irradiation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2) : 461-465 (in Chinese).
- [17] YU X, LIU G D, ZHANG R Zh. Study on the response characteristics of CCD under the influence of laser thermal effect [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(5) : 41-46 (in Chinese).
- [18] MA X H, LIU Zh Y, ZHANG R Zh. The effect of laser thermal effect on the frequency doubling efficiency of PPLN crystal [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12) : 3302-3306 (in Chinese).
- [19] ZHANG Q Y, CHEN Q Sh, NIU Ch H. Analysis of the interference mechanism of laser thermal effect on CMOS detectors [J]. Laser Journal, 2018, 39(2) : 72-76 (in Chinese).
- [20] ZHANG Ch, ZHANG W, WANG B, et al. Experimental study on the interference of different wavelength lasers on CCD [J]. Laser Technology, 2014, 38(6) : 826-829 (in Chinese).