

行间转移型 CCD 激光干扰效应阈值估算方法

张检民 张震 冯国斌 师宇斌 程德艳 赵军

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 电荷耦合器件(CCD)图像传感应用中,通过非实测手段获取器件的干扰效应阈值非常重要,有时甚至是唯一手段。分析了行间转移型 CCD 单像素饱和与串扰等典型激光干扰效应的影响因素,研究了垂直拖尾、光晕和串扰 3 种效应的物理本质间的内在联系与区别,初步证实垂直拖尾系数对串扰效应而言为非敏感参数。提出了基于饱和和信号电荷量、像元尺寸、量子效率以及光晕抑制率等器件参数,从现有的效应数据预估相似器件单像素饱和阈值、串扰线饱和阈值的外推方法。对柯达面阵 CCD 器件的饱和阈值测量与干扰效应实验显示,预估结果与实验值之间的偏差量分别为 3% 和 20%,属于可以接受的范围,表明预估方法切实可行。

关键词 传感器;激光辐照效应;阈值预估;图像传感器;电荷耦合器件;干扰

中图分类号 TP392; TN215

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0314004

Estimating Method of Jamming Thresholds for Laser Irradiated Interline Transfer CCD

Zhang Jianmin Zhang Zhen Feng Guobin Shi Yubin Cheng Deyan Zhao Jun

*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China*

Abstract It is crucial to acquire the jamming thresholds of the photoelectric devices in charge coupled device (CCD) image sensing applications by nonexperimental means, which is a unique way to obtain the thresholds sometimes. Affecting factors of pixel saturation and crosstalk effects in interline transfer CCD are analyzed briefly. The intrinsic relationship and difference between vertical smear, blooming and crosstalk are studied. Results preliminarily suggest that crosstalk is not sensitive to the fractional amount of smear. An extrapolation method to estimate thresholds of the pixel saturation and crosstalk column saturation effects with image sensor specification and historical data of laser irradiation effects is proposed. Device parameters such as quantity of saturation signal charge, pixel size, quantum efficiency and blooming suppression are used in the estimation. Laser irradiating experiments are carried out to measure the jamming thresholds of two similar Kodak area CCDs. The deviations between the estimation results and the experimental data are 3% and 2%, respectively. The acceptable deviations indicate that the predicting method is feasible.

Key words sensors; laser irradiation effect; threshold estimation; image sensor; charge coupled device; jamming

OCIS codes 140.3460; 140.3330; 130.6010; 040.1520

1 引言

电荷耦合器件(CCD)图像传感器被广泛应用于监视、侦察、制导、遥感、安防和摄像等国防与民用领域,按电荷转移方式可分为帧转移型、行间转移型和帧行间转移型 3 类,其中行间转移型 CCD(IT-CCD)目前应用最多^[1]。灵敏度高、光谱响应宽是 CCD 图像传感器的优点,但亦使得光电成像系统中的 CCD 器件易受到强光

收稿日期: 2014-09-16; 收到修改稿日期: 2014-10-28

基金项目: 国家 863 计划(AA8024026)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1302)

作者简介: 张检民(1982—),男,博士研究生,副研究员,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: zhangjianmin@nint.ac.cn

导师简介: 赵军(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: zhao2k3@sina.com

干扰或破坏^[2]。早在 20 世纪 70 年代,美国就开始研究 CCD 的瞬态响应、串扰等现象^[3],而国内工作起步于 20 世纪 90 年代,包括波段内外连续或脉冲激光对可见光 CCD 的饱和干扰及成像影响等^[4-6]。近年,国内外学者进一步开展了新体制激光与各种器件的相互作用研究^[7],较详尽地解释了串扰效应机理^[8],发现了单侧饱和拖尾等新现象^[9]。

现有文献部分涉及激光对 CCD 的干扰损伤阈值规律^[10-11],但其关注点在于激光体制、波长、光斑形貌等辐照参数或环境条件对特定型号器件效应的影响,鲜见同条件下不同器件间效应阈值规律的比较。实际上,干扰损伤阈值是光束质量分析仪、成像型激光雷达等激光探测应用中不可或缺的数据,亦是激光发射时进行空间安全评估的基础,故在常规的成像器件选型参数之外^[12-13],有必要进行效应阈值分析。很多时候,不同成像系统的任务需求不同,采用的图像传感器相应有区别,完全依靠实验研究获取真实器件的阈值数据既费时又费力,因此常根据文献报道或已有研究结果进行预估。本文在分析 IT-CCD 两种典型激光干扰效应影响因素的基础上,提出一种基于效应数据和器件参数估算相似型号 CCD 图像传感器的单像素饱和与串扰线饱和阈值的外推方法,以实验数据验证了方法的可行性,可为 CCD 应用系统的器件选型和加固措施设计提供有力参考。

2 CCD 激光干扰效应机理及其影响因素

激光干扰对 CCD 造成的信号失真包括杂散光、单像素饱和、串扰线、全屏饱和及过饱和等。单像素饱和属于入射光对像素自身的影响,而串扰线、过饱和等属于受辐照像素对临近像素的影响,但整体而言,干扰效应均由器件内部信号电荷的产生、存储、传输和检测过程决定,其特征数值与传感器参数息息相关。

2.1 单像素饱和效应

单像素饱和是指入射光较强时输出信号不再随光强线性增加甚至停止变化的现象。线性响应区间内,信号电荷量 $Q = q\eta Id^2\tau/h\nu$, 式中 d 为像元尺寸, η 为量子效率, I 为光强, τ 为积分时间, q 为电子电量, $h\nu$ 为光子能量。随着信号电荷的增加,信号势阱的耗尽区变窄,达到一定程度后导致光电转换效率降低,CCD 进入非线性响应区。实用系统常截取线性响应段的绝大部分作为工作区间,故图像灰度饱和时对应的信号电荷量 Q_{Gsat} 与阈值光强 I_{Gsat} 近似满足线性关系

$$I_{\text{Gsat}} = Q_{\text{Gsat}} h\nu / q\eta d^2 \tau. \quad (1)$$

CCD 的饱和信号(电荷)量 Q_{sat} 可从器件手册直接查得或间接求出。真实器件的 Q_{Gsat} 和 Q_{sat} 通常差别不大,例如 Kodak(现 TRUESENSE Imaging)公司 KAI-1020 型 CCD 产品手册^[14]所列相关双采样输出灵敏度为 $13 \mu\text{V}/e^-$,饱和电压为 500 mV,算得电学(图像灰度)饱和信号电荷量为 38.5 ke^- ,非常接近其光学饱和信号电荷量 40 ke^- 。因此,通过饱和信号电荷量、像元尺寸和量子效率等工作参数可分析器件单像素饱和阈值的相对大小。

2.2 串扰效应

串扰效应是指强光照射下 CCD 输出图像中沿器件传输沟道方向出现不同程度的亮线。单像素饱和阈值越高,信号电荷越难从其产生的像素溢出,串扰线越不易出现。串扰效应亦与器件的噪声水平、输出通道数、光晕抑制率和垂直拖尾系数等参数相关。势阱容量相同时,噪声水平越高,越容易产生串扰。输出通道数描述器件读出区域划分,区域内串扰比区域间更容易发生,其他参数相同时,读出通道数越少,串扰越容易发生。光晕抑制率和垂直拖尾系数属于器件保护特性参数,分别衡量器件的光晕抑制能力和拖尾现象严重程度。光晕抑制率指光晕区域达到一定程度(常为光斑大小的两倍)时所需光强与单像素饱和阈值之比,光晕抑制率越小,光斑扩展越容易产生。垂直拖尾系数定义为漏光信号强度与正常信号之比,直观上看,垂直拖尾系数越大,串扰越容易产生。分析认为,噪声水平与读出通道数给串扰阈值带来的差异不显著。

3 典型干扰效应阈值的实验对比研究

3.1 实验方法

以积分球法测量 CCD 灰度光强曲线来确定单像素灰度饱和阈值,装置如图 1 所示。633 nm 氩氦激光由入口 K_1 进入积分球,经匀化后从开口 K_2 、 K_3 射出,开口处分别放置待测 CCD 和监测功率计,同步采集图像和

功率数据;用衰减片与偏振片组调节入口功率,事先标定监测比,据监测值计算感光面光强,以图像灰度均值作为像素灰度。

干扰实验中,将积分球换为成像镜头,增加光楔用于分光监测,系统如图2所示。调焦使像面光斑最小,

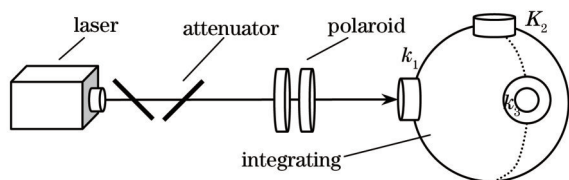


图1 单像素饱和阈值测量示意图

Fig.1 Schema of pixel saturation threshold measuring

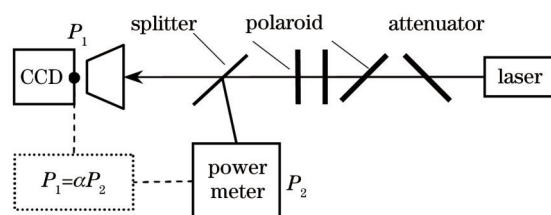


图2 激光干扰实验系统布局

Fig.2 Layout of laser jamming experimental system

在低功率下测量激光光斑,光斑尺寸以ISO标准^[15]的 4σ (二阶矩)方法计算,计算中需注意积分区域选择和噪声处理^[16]。入瞳功率逐步加大,图像依次出现光斑中心饱和、串扰线、全屏饱和以及过饱和等现象。激光作用下的典型串扰现象和作用机理分别如图3、图4所示。串扰线灰度值相同(忽略噪声扰动),且随主光斑增强而变大,直至饱和;串扰线宽度均匀,且一旦形成,无论强弱均贯穿所在子区域。光晕抑制率通过取比值的方式减少了指数的相关参量数目,即消去了像元尺寸、量子效率和饱和信号电荷量的影响,本文借鉴该方法进行阈值分析,将不同效应出现时的光强与单像素饱和阈值之比称为比阈值,并用串扰线灰度饱和时的比阈值(串扰线饱和比阈值)考察不同器件间的串扰效应差异。

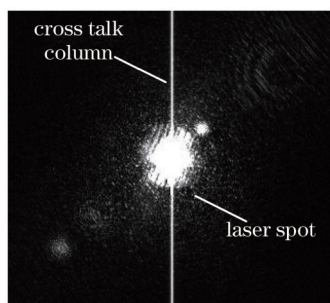


图3 激光辐照下IT-CCD的典型串扰现象

Fig.3 Typical laser induced crosstalk phenomena in IT-CCD

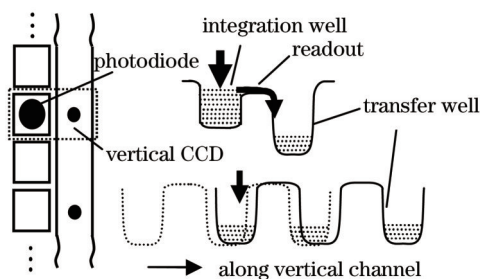


图4 IT-CCD串扰效应成因

Fig.4 Mechanism of crosstalk in IT-CCD

实验对象为Kodak公司KAI-1020和KAI-01050型CCD芯片,此外选取KAI-1010作为对比分析器件。三者品牌相同,型号相近,但饱和信号电荷量、光晕抑制率和垂直拖尾系数等有一定差异,如表1所示。

表1 三种Kodak IT-CCD器件参数列表

Table 1 Parameters list of the three kinds of Kodak IT-CCDs

Parameter	Value		
	KAI-1010 ^[17]	KAI-1020 ^[14]	KAI-01050 ^[18]
Number of active pixels	1008(H)×1008(V)	1000(H)×1000(V)	1024(H)×1024(V)
Pixel size	9.0 μm×9.0 μm	7.4 μm×7.4 μm	5.5 μm×5.5 μm
Saturation signal / ke ⁻	> 50	40	20
Dark noise / e ⁻	50	40	7/12 (40 MHz)
Quantum efficiency	37%@500 nm; 26%@632 nm	44%@500 nm; 29%@632 nm	50%@500 nm; 34%@632 nm
Number of outputs	1, 2	1, 2	1, 2, 4
Blooming suppression	> 100×	~100×	> 300×
Vertical smear /dB	-80	-75	-100

灰度饱和阈值与积分时间成反比,实验中两种芯片的曝光时间均为8 ms,成像镜头和挡位一致,以保证图像传感器上光斑分布及内部电荷积累时间一致。测得两种芯片上光斑直径分别为16.5 μm(~2 px)和17.8 μm(~3 px),数据处理均基于该光斑尺寸进行。

3.2 实验结果与分析

测得 633 nm 激光作用下 KAI-1020 和 KAI-01050 CCD 的灰度光强曲线如图 5 所示,对线性响应区进行拟合并外推求得两者的饱和阈值分别为 9.7 W/cm^2 和 $8.2 \mu\text{W/cm}^2$,前者为后者的 1.18 倍。分析可知不同器件的饱和阈值之比近似为 $Q_{\text{sat}1}\eta_2d_2^2/Q_{\text{sat}2}\eta_1d_1^2$,由表 1 参数可得饱和阈值之比为 1.29。数据差异的主要原因在于器件数模转换上限电荷量与饱和信号电荷数不严格成比例,且标称数据为典型值,实际器件存在个体差异。

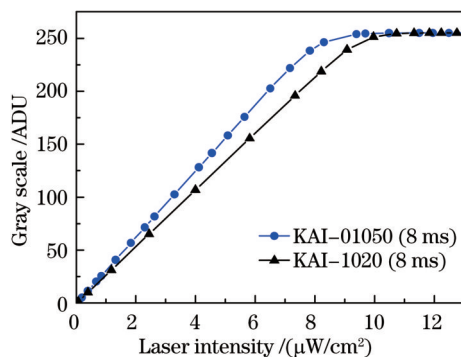


图 5 两种 CCD 的实测灰度光强曲线

Fig.5 Gray value versus laser intensity of the two CCDs

实测串扰线灰度与平均光强关系曲线如图 6 所示,KAI-1020 串扰线灰度饱和阈值位于区间 $[4.4, 4.6] \text{ W/cm}^2$,而 KAI-01050 CCD 位于区间 $[8.6, 9.6] \text{ W/cm}^2$ 。以区间中值计算两者的串扰线饱和比阈值得 4.7×10^5 和 11.1×10^5 ,后者约为前者的 2.4 倍。此外,据文献所给干扰效应数据^[9]算得 Sony ICX405AL 型 CCD 串扰线饱和比阈值为 6.2×10^4 ,该值与本文实验结果具有可比性,差异主要源自器件特性参数和工作状态。

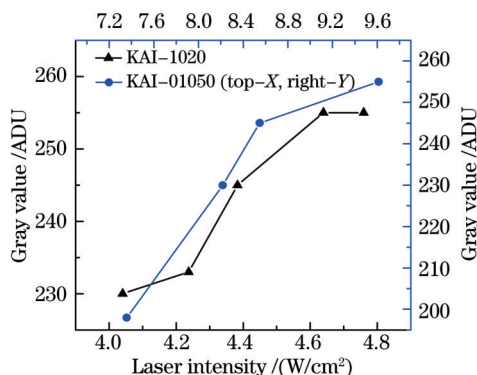


图 6 KAI-1020 和 KAI-01050 型 CCD 串扰线灰度光强曲线

Fig.6 Gray value versus crosstalk column laser intensity of KAI-1020 and KAI-01050 CCDs

4 两种典型干扰效应阈值估算方法讨论

4.1 单像素饱和效应

前文显示单像素饱和阈值的预估结果与实验值偏差不大,此处进一步使用 KAI-1010 器件手册^[17]提供的 550 nm 饱和阈值进行方法验证。550 nm 处量子效率为 34%,通过衬底电压 V_{SUB} 将饱和输出电压 V_{sat} 控制在 350 mV 时的饱和阈值为 $0.037 \mu\text{J/cm}^2$ 。器件输出灵敏度为 $11.5 \mu\text{V/e}^-$,求得饱和信号电荷量为 30.4ke^- 。由两个实验对象测试结果估算 KAI-1010 的单像素饱和阈值分别为 $4.3 \mu\text{W/cm}^2$ 和 $4.7 \mu\text{W/cm}^2$,计入积分时间(8 ms)得能量密度阈值均值为 $0.036 \mu\text{J/cm}^2$,比手册所列测试数据之间的偏差低 3%。

如此可认为,基于器件像元尺寸、量子效率以及饱和信号电荷量预估未知器件单像素饱和阈值的方法切实可行。像元尺寸较易获取,不同波长的量子效率可通过光谱响应曲线查得。饱和信号电荷量获取相对复杂,部分器件手册直接给出数据,有时候则需要通过其他参数间接推算,典型方法有两种,分别为噪声电荷乘以动态范围、饱和信号电压除以输出放大器灵敏度。

4.2 串扰线饱和效应

为了分析串扰效应与垂直拖尾系数和光晕抑制率的关系,对垂直拖尾、光晕和串扰3种效应的物理本质进行对比,观察其内在联系与区别。如图4所示,IT-CCD感光单元产生并收集信号电荷,并通过读出转移动作进入传输单元——垂直CCD(VCCD);读出转移之后,感光单元继续积分形成新信号,同时,VCCD将已读出信号通过垂直转移动作依次传出。强光作用下二极管光电转换形成的大量电荷迅速填满感光单元的积分势阱,之后溢出进入VCCD的传输势阱,其他像素的信号经过该像素传输势阱时获得溢出电荷,产生串扰效应。垂直拖尾是CCD的特有噪声,典型现象如图7(a)所示^[20],也是因附加电荷与VCCD中传输的信号电荷叠加所致。附加电荷产生机制如图7(b)所示,包括非有效区域的光电转换(①),遮光金属膜边缘多次反射或衍射漏光(②)以及直射透光(④),扩散电流(③)等^[1]。串扰与拖尾现象相似,内在区别在于叠加到传输电荷中的附加电荷成因。拖尾在任意光强下都会存在,但串扰仅在单像素饱和后出现。

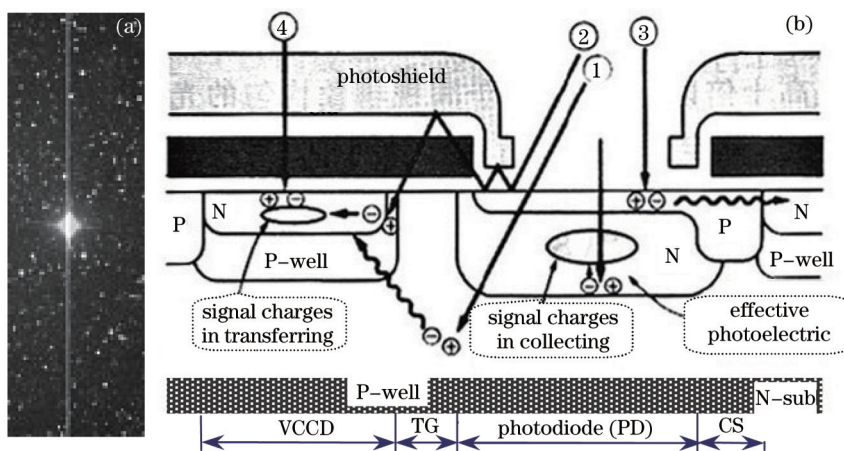


图7 (a) IT CCD拖尾现象;(b)产生机制

Fig.7 (a) Phenomena of smear in IT-CCD; (b) mechanism

更强入射光作用下,光电二极管为VCCD提供的电荷数量超出了它可操作的电荷量,电荷将从该像素的VCCD再次溢出到临近像素,形成光晕。光晕水平和垂直两个方向均会出现,典型画面如图8(a)所示^[21]。通过增加垂直溢出漏极(VOD)结构[如图8(b)所示],将过剩的信号电荷导入N型层基底,可在一定程度上抑制过剩电荷在VCCD中溢出,降低光晕发生的可能性。VCCD可操作的电荷容量 Q_v 满足^[22]:

$$Q_v \geq Q_{PD} + Q_{knee} + Q_{smr} + Q_{margin} \quad (2)$$

式中 Q_{PD} 为二极管饱和信号电荷量, Q_{knee} 为Knee特性电荷量, Q_{smr} 为漏光电荷量, Q_{margin} 为预留空间,以包容器件工艺差异带来的电荷量波动(如实际的二极管饱和信号量与设计值之间存在一定的随机误差

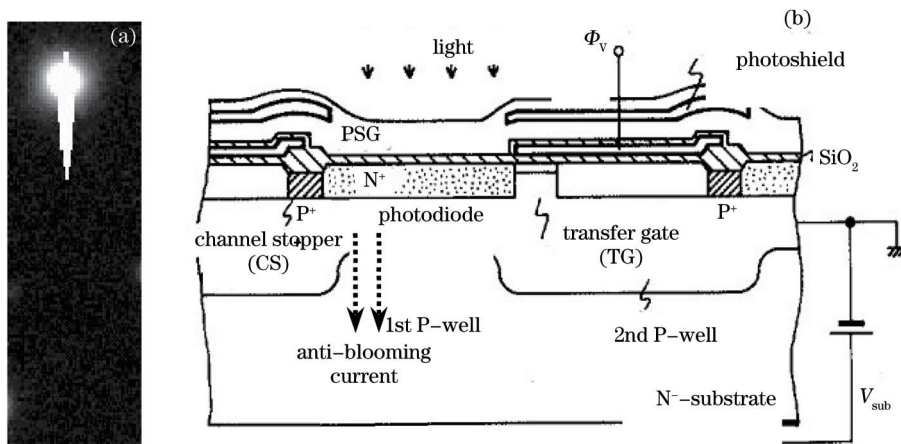


图8 (a) IT-CCD光晕现象;(b)纵向抗晕结构

Fig.8 (a) Blooming in IT-CCD; (b) vertical overflow drain

ΔQ_{PD})。入射光不太强时,感光区超出 Q_{PD} 的过量电荷开始导入衬底;入射光非常强时,因电荷导出速率存在上限,感光区传递给 VCCD 的电荷总量总会大于 VCCD 的容量,电荷自 VCCD 溢出到相邻像素,该像素的 VCCD 填满后,则继续依次向外扩展。在垂直方向上相邻的两个 VCCD 之间存在传输栅极(TG),在 VCCD 和水平方向相邻的像素之间存在沟阻(CS),且沟阻势垒常高于传输栅,故光晕更容易在垂直方向发生。光晕现象与串扰效应均因积分电荷自感光区溢出到垂直沟道所致,但光晕在垂直沟道传输势阱被填满后发生。器件设计中,VCCD 的电荷容量常高出感光区电荷容量较多,如 KAI-1020 CCD 中两者的数值分别为 $60 ke^-$ 和 $40 ke^-$ 。如此可见,一个垂直转移脉冲周期内,VCCD 的传输势阱被填满前,经过该像素传输势阱的电荷包必然已经超过 CCD 的饱和信号电荷量,即光晕只会在均匀串扰线饱和之后发生。文献[8]曾将与光晕形成机理相同的干扰现象称为第二类串扰,并将本文考察的纵向均匀串扰线称为第一类串扰,此外,亦有研究人员将拖尾效应归结到串扰之中^[19],但本文对三者进行了区分。

垂直拖尾系数在标准条件下测得,即测试光源高度为 1/10 视场。拖尾信号强度与测试光源大小成正比,将激光光斑大小与标准测试光源尺寸进行对比修正,求得前述实验条件下 KAI-01050 和 ICX405AL 的激光拖尾信号饱和比阈值分别为 1.7×10^7 和 4.5×10^6 。两者均远高于实测的串扰线饱和比阈值,可见,拖尾现象并不会显著影响串扰线的强度。

光晕抑制率直观表征的是光晕纵向区域达到光斑大小两倍时入射光强与单像素饱和阈值之比。由光晕的形成原理可知,光晕主要受抗晕结构 VOD 的过量电荷导流能力和垂直传输势阱的电荷溢出难度影响,且后者主要由传输栅极的势垒高度决定。相似器件的传输栅极势垒相近,则垂直势阱电荷溢出难度可近似认为相同,此时不同器件的光晕抑制率的差异主要由 VOD 的导流能力决定。VOD 的导流能力强,则电荷不易从感光区溢出到 VCCD。前面已经论述,串扰线的形成源于垂直转移周期内感光区的电荷溢出,故串扰线饱和比阈值的相对大小可用光晕抑制率估计。KAI-1020 和 KAI-01050 CCD 的光晕抑制率分别为“ $\sim 100 \times$ ”和“ $> 300 \times$ ”,推算其串扰线饱和比阈值之比约为 1:3。实测结果 1:2.4 与估算值相近,偏差约为 20%。分析认为原因在于,不同真实器件的 VCCD 电荷溢出能力并非完全一致,同种器件亦存在个体差异,手册所列数据仅为典型值。

5 结 论

从 CCD 图像传感器光电响应原理出发,分析了基于器件像元尺寸、量子效率以及饱和信号电荷量 3 个基本工作参数从已知器件的测量数据预估相似器件单像素饱和阈值的方法的可行性,并用实测数据对方法进行了验证。从拖尾、串扰、光晕 3 种现象产生原因出发,分析了垂直拖尾系数和光晕抑制率的物理内涵,以实验数据证明,垂直拖尾系数在串扰线饱和阈值对比分析中不属于敏感参数,而光晕抑制率可用于比较不同器件的串扰现象发生的难易程度,若与饱和像素阈值预估结果结合,则可由已知器件的串扰线饱和比阈值预估其他相似器件的效应阈值。虽然该方法得到预估结果与实验结果存在一定偏差,但在很多应用场合中,该偏差属于可接受的范围。

参 考 文 献

- 1 Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS Image Sensor no Kiso to Ouyou [M]. Beijing: Science Press, 2006.
米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 2 Gao Liuzheng, Shao Zhengzheng, Zhu Zhiwu, *et al.*. Thermal damage mechanism on CCD detector irradiated by pulsed laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s103001.
高刘正, 邵铮铮, 朱志武, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的热损伤机理[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s103001.
- 3 Chin-Tang San, Horng-Sen Fu. Transient response of MOS capacitors under localized photoexcitation [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1974, 21(3): 202-209.
- 4 Xu Xiaojun, Zeng Jiaolong, Lu Qisheng, *et al.*. Study on influence to the quality of array CCD camera's image formation under irradiation of CW YAG laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(1): 36-39.
许晓军, 曾交龙, 陆启生, 等. 连续波 YAG 激光辐照对面阵 CCD 探测器成像质量影响的研究[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 36-39.

- 5 Wang Shiyong. Study on Laser-induced CCD Detector Vulnerability and Survivability and Fussy Synthetic Evaluation on CCD Jamming Effects [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.
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: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- 6 Chen Dezhang, Qing Guangbi, Zhang Chengquan, *et al.*. Saturated effect of CCD sensor resulted from laser illumination [J]. *Laser Technology*, 1997, 21(3): 146-148.
陈德章, 卿光弼, 张承铨, 等. 激光对 CCD 固体摄像器的饱和和干扰效应[J]. *激光技术*, 1997, 21(3): 146-148.
- 7 Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu XiQuan, *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1783-1786.
郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉, 等. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1783-1786.
- 8 Zhang Zhen. Laser-Induced Dazzling Phenomena in Visible Light CCD and Their Mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
张震. 可见光 CCD 的激光致眩现象与机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- 9 Zhang Zhen, Zhou Menglian, Zhang Jianmin, *et al.*. Entirely saturated unilateral smear of laser spot in CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(6): 1351-1353.
张震, 周孟莲, 张检民, 等. CCD 中激光光斑的全饱和和单侧拖尾现象[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(6): 1351-1353.
- 10 Lei Wei, Wang Haiyan, Niu Chong. Study on CCD detector's saturation irradiated by pulse laser [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(9): 65-68.
雷威, 王海晏, 牛翀. 脉冲激光辐照 CCD 探测器饱和阈值分析[J]. *电光与控制*, 2010, 17(9): 65-68.
- 11 Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua, *et al.*. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(6): 475-478.
林均仰, 舒嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 475-478.
- 12 Yu Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al.*. Screening and testing method for area CCD [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708001.
余达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708001.
- 13 Ma Jun, Xiao Xizhong, Lang Junwei, *et al.*. Study on selection of CCD detector of space-borne hyper-spectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1011001.
马骏, 肖喜中, 郎均慰, 等. 航空推扫高光谱成像仪 CCD 探测器选型研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1011001.
- 14 TRUESENSE Imaging. KAI-1020 image sensor, device performance specification[EB/OL]. (2012-06-22)[2013-01-04]. <http://www.truesenseimaging.com/all/download/file?fid=8.27>.
- 15 International Organization for Standardization. ISO/DIS 11145 Optics and photonics—Lasers and laser-related equipment—Vocabulary and Symbols ISO/DIS 11145[S]. 2006.
- 16 Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Factors affecting the accurate measurement of laser beam width with CCD camera [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0208002.
王艳萍, 王茜茜, 马冲. 影响基于 CCD 相机激光光束宽度精确测量的因素[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0208002.
- 17 TRUESENSE Imaging. KAI-1010 image sensor, device performance specification [EB/OL]. (2012-07-13)[2013-01-04]. <http://www.truesenseimaging.com/all/download/file?fid=8.27>.
- 18 TRUESENSE Imaging. KAI-01050 image sensor, device performance specification [EB/OL]. (2012-11-16)[2013-01-04]. <http://www.truesenseimaging.com/all/download/file?fid=8.27>.
- 19 Luo Qun. Study of Disturb Effect to Array CCD Detectors Irradiated by Broadband Source [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
罗群. 宽光谱光源对可见光 CCD 的干扰效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- 20 Sun Jinqiu, Zhou Jun. A novel method for smearing intensity estimation and elimination [C]. *LNCs2012*, 2012, 7202: 466-472
Springer Berlin Heidelberg, 2012: 7202, 466-472.
- 21 University CCD. Blooming vs. Anti-Blooming [EB/OL]. (2014-08-27) [2014-10-27]. <http://www.ccd.com/ccd102.html>.
- 22 A Tanabe, Y Kudoh, K Kawakami, *et al.*. Dynamic range improvement by narrow-channel effect suppression and smear reduction technologies in small pixel IT-CCD image sensors [J]. *IEEE Trans Electron Devices*. 2000, 47(9): 1700-1706.

栏目编辑: 张雁