

文章编号: 1001-3806(2010)05-0643-04

532nm 激光对面阵和线阵 CCD 损伤效应实验研究

廖海¹, 孙年春^{1*}, 冯国英¹, 周传明²

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 科技委, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究面阵 CCD 和线阵 CCD 由结构差异所致激光损伤效应的区别, 针对这两种类型 CCD 器件进行了机理分析和对比实验研究。分别测量出波长为 532nm 的激光对线阵 CCD 和面阵 CCD 图像传感器的光饱和和串音阈值、所有像素串音阈值和硬损伤阈值。结果表明, 面阵 CCD 的光饱和和串音阈值和永久破坏阈值比线阵 CCD 低, 而串音扩散到所有像素的阈值高于后者。反映出线阵 CCD 由于其 1 维结构更能抵抗激光的干扰和破坏, 而面阵 CCD 在抵御饱和和串音在像素间扩散上比线阵 CCD 有优势。

关键词: 激光技术; 损伤阈值; 饱和和串音; 面阵 CCD; 线阵 CCD

中图分类号: TN977 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.018

Experimental study on 532nm laser-induced failure of array and linear CCD

LIAO Hai¹, SUN Nian-chun¹, FENG Guo-ying¹, ZHOU Chuan-ming²

(1. College of Electronics and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Science and Technology Commission, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The mechanism of damage on the linear CCD and array CCD was analyzed. Under the irradiation of 532nm laser, the crosstalk threshold, all-pixel crosstalk threshold and totally damaged threshold of both the types of CCDs were measured. Experimental results show that the crosstalk threshold and permanent damage threshold of array CCD are higher than those of linear CCD, while the all-pixel crosstalk threshold of array CCD is lower. This reflects the linear CCD is more resistant to laser interference and sabotage due to its one-dimension structure, while the array CCD is better at resisting the spread of crosstalk between pixels.

Key words: laser technique; damage threshold; saturation crosstalk; array CCD; linear CCD

引言

电荷耦合器件 CCD 以其输出信噪比高、动态范围宽、功耗小等优点, 现已被大规模应用在民用和军用成像领域^[1]。随着 CCD 应用领域的不断拓宽, 强激光对 CCD 器件的损伤效应也成为了一项重要的研究课题。国内外学者已对 CCD 的损伤效应进行了一系列研究, 在这些研究当中, 对 CCD 的选型多种多样, 主要可归类于线阵^[2]和面阵^[3] CCD 两种类型。这两种 CCD 器件由其结构上的差异, 决定了其损伤阈值应有所区别, 研究这两种类型 CCD 的损伤情况, 有助于更好地理解 and 比较分析现有损伤研究的数据。作者选用了普通 CCD 光谱响应曲线最敏感的区域中的波长——532nm 来进行研究, 以便结合成像情况进行分析。

1 激光照射 CCD 的损伤现象和机理

激光对 CCD 的效应主要分为软损伤和硬损伤两种类型^[4]。一般认为, 软损伤主要表现在光电材料或器件的功能性退化或暂时失效, 减弱光照后, 软损伤造成的影响可恢复正常。所谓硬损伤是指永久性破坏, 器件无信号输出, 器件中关键部分的热熔融、龟裂、断裂、击穿等, 撤去光照后, 器件无法恢复正常^[5]。

CCD 从饱和到损伤经历的几个重要阶段分别为: 饱和、光饱和和串音(光斑未覆盖的像素也开始有信号输出)、串音扩散到所有像素上、硬损伤(机能失效)。本文中着重研究后 3 个阶段。

线阵 CCD 和面阵 CCD 的像元结构相同, 电荷转移方式有区别, 面阵 CCD 比线阵 CCD 相比, 像元排列为 2 维结构, 并多出了水平移位寄存器, 如图 1 和图 2 所示。

激光对 CCD 的软损伤主要和其像元的电荷容量与位置排布有关。任何一个 CCD 像元都可等效于一个电容, 可以用如下方程来表示其参量间的关系^[6]:

作者简介: 廖海(1985-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光与物质相互作用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 8178137@163.com

收稿日期: 2009-09-18; 收到修改稿日期: 2009-10-23

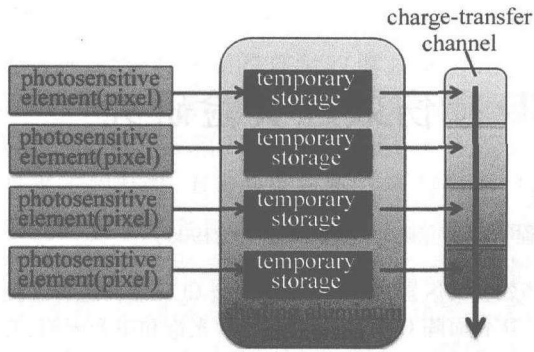


Fig. 1 Charge transfer of linear CCD

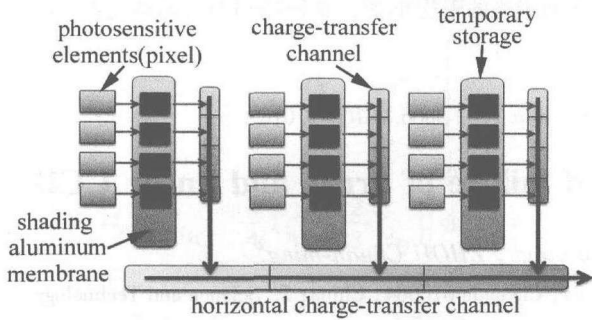


Fig. 2 Charge transfer of array CCD (interline-transfer-CCD)

$$V_{Si} = V_g - V_{fb} - \frac{1}{C_i} \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{Si}qN_a(V_g - V_{fb})} \quad (1)$$

式中, V_{Si} 为 Si 表面电势, V_g 为外加偏置电压, V_{fb} 为修正电压, $C_i = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{Si}}{d_i}$ 为 P-N 结单位面积氧化层电容, ε_0 为真空介电常数, ε_{Si} 为 Si 介电常数, N_a 为掺杂浓度, q 为电容实际储存的电荷量。

由(1)式推导, CCD 光敏元的电荷存储量可由下式求得:

$$Q_{Si} = C_i \cdot V_g \cdot A \quad (2)$$

式中, A 为电容栅电极尺寸。由(2)式可见, 在偏置电压和像元结构确定的情况下, 每像元中势阱所能容纳的光生电荷数是一定的。当光强较大的激光照射到 CCD 的局部时, 光生电荷超过了像元势阱容量, 便向邻近势阱发生“溢流”现象^[7]。溢出的电荷对邻近的像元造成干扰, 表现在成像上即为未受光照的像素也开始有示数。线阵 CCD 的溢流较为简单, 向左、右方像素溢流; 而面阵 CCD 对上下左右 4 个方向的像元都可能有溢流影响。

而激光对 CCD 的硬损伤与遮光铝膜熔融有关。光入射到物质表面后, 未被反射的部分则穿透到物质中, 当激光脉宽大于 10ps 时, 主要转化为晶格的热^[8]。对金属材料, 定义穿透深度为 d , 则可用下式表达穿透深度和其它物理参量的关系^[9]:

$$d = \sqrt{\frac{\lambda_0}{4\pi\sigma\mu}} \quad (3)$$

式中, λ_0 为入射光在真空中的波长, σ 为介质电导率,

μ 为磁导率, c 为光速。

将铝的相关系数代入后计算可得, 532nm 激光在遮光铝膜中的穿透深度约为 1.77nm, 而通常 CCD 中遮光铝膜的镀膜厚度为 800nm ~ 1200nm 之间, 可知在转移区绝大部分光辐射都被遮光铝膜阻挡, 所以当光强较大时, 遮光铝膜会最先被破坏, 造成漏光, 导致 CCD 的硬损伤。

另外, 相较于 CCD 光敏像元(顶部为主要成分为 SiO_2 , 下部光电二极管主要为 Si), 铝具有低得多的熔点。Al 的熔点为 658.7℃, 而 Si 为 1412℃, SiO_2 为 1607℃^[10]。可见, 铝薄膜熔融是 CCD 开始出现物理性硬损伤的最可能原因。

2 面阵 CCD 和线阵 CCD 的激光损伤实验

2.1 实验系统组成

实验系统构成如图 3 所示, 光从激光器(波长

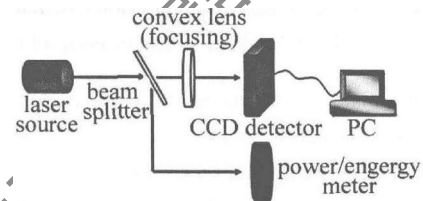


Fig. 3 Schematic diagram of the experiment setup

532nm, 重复频率 1.4kHz, 脉宽 12ns) 射出, 经分光片分光后, 其中一束光经凸透镜聚焦后照射在 CCD 上, 面阵 CCD 连接至电视监视器, 线阵 CCD 连接至电脑。面阵 CCD 采用的是 SONY 公司的 SUPER HAD DSP CCD (像元面积 $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$, 积分时间 10ms), 线阵 CCD 采用东芝公司的 TCD1200 (像元面积 $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$, 积分时间 10ms)。另一束光照射在功率能量计探头上, 用以实时测量和调整激光输出功率。根据分光片的分光比, 可以计算出照射在 CCD 上的实际光功率。

2.2 实验结果与分析

首先将激光调到较小功率, 然后调整 CCD 位置, 使其处在焦点处。通过对 CCD 的成像截图分析照亮部分的像素数, 再由每像素面积参量可算出光斑大小。

将激光功率缓慢调大, 并观察面阵 CCD 的成像情况和线阵 CCD 在电脑上的示数情况。当刚出现饱和串音时(光斑未照射到的像素开始出现明显示数), 记录下功率数值。然后继续调大激光功率, 观察到串音扩散到所有像素时, 记录下功率数值。最后, CCD 突然出现无输出情况, 且遮光后无法恢复时, 记录下功率数值。

图 4 为面阵 CCD 在不同强度 532nm 激光照射下的成像图。图 4a 为光斑正常成像图; 图 4b 中刚出现了光饱和串音, 串音向垂直方向扩散的现象正源于面

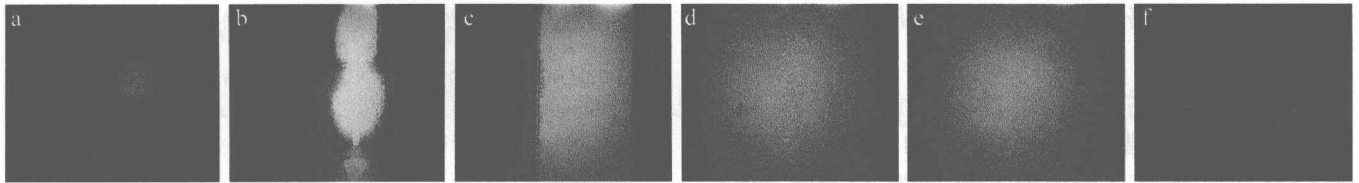


Fig. 4 The images of array CCD under different power levels of 532nm laser

a—saturated (to determine spot size) b—cross-talk appeared c—snowflake-like image d—a wide range of cross-talk appeared e—all pixel cross-talk f—permanent damage

阵 CCD 像元垂直分列排布的结构。但观察到串音并非均匀扩散。继续加大功率,在图 4c 中出现了满屏飘动的雪花现象,而水平方向的电荷是由水平移位寄存器转移的(见图 2),可以推测这时水平移位寄存器也开始出现电荷饱和溢出。图 4d 中串音继续扩大,接近填满屏幕,雪花飘动现象也越加严重;到功率加大到一定阈值时,所有像素全部饱和的情况见图 4e。图 4f 中,最后随着功率的增大,到某一时刻 CCD 突然无图像输出,并且无法恢复,此时判定 CCD 已出现硬损伤。

图 5 为线阵 CCD 在不同强度 532nm 激光照射下的示数图,横坐标为 CCD 像素,纵坐标为相对光强示数。图 5a 中 CCD 出现饱和和串音;由图 5b 可见,串音继续扩大,且在左部出现了不均匀串音现象;图 5c 中已接近全部串音饱和;图 5d 中所有像素的光强示数都为最大值,即串音到所有像素;图 5e 为出现破坏前最后一帧示数,可见右部已经出现不正常示数,且左部光强值突然回落,这可能与布线电路被烧蚀有关;而后 CCD 出现完全无输出情况。

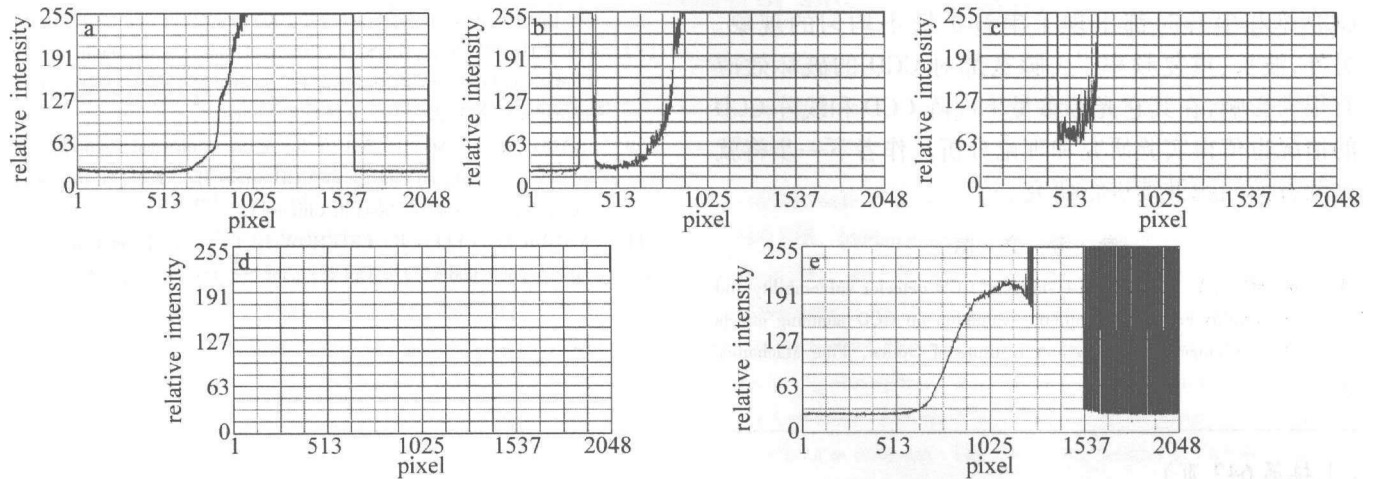


Fig. 5 Output of linear CCD under different power levels of 532nm laser, abscissa for the pixel location, the vertical axis for the relative light intensity(0~255)
a—cross-talk appeared b—a wide range of cross-talk c—nearly all pixel cross-talk d—all pixel cross-talk e—permanent damage

Table 1 Damage threshold of array CCD and linear CCD

	array CCD		linear CCD	
	average power density/ (mW · cm ⁻²)	energy density/ (mJ · cm ⁻²)	average power density/ (mW · cm ⁻²)	energy density/ (mJ · cm ⁻²)
cross-talk	8. 198	5. 856 × 10 ⁻³	11. 10	7. 932 × 10 ⁻³
all pixel cross-talk	1. 355 × 10 ⁴	9. 676	489. 0	0. 3493
permanent damage	8. 677 × 10 ⁴	61. 98	3. 747 × 10 ⁵	267. 6
spot size/cm ²			3. 44 × 10 ⁻³	

从表 1 可以看出,线阵 CCD 出现光饱和和串音的阈值要比面阵 CCD 稍高,而对于所有像素都饱和和串音的阈值,线阵 CCD 比面阵 CCD 低了 27 倍左右。线阵 CCD 由于只有 1 维结构,所以,溢出电子更容易向左右扩散至整条线全部溢满;而面阵 CCD 是 2 维结构,可看作是许多个竖直排列的线阵 CCD 组成,而光斑集中于中心区域,所以,离光斑较远的边缘区域溢出电子较不容易转移到。

而比较硬损伤阈值可以发现,线阵 CCD 比面阵 CCD 的阈值高 4 倍左右,这说明线阵 CCD 对强光破坏的良好抵抗能力。对线阵 CCD 而言,其 1 维结构决定了热量在像元排布的方向有堆积和扩散,但在垂直于像元阵列的方向上由于没有像元,所以热量较易直接散发出来。而面阵 CCD 热量较易堆积在激光照射的光斑处,四周都有像元排列,热量较难散发出来。热量堆积到一定程度,将转移区的遮光铝膜熔融后,或者烧

蚀了布线区的电路, CCD 便完全失效并永久破坏。

3 结论

比较 CCD 光谱响应最敏感波长的 532nm 激光对线阵 CCD 和面阵 CCD 的照射发现, 面阵 CCD ($5.856 \times 10^{-3} \text{ mJ/cm}^2$) 比线阵 CCD ($4.374 \times 10^{-3} \text{ mJ/cm}^2$) 的光饱和和串音阈值更低, 意味着面阵 CCD 最先饱和串音; 而前者的饱和串音扩散到所有像素上的阈值反而高于后者, 这说明线阵 CCD 更容易将串音扩散到所有像素; 而面阵 CCD 的永久破坏阈值 (61.98 mJ/cm^2) 比线阵 CCD (267.6 mJ/cm^2) 低 4 倍左右。这说明面阵 CCD 更容易遭到激光的硬破坏。

必须说明的是, 本次实验中选用的两款 CCD 虽具有一定代表性, 但由于每款 CCD 的参量各不相同, 故此实验结果对其他型号和种类的 CCD 仅提供参考。

在本次实验中, 还观察到了在线阵 CCD 和面阵 CCD 饱和串音时都出现了串音扩散不均匀的现象。另外, 波长、重复频率^[11]、脉宽都对 CCD 的破坏效应有很大影响, 在其它光源参量下面阵 CCD 和线阵 CCD 的情况也值得实验研究和理论分析。作者下一步将就这两方面问题继续进行研究。

参考文献

- [1] WANG Sh Y. 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, Sciences, 2002: 13-14 (in Chinese).
- [2] JIANG J J, LUO F, CHEN J G. Research on femtosecond laser induced damage to CCD [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 515-517 (in Chinese).
- [3] GUO Sh F, CHENG X A, FU X Q, *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 (in Chinese).
- [4] ZHONG H R, LIU T H, LU Q Sh, *et al.* Analysis of threshold of laser damage in photoelectric detectors [J]. Laser Journal, 2001, 22(4): 1-5 (in Chinese).
- [5] ZHONG H R, LU Q Sh, WEN T F, *et al.* Review on the laser-induced damage mechanism of CCD detector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(4): 537-542 (in Chinese).
- [6] CAI W G, LI Y Y, XU Zh H. Technology and application of CCD [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000: 4-5 (in Chinese).
- [7] WANG Sh Y, FU Y Y, GUO J. Study of disturbing effect on array CCD detectors irradiated locally by laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(2): 106-135 (in Chinese).
- [8] YOU M. Interaction of femtosecond laser pulses with transparent materials [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 35-40 (in Chinese).
- [9] XIA D H, WU Y H, LI Sh K. Study of transmission depth in film materials to heat radioactive wave [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2(3): 271-274 (in Chinese).
- [10] JIANG N, ZHANG Ch, NIU Y X, *et al.* Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 5001-5004 (in Chinese).
- [11] KRUEER M, ALLEN R, ESTEROWITZ L, *et al.* Laser damage in silicon photodiodes [J]. Opt & Quant Electron, 1976, 8(5): 453-458.
- [5] AKIYAMA Y, WAKISAKA A, MIZUKAMI F, *et al.* Solvent effect on acid-base clustering between acetic acid and pyridine [J]. Journal of Chemical Society Perkin Transactions, 1998, 2(1): 95-99.
- [6] CHOCHOLOUSOVA J, VACEK J, HOBZA P. Acetic acid dimer in the gas phase, nonpolar solvent, microhydrated environment, and dilute and concentrated acetic acid: ab initio quantum chemical and molecular dynamics simulations [J]. Journal of Physical Chemistry, 2003, 107(17): 3086-3092.
- [7] LIU Y, LAN X F, GAO S M, *et al.* Research of the mechanism of acetic acid fluorescence quenching [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 538-540 (in Chinese).
- [8] ZHU T, CHEN G Q, YU R P, *et al.* An experiment study of methanol absorption and fluorescent spectra induced by UV-light [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 470-472 (in Chinese).
- [9] CHE Y L, CAO X L, LI Q S. Preparation and photo luminescence of nano-porous oxidized silicon [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 605-607 (in Chinese).
- [10] GROSSETETE T, RIVATON A, GARDETTE J L, *et al.* Photochemical degradation of poly(ethylene terephthalate)-modified copolymer [J]. Polymer, 2000, 41(10): 3541-3454.
- [11] SUZUKI T, OKUYAMA U, ICHIMURA T. Double proton transfer reaction of 7-azaindole dimer and complexes studied by time-resolved thermal lensing technique [J]. Journal of Physical Chemistry, 1997, 101(38): 7047-7052.
- [12] ZELENCHUK A R, OLIVA E, KAUFMAN H, *et al.* Fluorescence and reflectance spectra of freshly excised cervical tissue [J]. Proc SPIE, 2002, 4613: 51-58.
- [13] LIU Y, LAN X F, GAO S M, *et al.* Study of acetic acid spectral characteristics [J]. Applied Laser, 2002, 22(6): 559-562 (in Chinese).
- [14] HAN C Q, LIU Y, YANG Y, *et al.* Study on fluorescence spectra of molecular association of acetic acid-water [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(4): 357-360.
- [15] CHEN G Z, HUANG X Z, ZHENG Z Z, *et al.* Analysis method of fluorescence [M]. Beijing: Science Press, 1990: 26 (in Chinese).
- [16] The Centre of Analysis and Test of Sichuan University. Analytical chemistry [M]. Beijing: Science Press, 2001: 229 (in Chinese).

(上接第 642 页)