

激光辐射 CCD 的破坏机理分析*

钟海荣¹ 陆启生² 文铁峰¹ 刘泽金² 许晓军²

(1. 国防科技大学图书馆, 长沙, 410073)

(2. 国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

摘 要 研究了国内外关于激光辐照 CCD 及其相似材料结构导致的各种效应, 特别是软硬破坏效应, 给出了各种破坏的阈值及实验方式; 对各种破坏机理及理论模型进行了对比分析。

关键词 光电探测器 CCD 激光辐照 破坏机理

中图分类号 TN 249

CCD (图象传感器) 已广泛用于摄像、监控、图象处理等多个领域。在某些特殊场合, 如激光环境下的光电成像系统、光子对抗以及 CCD 的抗激光加固等, 对 CCD 的激光辐照效应和破坏机理的研究有重要意义。

对光电探测器激光破坏研究的典型方法是测量各种阈值, 分析其破坏机理, 并建其模型。激光对 CCD 的破坏效应可分为软破坏和硬破坏, 而对软硬破坏模式, 目前仅是一种很含糊的提法, 并没有明确的定义。这里暂时这么理解: 所谓软破坏是指光电材料或器件的功能性退化或暂时失效, 如光饱和、点扩散函数 (PSF) 及调制传递函数 (MTF) 等光学性能的退化; 伏安特性曲线变直及电阻率降低、漏电流 (I_{ds}) 和基底电流 (I_{sub}) 大幅增长、击穿电压降低等器件电学性能的退化; 软破坏后器件仍有信号输出, 但信噪比会降低。所谓硬破坏是指永久性破坏, 器件无信号输出。如器件中关键部分的热熔融、龟裂、断裂、击穿等。

可以认为, 探测器各种性能的改变, 都可归因于激光辐照造成组成探测器材料的改变或者金属电极、焊接部位的破坏。因此, 人们在研究激光对 CCD 的破坏机理过程中, 既有对整个 CCD 器件的辐照^[1~4, 7, 9, 10], 以了解性能退化或破坏, 也有对其相似材料结构 (如 MOSFET^[4]、MOS^[8] 以及硅基多层结构^[6]) 薄片的辐照, 以通过对材料的形态及微结构变化的了解, 达到对破坏机理的理解。

目前国内外对 CCD 探测器的破坏机理研究作了许多工作。但是不同型号的 CCD 器件由于结构、工艺以及材料的不同, 得到的各种阈值仅能限定于具体的激光对具体型号的 CCD 而言。本文调研了国内外关于激光辐照 CCD 探测器及其相似材料结构导致的各种效应, 特别是软硬破坏效应的研究, 系统地收集了各种破坏阈值见表 1, 给出了其实验方式; 对各种破坏机理及理论模型进行了对比分析。

1 激光对 CCD 的软破坏效应与机理

1.1 电学性能的退化^[3, 4]

为了探测电学性能, 在实验中可用示波器或 HP-4145B 半导体参数分析仪等。

* 国家863计划激光技术领域资助课题
1998年6月2日收到原稿, 1998年7月13日收到修改稿。
钟海荣, 男, 1971年9月出生, 工学硕士, 馆员

表1 各种器件或相似材料结构的光饱和及软硬破坏阈值汇总

Table 1 Summary of laser-induced saturated thresholds or damage thresholds to the various CCD devices or the familiar materials structure

devices or materials structures	wave length /nm	working methods	pulse length /ns	CW irradiated time/s	define of thresholds	value of thresholds	ref
	632.8	CW	-	-	all elements irradiated and saturated	6×10^{-5}	1
Toshiba	1064	CW	-	-	all elements irradiated and saturated	5×10^{-4}	1
TCD 102C-1	632.8	CW	-	-	a few of elements irradiated, all saturated	15×10^{-3}	1
model, 1048	1064	CW	-	-	a few of elements irradiated, all saturated	100×10^{-3}	1
elements,	1064	pulse	9	-	local damage, device is invalid	9.0×10^{-2}	1
visible	1315	CW	-	1.1~1.15	local damage, device is invalid	1488~4227	9
	1064	pulse	60000	-	a few of elements irradiated, 80% saturated	0.938mJ^*	2
PIH-3070L			20	-	a few of elements irradiated, 15% saturated	0.0174mJ^*	2
	532	pulse	20	-	a few of elements irradiated, 60% saturated	0.174mJ^*	2
TP-505D model,		pulse	2000	-		< 12	7
512 × 492	1064	CW	-	7	point damage, device is invalid	> 6325	10
elements							
			10000		melting	2.7	8
	532	pulse	15	-	optical breakdown	11.2	8
MOS structure			15	-	direct damage, device is invalid	18.3	8
CCD			10000		melting	5.1	8
	1064	pulse	15	-	optical breakdown	32.2	8
			15	-	direct damage, device is invalid	48.9	8
EG&G Model					polysilicon 2 shows edge erosion;		
RA 2048J, 2048	1064	pulse	10	-	top oxide may be broken	> 1.5	
× 64 elements							
Itek Model	1064	pulse	10	-	1 shot on 1 point test Al clock line on	> 1.1	4
VLA 577E57D					the active area breaking		
2048 × 96	1064	pulse	10	-	10 shots on 1 point test Al clock line on	> 0.8	4
elements					the active area breaking		

Unit: W/cm^2 (continuous wave laser); J/cm^2 (pulse wave laser). But the values marked "*" were provided only with laser energy not laser fluence in Ref. 2

1.1.1 泄漏电流大幅增长与击穿电压的降低^[3,4]

激光辐照可使局部 p-n 结退化为电阻, 使得电阻降低, 伏安曲线变直, 这在激光辐照 PV 型探测器实验中已得到验证^[5]。用稳腔 Q 开关 Nd: YAG 脉冲激光 (波长为 1064nm) 辐照 EG&G Model RA 2048J 面阵 CCD 实验中^[3], 分别两次辐照后毗邻时钟线的 I-V 特性如图 1 所示^[3]。当激光辐照能量密度达到 $0.74 \text{J}/\text{cm}^2$, 外加电压超过 1V 时, 泄漏电流显著增加上千倍, 可达 $1 \mu\text{A}$ 。辐照能量密度继续增加, 可观察到时钟线间的电阻持续减少, 击穿电压持续降低。而用该激光辐照 Itek Optical System Model VLA 577E57D, TD I 型 CCD 芯片^[4], 当辐照能量密度仅为 $0.2 \text{J}/\text{cm}^2$ 时, 便发现泄漏电流。

1.1.2 势分布的改变及势阱降低^[3]

毗邻时钟线间的泄漏电流会使得沿多晶硅时钟线的电压降增加和破坏区势阱降低。毗邻时钟线间的任意位置 x 处的电荷控制能力与激光导致的等效电阻 R_d 之间近似成一种简单反比关系, 可用下面模型表示

$$\frac{Q_{\text{dam}}}{Q_{\text{undam}}} = 1 - \frac{x/L}{0.5 + R_d/(R_{p1} + R_{p2})} \quad (1)$$

式中 Q_{dam} 表示被破坏的势阱大小, Q_{undam} 表示未被破坏的势阱大小, L 是 CCD 芯片的长度, R_{p1}, R_{p2} 分别为多晶硅时钟线1和2的电阻, R_d 可通过毗邻时钟线间 $I-V$ 曲线计算出来。

1.2 光学性能的退化^[1~3]

1.2.1 光饱和及“光饱和串音”^[1,2]

当激光功率密度超过 CCD 的线性区时, CCD 的输出便会出现饱和。有趣的是, 不仅全域辐照可以造成 CCD 全域饱和, 还存在一种“光饱和串音”现象^[1] (也称为“弥散”现象^[2])。

即当用强光辐照 CCD 光敏区局部时, 被光照射的区域达到了饱和, 未被光照射的区域首先是沿电荷传输方向出现亮线, 光强不断增加, 则亮线不断加宽, 甚至整个光敏区处于饱和。造成这种现象的原因与 CCD 的结构和工作方式有关: 其光敏元是并行的, 但它的转移传输元却是串行的, 各元之间用沟渠隔开, 基底是在一起的。在极短时间内 (约为 1p s) 强光辐照产生的大量光生载流子在光信号积分时间内 (约为微秒和毫秒量级) 可以向邻近势阱溢流。有关器件的光饱和阈值见表1, 其值很低。光饱和并没有对器件及其组成材料造成损伤, 但却干扰了 CCD 的正常工作, 显然, 连续波激光比脉冲激光更能实现此效果。

1.2.2 点扩散函数 (PSF) 和调制传递函数 (MTF) 的软化^[3]

对 CCD 来说, 激光经光学系统聚焦后, 其破坏一般是局域现象, 因此可用点扩散函数 (PSF), 调制传递函数 (MTF) 来表征某个象元或局域的光学特性。在实验中常用狭缝照明成像的方法测量象元的 PSF, 用刀口扫描方法来测量 MTF。

用稳腔 Q 开关 Nd: YAG 脉冲激光 (波长为 1064nm) 辐照 EG&G Model RA 2048J 面阵 CCD, 当激光能量密度大到 $0.74\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 在电荷运动方向 (横向没有), 无论是受到激光辐照 Section 8, 还是其它未受到激光辐照的区域如 Section 6 都出现 PSF 和 MTF 从破坏中心向阵列边缘的逐渐软化。成像效果表现为非零象元的数目增加, 幅度减小, 并且有电荷的后向扩散, 器件空间频率响应降低。该现象出现的原因是: 由于激光辐照造成沿多晶硅时钟线的势阱降低, 被传输的电荷包分成许多更小的电荷包, 导致了电荷运动方向的 PSF 的扩大; 并且通过穿越破坏区的时钟线的传递, 使得破坏区附近的象元也发生不同程度的软化, 电荷控制能力从阵列的边缘向破坏中心逐渐降低, 如 (1) 式所示。

1.3 微形态及微结构变化^[3,4,6]

上述电学性能及光学性能的变化, 从根本上讲, 应归因于组成 CCD 的材料及结构的变化。对形态的破坏阈值一般定义为用光学显微镜所能观察的可视变化。有关阈值见表2~4, 图2是硅基多层结构 (Poly-Si/ SiO_2 /Si 或 SiO_2 /Si) 示意图^[6], 实验样品的各层厚度见表4。将这些形态变化与器件的性能改变进行对比分析, 可以发现如下破坏机制。

1.3.1 多晶硅的瞬态加热、熔化及重结晶

多晶硅层的形态和微结构的变化也许是造成势分布的改变及势阱降低的原因。高掺杂的

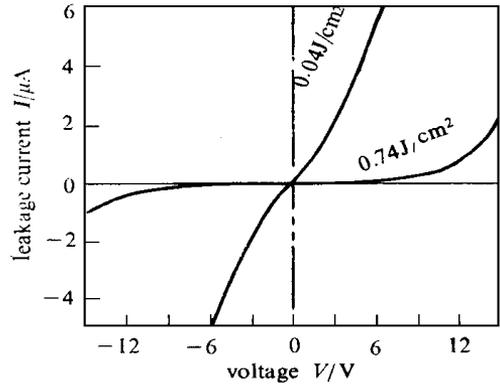


Fig 1 $I-V$ cures taken between adjacent clock lines for CCD arrays irradiated at the indicated fluences

图1 不同激光能流辐照 CCD 毗邻时钟线间的 $I-V$ 特性

多晶硅层对1064nm 激光具有很强的线性和非线性吸收。其小信号吸收深度可达几十微米，而经过10ns 激光脉冲加热至邻近熔化温度时，吸收深度快速降低，小于0.5μm (这恰好和 CCD 中的多晶硅层的厚度接近)。因此，大多数的激光能量吸收和加热发生在多晶硅层。一旦多晶硅接近熔化，器件的性能将由于多晶硅层的几何尺寸及应力的改变而受到影响。扫描电子显微镜(SEM) 检查表明，毗邻多晶硅时钟线之间距离发生了局部改变。透射电子显微镜(TEM) 检查表明，存在多晶硅的重结晶。重结晶导致多晶硅层变粗糙，使得反射率降低，这是一种正反馈机制，进一步加速了对激光能量的吸收。瞬态加热还使得多晶硅的微结构变得更疏松，机械强度更低。显然多晶硅的这种吸收效应为 Si 基底提供了屏蔽效应，避免其受热破坏，但却使整个 CCD 因为多晶硅的较早破坏造成阈值降低。

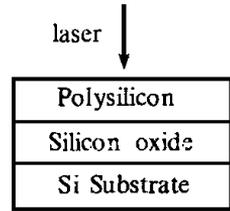


Fig. 2 Si-Based Multilayer structures

图2 硅基多层结构

表2 Nd: YAG 脉冲激光(脉冲宽度10ns) 辐照 EG&G Model RA2048J 面阵 CCD 的破坏情况^[3]

Table 2 Summary of 10ns pulsed Nd: YAG laser induced damage to EG&G Model RA2048J CCD arrays^[3]

fluence/ $J \cdot cm^{-2}$	functional and morphological changes
< 0.54	no changes observed
0.55	increase in dark video signal
0.74	degradation in PSF and MTF (charge smearing)
1.34	damage pits on polysilicon 1
> 1.5	polysilicon 2 shows edge erosion; top oxide may be broken

表3 Nd: YAG 脉冲激光对 Itek Model VLA577E57D CCD 芯片的破坏测试 (1个10ns 脉冲辐照1点或10个脉冲辐照1点)^[4]

Table 3 1 shot on 1 point or 10 shots on 1 point test to Itek Model VLA577E57D CCD chips by 10ns pulsed Nd: YAG laser^[4]

materials	fluence/ $J \cdot cm^{-2}$		damage behavior & comments
	1-on-1	10-n-1	
CCD active area (SiO ₂ -Poly Si-Gate oxide)	< 0.6	< 0.4	no surface change
	0.7~0.8	0.4~0.6	change in color, maybe change in surface height
	1.0~1.1	0.6~0.7	damage pits; cap SiO ₂ broken
	1.1~1.2	0.8~0.9	poly-Si melted
	> 1.3	> 1.0	poly-Si melted, bending
Al clock line (on the active area)	< 0.8	< 0.4	no surface change
	0.9~1.0	0.6~0.7	surface roughening
	1.0~1.1	0.7~0.8	melting or shrinkage
	> 1.1	> 1.1	breaking

1.3.2 隔离氧化物的掺杂、热损伤及热隔离

泄漏电流增长可归因于毗邻时钟线间场氧化物的变化，而击穿电压降低可归因于毗邻时钟线间门氧化物的变化。TEM 检查发现，在隔离氧化物中存在掺入物(可能是硅)及小空隙。通过对激光能量近似均匀的吸收，在多晶硅的整个深度里建立了大量的热，此时隔离它们的超薄氧化物在巨大的热应力下最易破坏。微量增加隔离氧化物也许能提高破坏阈值，但是随

着氧化物厚度增加到一定程度后, 破坏阈值反而降低, 如表4所示。这是因为沉积在更厚氧化物的多晶硅由于热隔离(氧化物的热传导性能很差)以至于热环境更加恶化。

表4 Nd: YAG 脉冲激光(脉冲宽度10ns)硅基多层结构破坏阈值(J/cm^2)^[6]

Table 4 All Experimental Damage Onsets for Si-Based Multilayer structures irradiated by 10ns pulsed Nd: YAG laser^[6]

200nm SiO ₂ /Si	300nm poly-Si/ 11nm gate oxide/Si	300nm poly-Si/ 100nm gate oxide/Si	300nm poly-Si/ 420nm field oxide/Si	300nm poly-Si/ 600nm field oxide/Si
3.14	0.43 (color change)	2.33	1.57	0.81

1.3.3 硅基的 p-n 结破坏及被屏蔽

在某些结构如 MOSFET^[4], 因为存在未被覆盖的 p-n 结表面终端, 当激光被强吸收时, 在硅基表面的浅熔化将导致一种 p-n 结破坏机制: 在 p-n 结耗尽层产生缺陷, 这种缺陷使得泄漏电流 I_{ds} 和 I_{sub} 增加, 但这种机制不能用于 CCD 的光敏区, 因为在基底表面的光敏 p-n 结被多晶硅层所覆盖, 多晶硅层的非线性光学吸收对 Si 提供了某种程度的屏蔽作用, 进而限制了对硅基的熔化。

1.3.4 微结构的改变

电学性能的退化阈值低于形态破坏阈值的原因(见表2)可能是微结构的改变, 有以下实验现象^[3,4](此时已发现电学性能的退化而未观察到形态破坏现象)支持这种理解: TEM 检查中发现由于熔化及重结晶导致的晶粒结构的变化; 在 HF 液中较未受激光辐照的样品有更快的腐蚀速度; 隔离氧化物的杂质掺入。

2 激光对 CCD 的硬破坏效应与机理

2.1 脉冲激光与 MOS 结构 CCD 的相互作用过程的等离子体诊断^[8]

用 YAG 脉冲激光(波长1064nm)及其倍频光(波长532nm)辐照 MOS 结构 CCD(金属铝栅极层厚1000nm, SiO₂层厚150nm, p 型 Si 衬底), 会产生高温高密度的等离子体, 根据时间序列的 M-Z 干涉图, 可计算作用于单位面积 CCD 的作用力达到 $10^8 N/m^2$ 以上, 与 CCD 中 A1 栅极膜与 SiO₂ 膜层间附着力 ($10^8 N/m^2$) 的数量级相同, 可见, 激光等离子体冲击波对 CCD 中 A1 栅极膜的力学作用不可忽略。激光与靶材相互作用产生的等离子体的范围与物质元素的离化能成反比关系, 对 MOS 结构 CCD 的损伤是从器件表面金属 A1 栅极膜开始, 逐层向里进行的。实验中破坏阈值见表1。表中的阈值定义请见参考文献[8]。

2.2 激光对 CCD 器件的点破坏和局域破坏机制^[1,7,9]

研究表明, CCD 的少数几个象元受激光辐照破坏后, 其效果将是整个器件无信号输出, 而不是象场中存在几个暗点。这归因于其结构和工作方式: 当激光辐照 CCD 表面, 造成栅极、传输极的铝覆盖层溶化和汽化, 导致栅极与传输极、传输极与传输极之间的短路, 而所有相同的电极是连通的, 这时器件会因驱动信号的混乱无法工作。此外, 其串行输出的结构又必然导致: 当中间某处由汽化造成断路时整个器件将无信号输出。根据以往的实验现象和照片分析, 这两种破坏机制同时存在。有关点破坏(或局域破坏)阈值见表1。

3 分析与结论

(1) 与其它探测器如 PV 型 InSb、HgCdTe、PC 型 HgCdTe^[11] 相比, 连续激光辐照 Si 基 CCD 的破坏阈值要高得多。这主要是由制成探测器的材料的热学和光学性能所决定^[9]: 与 InSb 等相比较, 组成 CCD 的材料吸收系数较小(如 Si, SiO₂, Al), 而热传导率值却较大(如

Si, Al), 熔点较高。

(2) 不同实验存在较大的阈值差异, 其原因之一是实验者对破坏阈值的定义不同, 但更重要的原因可能是实验样品之间的工艺处理和结构的差异。因此, 对器件建立一个统一的阈值模型尚不可能, 但对破坏机理的理解却有普遍意义。

(3) “光饱和和串音”现象与点破坏(局域破坏)机制对其它与 CCD 结构及工作方式(共同电极、串行输出)相似的阵列探测器如光电二极管阵列、InSb 阵列同样适用, 这两种破坏机制说明它们在抗激光方面是脆弱的。

参考文献

- 1 刘泽金等 激光技术, 1994, **18**(6): 344
- 2 陈德章等 激光技术, 1997, **21**(3): 146
- 3 Zhang C, et al *Appl Opti*, 1993, **32**(27): 5201
- 4 Zhang C, et al *Opti Engi*, 1991, **30**(5): 651
- 5 蒋志平等 应用激光, 1995, **15**(6): 225
- 6 Ma Chunchi, et al *SPIE*, 1993, **2021**: 208
- 7 刘泽金等 应用激光, 1995, **15**(2): 85
- 8 倪晓武等 物理学报, 1994, **43**(11): 1795
- 9 钟海荣等 1995年全国第七届激光的热和力学效应会议论文集 128
- 10 许晓军等 连续波 YAG 激光辐照面阵 CCD 探测器及其成像质量影响的研究 1998年全国第九届激光的热和力学效应学术会议论文集
- 11 陈金宝等 1995年全国第七届激光的热和力学效应会议论文集 132

REVIEW ON THE LASER-INDUCED DAMAGE MECHANISM OF CCD DETECTOR

Zhong Hairong, Lu Qisheng, Wen Tiefeng, Liu Zejing, Xu Xiaojun

Library of National University of Defense Technology, Changsha, China 410073

ABSTRACT This paper reviews that the various reported laser-induced effects, especially the soft-damage or hard-damage ones, of the CCD detectors or the familiar materials structures, collects various kinds of laser-induced damage thresholds, and gives those experimental methods. By comparing each other, the laser-induced damage mechanisms and theoretical models have been analyzed.

KEY WORDS detector, laser irradiate, damage mechanism, CCD image sensors