

文章编号: 1000-7032(2019)06-0788-07

基于激光不同加载方式下 CCD 损伤特性的时间演化规律

韩 敏, 聂劲松*, 豆贤安, 王 玺, 孙 可

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 为了探究高功率连续激光作用下 CCD 的损伤特性随时间的演化规律, 根据其结构特点和工作原理, 建立了 1.06 μm 连续激光辐照 CCD 的六层结构热力耦合三维模型。综合考虑了微透镜聚焦和铝膜开口率等因素的影响, 通过改变 CCD 不同损伤阶段的激光辐照方式, 数值模拟分析了 CCD 多层结构的层层损伤机理, 研究了 CCD 各个损伤阶段的时间阈值, 并与实验结果进行了对比。结果表明, 微透镜聚焦光束阶段, 微透镜由于熔点较低, 发生熔融分解, CCD 表现为点损伤; 微透镜熔融阶段, 失去聚光能力, 在应力损伤和熔融损伤共同作用下, 铝膜层熔融剥落, 表现为纵向亮线损伤; 铝膜层熔融剥落阶段, 激光直接辐照在硅电极上, 硅电极上表面熔融, 造成布线电路的损伤, 导致部分像元中的电荷无法转移, 出现横向暗线损伤; 最后, SiO_2 绝缘层受剪切应力而断裂, 使得硅电极和硅基底相互导通, 造成完全损伤。实验与仿真结果趋势一致, 误差较小, 相互验证。

关键词: 连续激光; CCD 探测器; 损伤机理; 损伤时间

中图分类号: TN216

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20194006.0788

Temporal Evolution Characteristics of CCD Detector Based on Different Laser Loading Methods

HAN Min, NIE Jin-song*, DOU Xian-an, WANG Xi, SUN Ke

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

* Corresponding Author, E-mail: njs7001@sina.com

Abstract: In order to explore characteristics of CCD detector, according to the structural characteristics of CCD detectors, we developed a six-layer-structure, thermal-coupling, mathematical physical 3D model of a CCD detector that was irradiated by a 1.06 μm continuous laser. By changing the way of laser irradiating the CCD at different damage stages, the multi-layer damage mechanism of CCD detector was analyzed numerically and the time threshold was obtained. By comparison, the results demonstrated that due to melting the damage started from the microlens layer when the microlens focusing laser to photosensitive layer, causing the point damage of CCD. Then the aluminum film was fused and peeled by heat and stress after the microlens lost the ability to focus the beam, causing the vertical bright linear damage. With the molten Al film peeling off, the silicon electrode was irradiated directly and its surface was molted. Then the damaged wiring circuit made charges untransferable, causing the horizontal dark linear damage. Subsequently, the SiO_2 insulating layer was torn up by shear stress, which made the molten silicon electrode in the upper and the silicon substrate in the lower conduct together, causing the complete damage of CCD. Additionally, the experimental and simulation results show the same trend with small error and verify each other.

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-10-17

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(2015J1003)资助项目

Supported by Foundation of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(2015J1003)

Key words: continuous laser; charge-coupled device; damage mechanism; damage time

1 引言

电荷耦合器件 (Charge-coupled device, 简称 CCD) 是一种半导体成像器件, 被广泛运用于光学成像系统和探测系统中。激光的干扰和破坏易使它不能正常工作, 因此, 开展激光对 CCD 探测器的干扰及损伤机理研究具有十分重要的意义。

研究表明, 强激光对 CCD 的损伤有 3 个阶段: 点损伤、线损伤和完全损伤, 对于实验现象和损伤机理已经有了大量的研究^[1-12]。2011 年, 毕娟建立了 1.06 μm 脉冲激光辐照光敏单元的有限元模型, 解释了光敏层硬破坏的机理^[2]; 2013 年, 聂劲松利用有限元法对 1.06 μm 激光辐照 CCD 探测器的温度场和应力场进行了数值模拟, 进一步阐述了 CCD 的损伤机理^[5]。2015 年, Li^[8] 通过三维仿真毫秒级 Nd:YAG 激光辐照 CCD 探测器多层结构, 发现 CCD 损伤的主要原因是热损伤和热应力损伤, 铝膜层的剥落产生漏电流, 硅基板的塑性变形使暗电流大量增加, CCD 功能性损伤是由于铝膜的熔融和硅绝缘层的断裂。2016 年, Li^[9] 实验研究了脉冲激光照射 CCD 探测器的损伤机理, 结果表明, 熔融现象是热损伤, 温度梯度变化使得探测器的边缘产生隆起, 硅基底的损伤造成 CCD 探测器功能损失。2017 年, Chen 研究了长脉冲激光硅材料的模型, 通过对其温度和热应力分布的求解, 结果显示, 硅材料表面的温度和压应力是最高的, 随着深度的增加, 都逐渐下降^[10]。

然而上述模型主要是激光对硅结构的损伤, 而忽略了微透镜聚光、遮光铝膜开口率对损伤进程的影响, 认为激光直接作用于金属遮光层和平行入射在感光层^[2, 11], 更没有分析 CCD 多层结构的层层损伤进程。本文总结前人经验, 结合文献^[12]前期实验的结论, 根据 CCD 的实际结构和工作原理, 综合考虑了微透镜的聚焦、遮光铝膜的开口率、Al 膜对光的低吸收率和硅材料相变等因素对激光辐照 CCD 探测器的影响, 理论分析了 CCD 多层结构的层层损伤机理, 并得到了层层损伤时间阈值。仿真与实验相互印证, 且误差较小。

2 理论模型

典型 CCD 探测器由一系列排列紧密的 MOS

结构的电容器组成, 其 MOS 结构的移位寄存器上覆盖有一层遮光铝膜, 像元表面一般都覆有微透镜阵列, 如图 1(a) 所示。微透镜一般由聚酯亚胺 (PI) 制成, 对 1.06 μm 激光透过率几乎达到 100%, 当激光照射 CCD 表面时, 微透镜阵列将光束汇聚, 使绝大部分激光直接辐照于硅光电二极管上。由于 SiO_2 绝缘层很薄, 且对 1.06 μm 激光高透, 而硅基底对 1.06 μm 的激光吸收率为 67%^[13], 因此, 近似认为激光直接辐照到 Si 基底上, 只被基底硅材料吸收。选取的 CCD 探测器型号是 SONY-ICX405AL (对角线 6 mm, 类型 1/3), 通过合理的简化, 建立模型, 自上而下分别为: 微透镜阵列层 3 μm 、遮光铝膜层 1 μm 、 SiO_2 层 0.5 μm 、硅电极层 0.5 μm 、 SiO_2 绝缘层 0.2 μm 、硅基底层 150 μm , 如图 1(b) 所示。取入射到 CCD 表面的激光功率密度为 $I = 5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 入射激光光斑半径 $\omega_0 = 100 \mu\text{m}$ 。

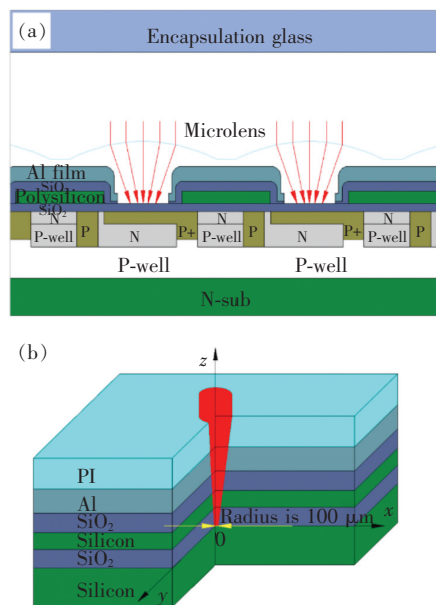


图 1 (a) CCD 基本结构示意图; (b) CCD 仿真模型示意图。

Fig. 1 (a) Structure of typical CCD. (b) Model of CCD detector irradiated by laser.

激光辐照过程中, 模型满足傅里叶热传导方程^[14]:

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{k_i}{\rho_i c_i} \nabla^2 T_i(x, y, z, t) + \frac{Q}{\rho_i c_i}, \quad (1)$$

激光加载边界条件:

$$-k \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} (1-R)I, & 0 \leq x^2 + y^2 \leq \omega_0^2 \\ 0, & x^2 + y^2 \geq \omega_0^2 \end{cases}, \quad (2)$$

设入射激光为高斯分布, $t=0$ 时刻正入射到芯片表面, 则入射到 Si 基底材料表面的激光功率密度 I 为:

$$I = I_0 \exp(- (x^2 + y^2) / \omega_0^2), \quad (3)$$

其中, I_0 为光斑中心的功率密度。由公式(3)在光斑内进行积分, 推导得:

$$I_0 = \frac{2P}{\pi \omega_0^2 [1 - \exp(-2)]}, \quad (4)$$

P 为激光作用时光斑内的平均功率。硅材料对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的反射率 $R=0.33$, 吸收系数为 $\alpha=800 \text{ cm}^{-1}$, 材料对激光的吸收为体吸收, 则公式表达为^[8]:

$$Q = \alpha_{\text{Si}}(1-R)I \exp(-\alpha_{\text{Si}} \times z), \quad (5)$$

综合考虑传热过程中芯片上表面和空气之间的热辐射和对流, 取对流换热系数 $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,

模型其他边界为绝热条件。模型的初始条件为:

$$T|_{t=0} = 300 \text{ K}. \quad (6)$$

激光辐照 CCD 芯片时产生空间非均匀的温度场, 芯片不同区域受热膨胀的大小不同, 从而引发热应力。根据热弹性理论、应力平衡方程、应力应变几何方程及广义胡克定律, 可解得各热应力分量为^[14]:

$$\sigma_r = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left[\frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} T r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right], \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left[\frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} T r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr - T \right], \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left[\frac{2}{R_0^2} \int_0^{R_0} T r dr - T \right], \quad (9)$$

其中, σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 分别为径向、环向和轴向热应力, β 为热膨胀系数, E 为杨氏模量, γ 为泊松比, R_0 为芯片径长。 r 是径向方向, z 是激光入射方向。将温度场代入表达式即得热应力分布。各层材料均匀且各向同性, 材料的各项热学和力学参数取为常数, 则材料的性能参数如表 1 所示^[11]。

表 1 各层材料的属性

Tab. 1 Performance parameters of the material

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热膨胀系数/ K^{-1}	杨氏模量/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比	熔点/K
PI	1 530	0.12	1 090	2.0×10^{-5}	4×10^9	0.3	
Al	2 700	238	1 050	2.29×10^{-5}	6.8×10^{10}	0.3	932
SiO ₂	2 640	1.3	787	5.0×10^{-7}	7.78×10^{10}	0.17	1 880
Si	2 520	27	1 009	2×10^{-5}	1.07×10^{10}	0.2	1 685

3 数值模拟

在 CCD 层层损伤的进程中, 随着损伤时间的推移, CCD 多层结构逐渐被破坏, 由于 CCD 各层结构的材料不同且微结构复杂, 因此 CCD 的不同损伤程度对激光的吸收方式和吸收程度也在不断地变化。根据其多层结构的损伤情况, 将激光的加载方式分为 3 个阶段: (1) 当连续激光辐照在 CCD 芯片表面时, 微透镜聚焦光束于感光层, 激光的能量被感光单元吸收, 为微透镜聚焦阶段; (2) 微透镜损伤后失去聚焦能力, 入射激光直接辐照在遮光 Al 膜层, 大部分能量被 Al 膜反射, 小部分能量穿过周期性开孔入射到感光层被吸收, 为微透镜的熔融阶段; (3) 激光持续作用, 当 Al 膜熔融损伤后, 大部分激光将透过 SiO₂ 层辐照在硅电极

上, 小部分激光透过周期性开孔入射到感光层被吸收, 为遮光铝膜熔融剥落阶段。在该过程中, CCD 经历点损伤、纵向亮线损伤、横向暗线损伤和完全损伤 4 个过程。

3.1 微透镜聚焦阶段

激光辐照 CCD 探测器时, 成像镜头将光束汇聚到 CCD 表面微透镜上, 微透镜聚焦光束至感光层。当 CCD 表面的激光功率密度 $I=5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、辐照时间为 0.40 s 时, 其轴线温度分布如图 2 所示。感光单元中 SiO₂ 层极薄, 对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光高透, 且硅材料对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的吸收率为 67%^[13], 也就是说, 硅基底上表面直接吸收光源, 因此其温度最高。随着热量的传导, 从硅基底到微透镜层温度呈现出阶跃式下降, 因材料导热系数的差异, 递减幅度不同。

微透镜 PI 层是一种高分子材料, 对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光高透, 可以长期工作在温度 470 K 左右的环境中。当温度升高到 710 K 左右, 微透镜就会出现玻璃化熔融, 并发生化学分解。微透镜 PI 层由于熔点较低最先达到熔点, 开始熔融损伤。可以认为激光辐照 0.40 s 时, CCD 发生点损伤。

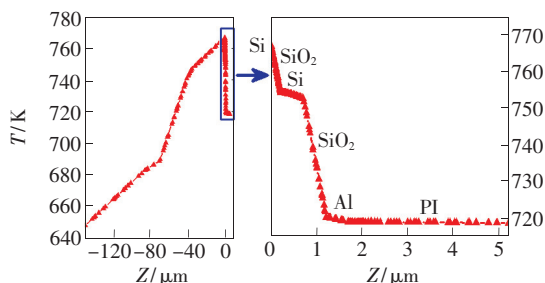


图 2 轴线温度分布 ($t=0.40 \text{ s}$)

Fig. 2 Thermal distribution along the model axis ($t=0.40 \text{ s}$)

微透镜熔融损伤, 逐渐失去聚焦光束的能力, 随着损伤时间的推移, 熔融面积不断扩大。当辐照时间为 0.45 s 时, 微透镜上表面的温度分布如图 3 所示。微透镜上表面的温度分布近似为高斯型, 此时微透镜大面积熔解, 熔融半径已经达到了 $100 \mu\text{m}$ (激光光斑半径为 $100 \mu\text{m}$)。因此, 此后微透镜将失去对入射光束的汇聚作用。

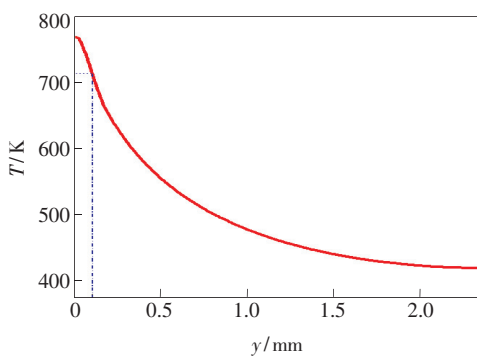


图 3 微透镜上表面的温度分布图 ($t=0.45 \text{ s}$)

Fig. 3 Temperature distribution on the surface of the micro-lens when the irradiation time is 0.45 s

3.2 微透镜熔融阶段

微透镜熔融损伤, 失去聚焦作用后, 激光直接辐照在遮光铝膜上, 铝膜开口率为 30% [13], 且对光的反射率为 92% , 这使得 CCD 吸收激光的能量减少。激光持续作用, 铝膜层的温度缓慢升高, 当辐照时间为 4.50 s 时, 铝膜中心处的温度达到其熔点 932 K , 铝膜熔融, 其与 SiO_2 周期结构层接触面的温度、应力分布情况如图 4 所示。

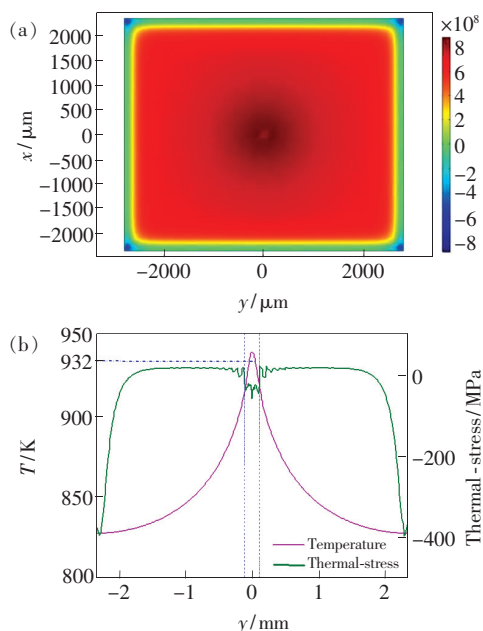


图 4 (a) 铝膜上表面压应力分布 ($t=4.50 \text{ s}$); (b) 铝膜与 SiO_2 层接触面的温度和应力分布 ($t=4.50 \text{ s}$)。

Fig. 4 (a) Surface compressive stress distribution on the aluminum film. (b) Stress distribution along the interface between the shading aluminum film and SiO_2 layer ($t=4.50 \text{ s}$).

由图 4 可知, 遮光铝膜与 SiO_2 层交界面边缘处的最大拉伸应力达到 400 MPa , 已经与 Al-SiO_2 层间附着力的量级相当 [5]。此时, 虽然遮光铝膜边缘的温度值未达到其熔点 932 K , 但边缘处的铝膜在应力的作用下开始脱离 SiO_2 周期结构层。在激光辐照区域 ($-0.1 \text{ mm} < y < 0.1 \text{ mm}$), 拉伸应力稳定在 50 MPa 左右, 在接近激光辐照区域边缘处有明显的突变情况。 Al-SiO_2 接触面的温度场分布近似呈高斯形, 在遮光铝膜的中心区域温度值超过其熔点, 此时, 熔融的铝膜在拉伸应力的作用下不断隆起, 未熔融的铝膜在应力的作用下拉伸撕裂。在热应力和热熔融的共同作用下, 铝膜层开始大面积熔融剥落, 并伴随着大量裂纹的产生。铝膜熔融蜷曲, 与 SiO_2 分离, 激光通过铝膜边缘反射、衍射进入垂直移位寄存器, 造成漏光现象, 在不同的驱动电压下, 产生电极间的漏电流。漏光现象和漏电流使载流子明显增加, 在 CCD 的竖直方向拉出线状, 表现为实验中观察到的纵向亮线 [12]。因此可以认为 4.50 s 是 CCD 发生纵向亮线损伤的时间阈值。

3.3 遮光铝膜熔融剥落阶段

随着铝膜不断熔解剥落, 当激光辐照 4.65 s

时,铝膜的熔融半径达到了 $100\ \mu\text{m}$,也就是说,辐照区内的铝膜已经完全熔融脱落。此时,失去了铝膜的保护,绝大多数的激光将直接辐照在硅电极上表面。硅材料对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光吸收较强,短时间内,硅电极上表面温度急剧升高。图 5 为硅电极上表面中心处温度随时间的变化,其变化趋势主要分为 3 个阶段:微透镜聚焦阶段、微透镜熔融阶段和铝膜熔融剥落阶段。微透镜熔融失去聚光能力,且铝膜对激光高反,使得 CCD 温升速率降低,当铝膜熔融剥落后,温升速率有所提高。图 5 中,当激光辐照时间为 $5.88\ \text{s}$ 时,硅电极上表面的温度达到硅的熔点 $1685\ \text{K}$ 。此时,内层原本分立的多晶硅电极因激光辐照而熔融,造成布线电路的损伤,产生暗电流,导致部分像元中的电荷无法转移,从而形成横向暗线^[12]。因此可以认为激光辐照 $5.88\ \text{s}$ 时 CCD 发生横向暗线损伤。

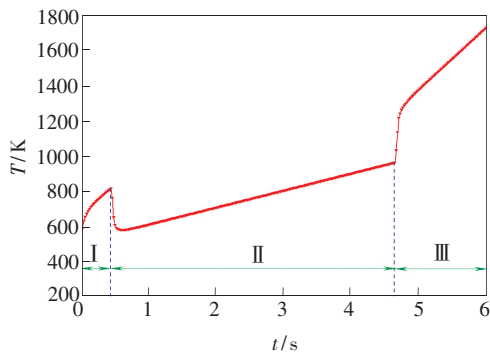


图 5 硅电极上表面中心处温度分布随时间的变化关系
Fig. 5 Temperature distribution on the surface center of the silicon electrode with time

激光继续作用,硅电极温度急剧升高,而 SiO_2 导热系数较小,使得上层硅电极和下层硅基底的温差变化较大,进而造成热应力的急剧变化。激光辐照 $6.02\ \text{s}$ 时, SiO_2 绝缘层的上表面的剪切应力的分布情况如图 6 所示。

SiO_2 绝缘层上下表面剪切应力随 y 轴的分布如图 6 所示。在激光辐照区域, SiO_2 绝缘层上下表面出现了一对剪切应力,由中心向边缘逐渐递减,呈旋转对称分布,但在模型边缘处急剧增大。硅材料的力学性能主要表现为两个方面:脆性断裂和塑性变形。按照 CCD 的工作原理,一旦 SiO_2 绝缘层被击穿,驱动电极和半导体之间便会短路,则 CCD 将彻底失效^[15]。仿真表明,随着作用时间的推移,剪切应力逐渐增大,当辐照时间为 $6.02\ \text{s}$ 时, SiO_2 绝缘层上下表面的剪切应力稳定在 $60\ \text{MPa}$ 。

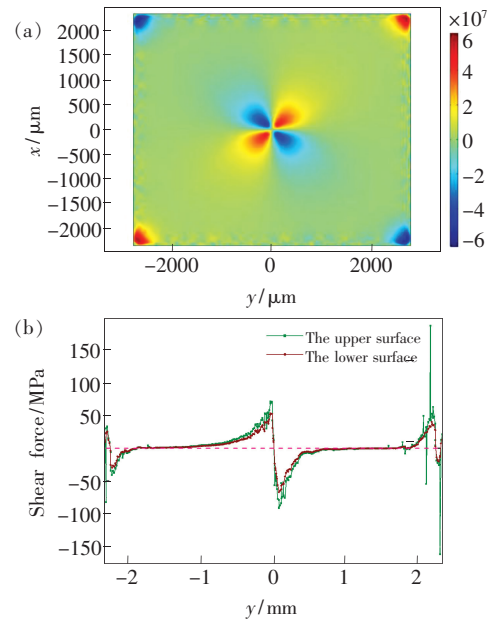


图 6 (a) SiO_2 绝缘层上表面剪切应力分布示意图;(b) SiO_2 绝缘层上下表面剪切应力分布 ($t = 6.02\ \text{s}$)。

Fig. 6 (a) Shear stress distribution on the surface of SiO_2 .
(b) Shearing force distribution on upper surface and lower surface of SiO_2 when time is $6.02\ \text{s}$.

由于 SiO_2 的脆性较大,塑性很弱,此时厚度仅为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 绝缘层因受剪切而出现裂纹。由于 SiO_2 绝缘层因剪切力的作用已撕裂受损,这样便使得熔融的硅电极与硅基底导通,造成 CCD 短路,输出图像为全黑屏^[12],即 CCD 彻底失效。因此,可以认为 CCD 完全损伤的时间阈值为 $6.02\ \text{s}$ 。

4 实验与仿真对比

综上所述,微透镜聚焦光束阶段,激光直接入射感光层,整个 CCD 探测器温度逐渐升高,但微透镜由于熔点较低,最先开始损伤,即微透镜的熔融分解,CCD 表现为点损伤;微透镜熔融阶段,失去聚光能力,CCD 吸收入射激光的能量降低,温升速率减慢,在应力损伤和熔融损伤共同作用下,铝膜层熔融剥落,表现为纵向亮线损伤;铝膜层熔融剥落阶段,激光直接辐照在硅电极上,硅电极上表面熔融,造成布线电路的损伤,导致部分像元中的电荷无法转移,从而形成实验中的横向暗线损伤;最后, SiO_2 绝缘层受剪切应力而断裂,使得硅电极和硅基底相互导通,造成 CCD 的完全损伤。损伤情况与实验结果基本一致,证明了所建模型的有效性。

依据上述分析结果, 汇总得到实验与仿真中 CCD 的层层损伤时间阈值, 如表 2 和图 7 所示。

表 2 1.06 μm 连续激光损伤 CCD 探测器 (SONY-ICX405AL) 的时间阈值

Tab. 2 Time threshold of CCD detector irradiated by 1.06 μm continuous laser

损伤阶段	仿真损伤时间/s	实验损伤时间/s
点损伤	0.40	1.00
纵向亮线损伤	4.50	6.80
横向暗线损伤	5.88	7.00
完全损伤	6.02	8.00

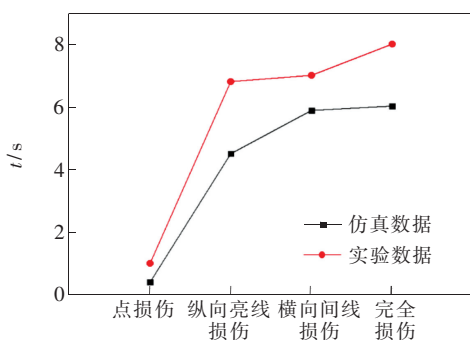


图 7 CCD 各个损伤阶段时间阈值的实验与仿真对比

Fig. 7 Comparison of the time threshold between experiment and simulation

根据数值仿真和实验测量的数据, CCD 多层结构层层损伤进程的趋势是一致的。由图 7 可知, 数值仿真中各个阶段的损伤时间比实验中实际损伤时间短, 但各个阶段的损伤时间误差较小, 这很好地证明了所建模型的准确性。在 CCD 探测器的损伤实验中, CCD 多层结构从点损伤到纵向亮线损伤的时间相对较长, 主要原因是微透镜熔融损伤, 失去聚焦功能后, 绝大多数激光能量被遮光铝膜反射, 使得探测器温升速率降低, 能量累积较慢。数值仿真中, CCD 从纵向亮线损伤阶段到达横向暗线损伤阶段的时间非常相近, 实验结果也恰好体现了这一点。

参 考 文 献:

- [1] 朱志武. 短脉冲激光对可见光 CCD 及滤光片组件的损伤效应研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
ZHU Z W. Short Pulsed Laser Induced Damage to Visible Light CCD and Optical Filter Module [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 毕娟, 张喜和, 倪晓武. 长脉冲激光对组成 CCD 图像传感器的 MOS 光敏单元的硬破坏机理研究 [J]. 物理学报,

CCD 多层结构损伤时间阈值的实验与仿真相互印证, 其趋势较为一致, 但是也存在一定的误差。现分析原因总结如下: 一是激光分段加载仍具有一定的局限性。多层结构的损伤过程中, 实际情况下微透镜的损伤区域是一个逐渐变大的过程, 仿真中以损伤半径到达光斑半径时作为更换激光入射 CCD 探测器的一个依据, 缺乏考虑损伤半径随时间的动态变化。二是实际损伤进程中多层结构受损的残留物会阻碍激光的入射。CCD 多层结构受激光辐照时表现为损伤半径的不断扩大, 实际损伤进程中, 受热熔融和热应力共同作用, 会有大量的熔融物、沉积物产生, 阻碍激光的吸收。

5 结 论

本文以热传导方程和热弹性力学方程为基础, 建立了 1.06 μm 连续激光辐照 CCD 六层结构的热力耦合数学物理模型。综合考虑了微透镜的聚焦、遮光铝膜的开口率、Al 膜对光的低吸收率和硅材料相变等因素的影响, 通过对激光不同加载阶段进行有限元数值求解, 以及与实验的对比分析, 研究了多层结构的损伤顺序和损伤机理, 得到了层层损伤时间阈值。

结果表明, 连续激光损伤 CCD 的过程主要以热熔融损伤和热应力损伤为主。微透镜聚焦光束阶段, 激光直接入射感光层, CCD 多层结构中微透镜由于熔点较低, 最先开始熔融分解, CCD 表现为点损伤; 微透镜熔融阶段, 失去聚光能力, 激光入射受阻, CCD 温升速率减慢, 在应力损伤和熔融损伤共同作用下, 铝膜层熔融剥落, 表现为纵向亮线损伤; 铝膜层熔融剥落阶段, 激光直接辐照在硅电极上, 硅电极上表面熔融, 造成布线电路的损伤, 导致部分像元中的电荷无法转移, 从而形成实验中的横向暗线损伤; 最后, SiO_2 绝缘层受剪切应力而断裂, 使得熔融的硅电极和硅基底相互导通, 此时 CCD 完全损伤。

- 2011,60(11):340-345.
- BI J,ZHANG X H,NI X W. Mechanism for long pulse laser-induced hard damage to the MOS pixel of CCD image sensor [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2011,60(11):340-345. (in Chinese)
- [3] 郝向南,李化,聂劲松,等. 不同工作状态激光对可见光 CCD 的损伤实验 [J]. *光电工程*, 2012,39(9):113-118.
HAO X N,LI H,NIE J S,*et al.*. Experiment of visible CCD damaged by laser operating in different state [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2012,39(9):113-118. (in Chinese)
- [4] CHEN G B,GU X Y,BI J. Numerical analysis of thermal effect in aluminum alloy by repetition frequency pulsed laser [J]. *Optik*, 2016,127(20):10115-10121.
- [5] 聂劲松,王奎,李化,等. 1.06 μm 激光辐照 CCD 探测器的热力效应分析 [J]. *红外与激光工程*, 2013,42(S2):380-386.
NIE J S,WANG X,LI H,*et al.*. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by 1.06 μm laser [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2013,42(S2):380-386. (in Chinese)
- [6] ZHANG Z,CHENG X A,JIANG T,*et al.*. A dazzling phenomenon of CW laser on linear CCD camera [J]. *Optik*, 2012,123(3):223-227.
- [7] GAO L Z,ZHU Z W,SHAO Z Z,*et al.*. Electric-induced oxide breakdown of a charge-coupled device under femtosecond laser irradiation [J]. *Appl. Opt.*, 2013,52(31):7524-7529.
- [8] LI Z W,WANG X,SHEN Z H,*et al.*. Mechanisms for the millisecond laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors [J]. *Appl. Opt.*, 2015,54(3):378-388.
- [9] LIM X,JING Y,TAN Y,*et al.*. Study on the mechanism of a charge-coupled device detector irradiated by millisecond pulse laser under functional loss [J]. *Appl. Opt.*, 2016,55(6):1257-1261.
- [10] CHEN G B,BI J. Modeling of temperature and thermal-stress of silicon irradiated by a long pulsed laser and its damage evaluation [J]. *Optik*, 2017,131:574-581.
- [11] 孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京:国防工业出版社, 2002:28-32.
SUN C W. *Laser Irradiation Effect* [M]. Beijing:National Defend Industry Press, 2002:28-32. (in Chinese)
- [12] HAN M,NIE J S,SUN K,*et al.*. Experiment on the temporal evolution characteristics of a CCD multilayer structure irradiated by a 1.06 μm continuous laser [J]. *Appl. Opt.*, 2018,57(16):4415-4420.
- [13] 张帆,牛燕雄,刘宁,等. 激光辐照 CCD 温度场与热应力场的研究 [J]. *激光技术*, 2017,41(3):433-437.
ZHANG F,NIU Y X,LIU N,*et al.*. Research of temperature field and thermal stress field of CCD under laser irradiation [J]. *Laser Technol.*, 2017,41(3):433-437. (in Chinese)
- [14] LI G,SHEN H B,LI L,*et al.*. Laser-induced damages to charge coupled device detector using a high-repetition-rate and high-peak-power laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2013,47:221-227.
- [15] LI F M,NATHAN A. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2004,51(12):2229-2236.



韩敏(1993 -),男,安徽宣城人,硕士研究生,2016 年于华东理工大学获得学士学位,主要从事激光与物质相互作用的研究。
E-mail: hm462803063@sina.com



聂劲松(1971 -),男,安徽合肥人,博士,研究员,2001 年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事激光与物质相互作用的研究。
E-mail: njs7001@sina.com