

脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究

姜楠¹, 张维¹, 牛燕雄^{1,2}, 沈学举¹, 杨海林¹, 陈燕¹, 王龙¹, 张博¹

(1. 军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003; 2. 清华大学精密仪器测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:具有一定能量强度的激光辐照 CCD 图像探测器时可造成探测器的干扰和破坏。基于热传导和热弹性力学的基本关系式建立了脉冲激光辐照 CCD 多层结构的热力耦合数学物理模型, 对热传导方程和应力平衡方程进行有限元数值求解, 计算得到不同能量密度下脉冲激光辐照 CCD 的瞬态温度场和热应力场, 分析了 CCD 最易损伤的位置及激光参数对探测器损伤的影响, 并结合 CCD 的像元构造和工作方式阐明了 CCD 各层结构的损伤对 CCD 成像质量的影响程度及影响机理。

关键词:激光破坏; CCD; 损伤机理; 温度场; 热应力场

中图分类号: TN386; TN249 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Pulsed Laser Induced Damage on CCD Arrays

JIANG Nan¹, ZHANG Chu¹, NIU Yan-xiong^{1,2},

SHEN Xue-ju¹, YANG Hai-lin¹, CHEN Yan¹, WANG Long¹, ZHANG Bo¹

(1. Department of Optics&Electron Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Tsinghua University, Key Laboratory of Precision Instrument and Testing Technology of Nation, Beijing 100084, China)

Abstract: CCD arrays can be disturbed or damaged when subjected to laser irradiation. The multilayer thermal-mechanical physical model of CCD irradiated by pulsed laser is set up based on heat conduction and thermal elastic mechanics theories, the heat conduction differential equation and stress-balance equation are solved by the finite elements method. The transient temperature field, thermal stress field and the most probably damaged position are obtained, with CCD pixel structure and operation mode presented, the influences of laser parameters and each damaged layer to CCD imaging formation are discussed as well.

Key words: laser induced damage; CCD; damage mechanism; temperature field; thermal stress field

1 引言

军用高功率激光技术的不断发展和日趋成熟使现代战争中充满着越来越严重的激光威胁。电荷耦合器件 (CCD) 因其体积小、质量轻、灵敏度与分辨率高、功耗低等优点, 已广泛应用于侦查、制导、监

基金项目: 中国博士后科学基金 (No. 20060400418); 军械工程学院重点研究基金 (No. YJXM05002) 资助。

作者简介: 姜楠 (1984 -), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: cool_epower@126.com

收稿日期: 2008-04-15

控、跟踪等诸多军事领域,而在光电对抗中,以 CCD 图像探测器为核心的光电装备极易受到激光的干扰与破坏以致不能正常工作,因此开展激光对 CCD 探测器干扰及损伤机理的研究具有十分重要的意义。对激光辐照 CCD 图像探测器的研究,部分文献已从各种破坏阈值的测量、光饱和干扰、点扩散函数及调制传递函数软化等方面进行了报道^[1-4]。本文对脉冲激光辐照 CCD 探测器的热力破坏效应进行了数值模拟,计算得到激光辐照下 CCD 多层结构的瞬态温度场和应力场,定量地分析了脉冲激光对 CCD 探测器的硬破坏效应。

2 热力耦合模型

CCD 由一系列排列紧密的 MOS 结构的电容器组成,对于最常见的行间转移 CCD (IT - CCD) 的像元构造,其 MOS 结构的移位寄存器上覆有一层遮光铝膜,并且商品化的 IT - CCD,为了提高开口率以增强感光度,像素表面一般都覆有微透镜阵列,图 1 为典型的 IT - CCD 的像元结构。对实际的像元构造进行必要的抽象和合理的简化,最终建立激光辐照 CCD 层状结构的模型,如图 2 所示,由上自下分别为微透镜阵列、遮光铝膜、SiO₂ 层、Si 电极、SiO₂ 层及 Si 基底。

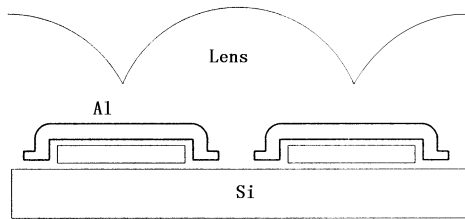


图1 CCD的像元构造

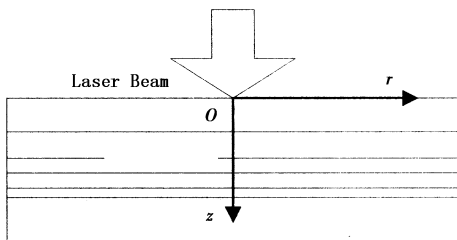


图2 脉冲激光辐照 CCD 的热力模型

激光辐照 CCD 多层结构的 Fourier 瞬态热传导偏微分方程可以表示为^[5]:

$$\rho_i c_i \frac{\partial}{\partial t} T_i(r, z, t) - k_i \nabla^2 T_i(r, z, t) = g_i(r, z, t)$$

$$(i = 1, 2, \dots) \tag{1}$$

式中, $T_i(r, z, t)$ 为 t 时刻第 i 层的温度; ρ_i 为第 i 层材料的密度; c_i 为第 i 层材料的比热; k_i 为第 i 层材料的热导率; $g_i(r, z, t)$ 为沉积在第 i 层材料中的激光能量, 各层结构之间满足温度连续及热流平衡条件。

建立图 2 中所示坐标系, 假定激光束垂直入射于 CCD 芯片表面, z 向为 CCD 纵向, r 向为 CCD 径向, 入射激光的光斑半径为 ω_0 。微透镜阵列一般用聚酰亚胺 (PI) 制作而成, 这种材料对 1.06 μm 波长激光有着接近 100% 的透过率, 按照电磁理论, 它对此波长激光的线性吸收系数极低; 而铝膜对此波长激光的吸收系数为 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$, 相对较高, 其趋肤深度仅有数纳米, 综合以上考虑, CCD 中的热源项选取在遮光铝膜层。沉积在铝膜层的激光能量为 $g = \alpha(1 - R)I(r, z, t)$; 其中 R 是铝膜对 1.06 μm 波长激光的反射率; α 为铝膜对此波长激光的吸收系数; $I(r, z, t)$ 是激光的功率密度分布, 可以表示为^[6]:

$$I(r, z, t) = I_0 f(r) m(z) g(t) \tag{2}$$

式中, I_0 为脉冲宽度内光斑区域的光强峰值; f, m 和 g 分别为与芯片的径长、厚度和辐照时间相关的函数。设入射的激光光束为高斯分布, 在 $t = 0$ 时刻正入射到芯片表面, 铝膜对光能的吸收呈现指数规律, 则有:

$$I_0 = \frac{E_0}{2\Delta t \pi \omega_0^2} \tag{3}$$

$$f(r) = \exp(-2r^2/\omega_0^2) \tag{4}$$

$$m(z) = \exp[-\alpha(z - z_1)] \tag{5}$$

$$g(t) = \exp\left[-\frac{2(t - \Delta t)^2}{\Delta t^2}\right] \tag{6}$$

其中, E_0 为脉冲激光能量; ω_0 为激光光斑半径; Δt 为脉宽半宽度 ($1/e^2$); z_1 为微透镜阵列的厚度。

边界条件:

芯片上表面和空气之间自由对流, 对流换热系数 $h = 5 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{C})$; $r = 0$ 的轴上边界满足 Neumann 绝热边界条件: $\vec{n} \cdot (k_i \nabla T) = 0$; 下表面和右边界满足 Dirichlet 恒温边界条件: $T = 23 \text{ C}$;

初始条件: $T_0 = 23^\circ\text{C}$;

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。对于轴对称分布的温度场,根据热弹性理论、应力的平衡方程、应力应变的几何方程及广义胡克定律,可解出其热应力分布的表达式为^[6-7]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left(\frac{1}{R_0^2} \int_0^{r_0} T r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right) \\ \sigma_\theta = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left(\frac{1}{R_0^2} \int_0^{r_0} T r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr - T \right) \\ \sigma_z = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left(\frac{2}{R_0^2} \int_0^{r_0} T r dr - T \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 分别为沿径向、环向、轴向的热应力分量; β 为材料热膨胀系数; E 为杨氏弹性模量; γ 为泊松比; R 为芯片径长; 力学边界为自由边界条件, 将温度场带入表达式即得热应力分布。

3 数值模拟及分析

采用有限元方法对热传导方程和应力方程进行数值求解。为不失一般性, 计算中选取各层厚度分别为: 微透镜层 $3\mu\text{m}$ 、遮光铝膜 $1\mu\text{m}$ 、 SiO_2 层 $0.5\mu\text{m}$ 、Si 电极 $0.5\mu\text{m}$ 、 SiO_2 层 $0.2\mu\text{m}$ 、Si 基底 $30\mu\text{m}$; 计算径向 $100\mu\text{m}$, 激光脉冲宽度 10ns , 波长 $1.06\mu\text{m}$, 光斑半径 $30\mu\text{m}$, 能量密度分别为 $0.4\text{J}/\text{cm}^2$, $0.8\text{J}/\text{cm}^2$, $1.3\text{J}/\text{cm}^2$, 其他参数如表 1 所示。

表 1 材料的热物性参数^[5,8]

	PI	Al	SiO_2	Si
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.53	2.7	2.64	2.52
热导率 $k/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.0012	2.38	0.013	0.27
比热 $c/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.09	1.05	0.787	1.009
热膨胀系数 β/K^{-1}	2×10^{-5}	2.29×10^{-5}	5×10^{-7}	2×10^{-5}
杨氏模量 $E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	4×10^9	6.8×10^{10}	7.78×10^{10}	1.07×10^{11}
泊松比 γ	0.3	0.3	0.17	0.2
熔点 $T_m/^\circ\text{C}$		658.7	1607	1412

截取 $t = 50\text{ns}$ 时的计算结果进行分析。图 3 为光斑中心处沿厚度方向的温度分布, 温度峰值出现在遮光铝膜层, 沿其临近的 PI 层和 SiO_2 层方向温度迅速下降, 越高的激光能量密度造成的温升效应也越明显; 图 4 为铝膜和 PI 微透镜界面处温度的径向分布, 温度场与激光的能量分布相仿近似为高斯型分布, 由中心向边缘逐渐下降, 在激光能量密度

为 $0.4\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 此交界面处的最高温度为 230°C 。聚酰亚胺是一种高分子材料, 具有优良的力学性能和化学稳定性, 可以长期工作在 200°C 左右的环境中, 因而激光不会造成芯片结构的破坏, 激光辐照下 CCD 探测器可能出现像元饱和, 但不会永久失效。当激光能量密度升高到 $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ 时, Al-PI 交界面处的最高温度为 438°C , PI 微透镜阵列在此温度下已经开始出现玻璃化消融, 并发生化学分解, 微透镜的损伤将造成 CCD 像元的开口率发生变化, 进而导致 CCD 感光度不均匀, 影响到 CCD 的成像质量。

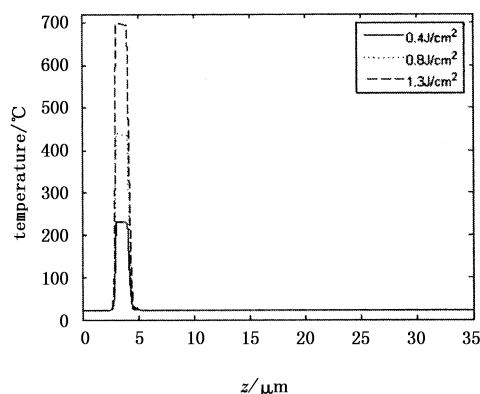


图 3 温度场的径向分布

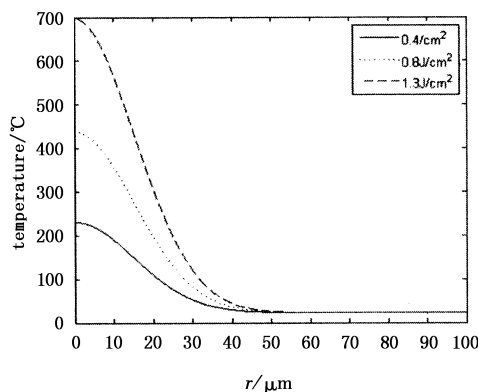


图 4 温度场的纵向分布

图 5 为环向热应力沿纵向的分布, 它在应力破坏中占据主导作用, 铝膜的热膨胀系数相比 SiO_2 较大而与 PI 接近, 膨胀变形后受 SiO_2 层约束产生压应力, 压应力的峰值出现在铝膜层, 在此层两侧沿轴向迅速减小, 在 $4.08\mu\text{m}$ 处转化为拉应力, 拉应力的峰值出现在 $5.6\mu\text{m}$ 附近。图 6 为铝膜与硅氧化物交界面处的环向应力沿径向的分布, 体现为压应力, 由光斑中心向边缘逐渐下降, 在光斑中心处应力值最大, 当激光能量密度为 $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 由图 4 知温度并未超过铝膜的熔点, 但是光斑中心的应力已近

400MPa,这与文献[2]中所述的 Al 与 SiO₂ 的层间附着力接近,铝膜有可能与 SiO₂ 层发生部分的分离,激光通过铝膜边缘的反射、衍射进入垂直移位寄存器,造成 CCD 的漏光现象,由于垂直移位寄存器串行的工作方式,将在 CCD 的竖直方向拉出线状或带状白色的噪声。当激光能量密度升高到 1.3J/cm² 时,铝膜的最高温度为 682℃,已达到铝材料的熔点,并且热应力也进一步增大,铝膜的熔融损伤与应力损伤同时存在,铝膜大面积剥落,漏光现象将更加严重,事实上 CCD 芯片的电路布线利用的也是遮光铝膜层,它的熔融有可能造成电极及时钟线间的短路或断路,足以对 CCD 的成像造成致命的破坏。可以预见,若进一步提高激光的能量密度,破坏会继续向纵深发展,当伤及时钟脉冲的硅电极时,CCD 将会彻底失效。数值模拟得到的 CCD 多层结构的损伤顺序、损伤阈值及在不同激光能量密度下可能出现的损伤现象,与相关文献的实验结果基本相一致^[1-2],证明了所建立热力耦合模型的有效性。

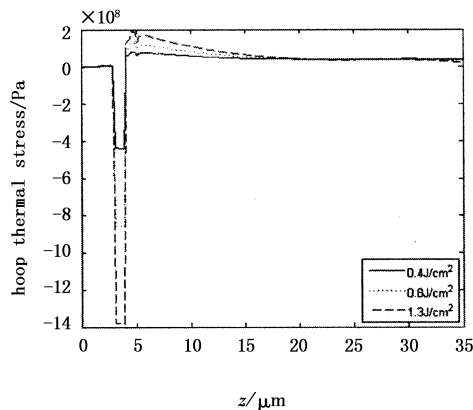


图5 环向热应力的纵向分布

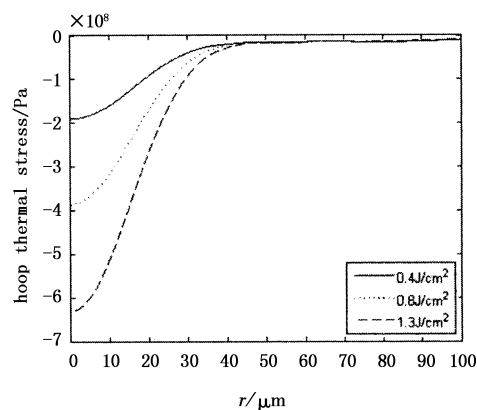


图6 环向热应力的径向分布

4 结论

分析结果表明:CCD 表面的微透镜阵列是最易受到损伤的部位,也是损伤的起始部位,它的损伤将造成 CCD 感光度不均匀以致影响到其成像质量,随激光能量密度的逐步增大,遮光铝膜开始出现熔融损伤及应力损伤,它的剥落使得激光直接射入垂直移位寄存器,造成漏光现象,CCD 出现线状或带状的白色噪声,同时由于遮光铝膜层也是 CCD 的布线层,它的损伤也可能造成 CCD 电路的短路或断路导致 CCD 无法正常成像,若进一步增大激光能量,损伤继续向纵深方向发展,当伤及时钟驱动脉冲硅电极时,将造成时钟线的断路或时钟线间的短路,CCD 探测器将会彻底失效。数值模拟结果和相关文献的实验结果符合较好,证实了所建立模型的有效性。

参考文献:

- [1] 倪晓武,陆建,贺安之. 激光对 CCD 器件破坏时几种阈值的测量[J]. 激光技术,1994,18(3):153-156.
- [2] 钟海荣,陆启生,文铁峰,等. 激光辐射 CCD 的破坏机理分析[J]. 强激光与粒子束,1998,10(4):537-542.
- [3] 王世勇,付有余,郭劲. 激光辐照面阵 CCD 探测器系统局部的干扰效应[J]. 半导体光电,2002,23(2):106-108.
- [4] M F Becker, C Z Zhang, L Blarre, et al. Laser-induced functional damage to silicon CCD sensor arrays[J]. SPIE, 1991,1624:67-79.
- [5] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [6] 牛燕雄,黄峰,段晓峰,等. 脉冲激光对类金刚石薄膜的热冲击效应研究[J]. 物理学报,2005,54(10):4816-4821.
- [7] 平修二. 热应力与热疲劳[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [8] C Y Yin, M J Rizvi, H Lu, et al. Thermal-mechanical analysis of flexible substrates during lead-free solder reflow [C]//1st Electronics Systemintegration Technology Conference,2006.