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*

毕 娟[1)] 张喜和[1)†] 倪晓武[2)]

1)(长春理工大学理学院,长春 130022)

2)(南京理工大学理学院,南京 210094)

(2011 年 4 月 7 日收到;2011 年 5 月 10 日收到修改稿)

以帧转移型面阵 CCD 图像传感器为例,采用有限元法研究了波长 1.06 μm,脉宽 ms 量级长脉冲 Nd:YAG 激光与组成 CCD 传感器的 MOS 光敏单元的作用过程及硬破坏机理. 建立了长脉冲激光辐照 MOS 光敏单元的热力耦合模型,模拟了 MOS 光敏单元的温度分布和应力分布. 研究结果表明:在长脉冲激光作用下,由于 S 层表面径向压应力超过其抗压强度引起 MOS 光敏单元出现了 OS 层间分裂,进而受径向、环向和轴向压应力的共同作用下,在光敏单元还未熔融时,层间分裂就扩大至光敏单元的整个 OS 层间. OS 层间完全分裂会使光敏单元发生硬破坏,并造成 CCD 传感器中激光照射区的单个或一列光敏单元的功能完全失效. 文章的研究结果可为 CCD 图像传感器的激光损伤及防护提供必要的理论依据.

关键词: 长脉冲激光, CCD 图像传感器, 硬破坏机理, 层间分裂

PACS: 42.62.-b, 85.60.Gz

1. 引 言

CCD 图像传感器因具有尺寸小、重量轻、功耗低、灵敏度高等优点,广泛应用于民用和军用领域中作为可见和近红外激光辐射的探测器. 但 CCD 传感器在与激光光源配合使用时,很容易受到激光的破坏以致不能正常工作. 因此,开展激光对 CCD 的破坏机理研究对丰富激光损伤机理数据库及改善 CCD 的抗激光加固措施具有很重要的理论和实际意义.

近年来,国内外许多学者对激光辐照 CCD 传感器的破坏效应进行了大量研究,包括器件光学性能退化[1—3]和电学性能退化[1]的软破坏,以及激光束直接作用于 CCD 传感器引起器件中材料和结构的硬破坏[4,5]等研究. 需要说明的是,上述工作主要针对不同波长的连续波、短脉冲或超短脉冲激光对 CCD 传感器的辐照效应,但脉宽为 ms 量级的长脉冲激光对 CCD 传感器的辐照效应研究鲜有报道. 而长脉冲激光由于具有峰值能量密度高于连续波激光,同时能避免短脉冲或超短脉冲激光辐照时产生的等离子屏蔽现象以及热耦合效率较高等优点近年来在很多领域兴起,并陆续开展了一些材料如铝合金、光学薄膜、砷化镓的激光损伤研究[6—8]. 当长脉冲激光照射 CCD 传感器时,热效应将提高 CCD 传感器的破坏效率.

鉴于光敏单元是 CCD 传感器的重要组成部分,若光敏单元受到长脉冲激光直接照射而引起不同程度的破坏,则对整个 CCD 传感器来说,也将受到不同程度的影响. 因此,本文以帧转移型面阵 CCD 图像传感器为例,针对长脉冲激光与组成 CCD 传感器的 MOS 光敏单元的作用过程及损伤进行理论和数值模拟研究. 文中首先建立长脉冲激光辐照 MOS 光敏单元的物理模型,然后模拟光敏单元的温度和应力分布,最后根据计算结果分析其硬破坏机理.

* 国防基础科学研究计划(批准号:A3620060122)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zxh_cust@yahoo.com.cn

©2011 中国物理学会 Chinese Physical Society

2. 理论和数值方法

2.1. 帧转移型面阵 CCD 图像传感器、MOS 光敏单元的结构及工作原理

帧转移型面阵 CCD 图像传感器结构如图 1 所示,包括光敏区、存储区、水平移位寄存器和输出放大器 4 个主要组成部分. 光敏区为 CCD 传感器的光敏单元阵列,其中每个光敏单元就是一个 MOS 电容器,该 MOS 电容器是由金属(M)-氧化物(SiO_2)-半导体(S)基底组成,如图 2 所示,其金属栅极常为 Al,SiO_2 层镀在 P 型单晶 Si 衬底上. 光敏单元在光照时间内进行光电转换,各单元随光照强度不同积累电荷. 在积分期间,光敏区捕获一幅图像,即感光阵列接收外界光源照射产生电荷,光敏区和存储区之间不会发生电荷转移. 积分后把这些光生电荷快速转移到存储区,存储区和光敏区在结构上完全相同,但是存储区被一层金属铝屏蔽,不会曝光. 存储区的电荷通过水平寄存器逐行读出,并最终通过放大器将电荷转换为电压输出.

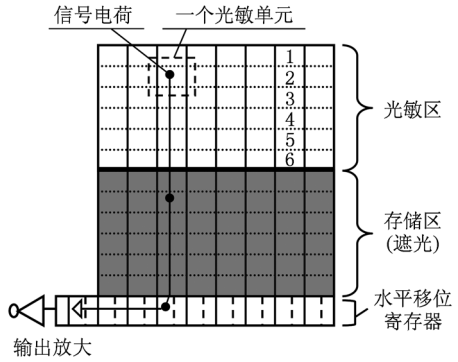

图 1 帧转移型面阵 CCD 图像传感器结构的俯视图

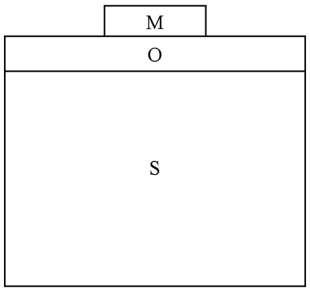

图 2 单个 MOS 光敏单元结构的剖面图

光敏单元在长脉冲激光直接照射下,由于组成光敏单元的材料吸收激光能量引起温度升高进而产生热应力,并可能引起光敏单元发生热力效应损伤. 因此,有必要针对光敏单元进行热力效应模拟.

2.2. 热力耦合模型

当光强为高斯分布的长脉冲激光照射到光敏区,CCD 传感器上一定范围内的光敏单元被覆盖时,由于光敏单元的尺寸很小(为 μm 量级),可认为该范围内的每个光敏单元都被激光均匀照射. 因此,本文对单个光敏单元的实际构造进行必要的抽象和合理的简化,最终建立均匀光束辐照 MOS 层状结构的二维轴对称模型,如图 3 所示.

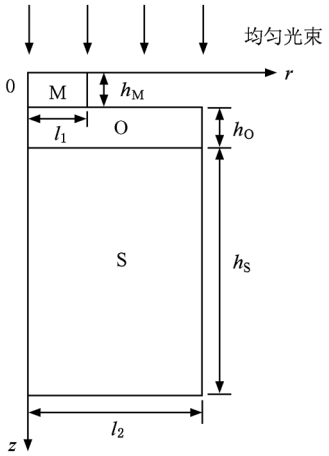

图 3 均匀光束辐照 MOS 层状结构的轴对称模型示意图

对各层材料均为各向同性且均匀的 MOS 结构,热传导和热弹性耦合的基本方程组可描述为[7]

$$\rho_j c_j \frac{\partial T_j}{\partial t} - k_j \nabla^2 T_j = Q_j,$$

$$\nabla^2 u_{rj} - \frac{u_{rj}}{r^2} + \frac{1}{1-2\mu_j}\frac{\partial \varepsilon_j}{\partial r} - \frac{2(1+\mu_j)}{1-2\mu_j}\beta_j \frac{\partial T_j}{\partial r} = 0,$$

$$\nabla^2 u_{zj} + \frac{1}{1-2\mu_j}\frac{\partial \varepsilon_j}{\partial z} - \frac{2(1+\mu_j)}{1-2\mu_j}\beta_j \frac{\partial T_j}{\partial z} = 0, \qquad (1)$$

式中,T_j 表示第 j 层材料在 t 时刻的温度分布;ρ_j, c_j 和 k_j 分别表示材料的密度,比热和热传导系数;Q_j 是体热源,表示激光作用产生材料所吸收的激光能量;j = M,O,S 分别表示 M 层,O 层和 S 层. u_{rj} 和 u_{zj} 分别表示位移在 r,z 方向上的分量;ε_j,μ_j 和 β_j 分别表示体应变,泊松比和材料的热膨胀系数. 其中体热源 Q_j 可写成以下形式:

1)当 r 在 0—l_1 范围内,由于 M 层 Al 对入射激光的趋肤效应,激光能量的吸收只发生在金属的表面层,反映在计算模型上则可以将作用激光看作初

始时刻在 Al 表面有一功率密度为 I_0 的热源,这样 M 层的体热源 Q_M 就可以改为边界条件中的面热源来表示:

$$-k_M \frac{\partial T_M}{\partial z}\bigg|_{z=0} = A_M I_0 g(t). \quad (2)$$

这里,A_M 为 Al 表面对激光的吸收率;I_0 为照射光束的功率密度,文中取 I_0 为高斯分布激光的中心光强值;$g(t)$ 为激光的时间分布,对于单个长脉冲激光,可认为 $g(t) = 1$. 并且该范围内的 O 层和 S 层没有外界热源的作用,因此 $Q_O = Q_S = 0$.

2)当 r 在 $(l_2 - l_1)$—l_2 范围内,入射激光可以分别穿透进 O 层和 S 层内一定深度,则

$$Q_O = \alpha_O |E(z)|^2 n_O I_0, \quad (3)$$

$$Q_S = \alpha_S A_S I_{S0} e^{-\alpha_S z}. \quad (4)$$

这里,α_O 和 α_S 分别为 O 层和 S 层材料的吸收系数;$E(z)$ 表示 O 层内的电场强度分布,可根据麦克斯韦方程组和 O 层材料的特性矩阵求得[9];n_O 表示 O 层材料的折射率;A_S 为 S 层材料对激光的吸收率;I_{S0} 为入射到 S 层表面的光强,表示为 $I_{S0} = I_0 e^{-\alpha_O h_O}$.

在计算过程中,假设系统的所有边界均满足绝热条件,并且由于作用过程中辐射和对流损失很小,计算时可忽略辐射和对流损失;系统各层材料的交界面处满足热流及温度连续的边界条件. 另外,除了 S 层侧面和中心轴上取 r 方向位移为零的边界条件外,系统的其他边界均取自由边界条件.

在设置初始条件时,假定初始时系统的温度为 T_0,并认为激光辐照一开始温度分布均匀. 系统的各质点初始位移为零,无初始速度和加速度.

2.3. 数值方法

为了得到激光作用过程中系统内部的温度场,本文采用有限元方法,将空间域离散为有限多个单元体,利用 Galerkin 方法选择权函数,时间域上采用精度较高且无条件稳定的二点差分的 Crank-Nicolson 格式[10],可以得到各节点的温度值,进而利用插值方法得到各离散单元体内部的温度分布. 然后根据位移、应变、应力之间的弹性力学关系,由位能原理的泛函表达式得出确定节点位移的矩阵方程,在系统内温度场分布已知的条件下,即可利用有限元方法求得系统内的热应力. 需要说明的是,本文所采用的有限元方法已通过大量数值验证是正确的[6,8,11].

3. 数值结果和分析

3.1. 激光参数和材料参数

根据上述理论模型,对均匀光束辐照 MOS 光敏单元的温度分布和应力分布进行了数值模拟. 作用激光 Nd:YAG 的波长为 1.06 μm,脉冲宽度为 1 ms,激光功率密度 $I_0 = 5 \times 10^7$ W/m^2. 计算中所采用的材料参数如表 1 所示[7,12]. 初始温度 $T_0 = 300$ K.

表 1 材料热物理性能和力学性能参数

材料	Al	SiO_2	Si
密度/kg·m^{-3}	2700	2500	2520
比热/J·kg^{-1}K^{-1}	1050	841	1009
热传导系数/W·m^{-1}K^{-1}	238	1.19	156
熔点/K	933	1973	1685
吸收率	0.0588	—	0.67
吸收系数/m^{-1}	—	142	5000
折射率	—	1.465	—
杨氏模量/GPa	138	87	107
泊松比	0.33	0.16	0.28
热膨胀系数/K^{-1}	2.29×10^{-5}	0.5×10^{-6}	2×10^{-5}
半径/μm	4	9	9
厚度/μm	0.5	0.1	400

3.2. 长脉冲激光对 MOS 光敏单元的硬破坏机理分析

3.2.1. MOS 光敏单元的温度分布和等效应力分布

图 4 给出了 $t = 1$ ms 时刻 MOS 光敏单元局部的温度分布. 由图中结果可知,在长脉冲激光照射下,MOS 光敏单元内部的温升差别不大,较高的温升集中在光照区的 O 层,并且温升最大值位于光照区 O 层表面边界处,这是由于 O 层在吸收少量激光能量的同时受到 S 层 PN 结的传导热.

由图 4 中的结果还可以看出,在 S 层的一定厚度范围内,光照区 S 层的温升高于无光照区 S 层,而到达某一厚度后,S 层各处温升达到稳定. 这是由于在 S 层的一定厚度范围内,因无光照区 S 层的温升较低,则光照区的热量在热传导的作用下不断向无光照区扩散,当超过该厚度时,由于光强衰减作用的增强,致使在厚度方向,S 层吸收的激光能量减少,引起温升幅度降低至和无光照区的温升幅度接

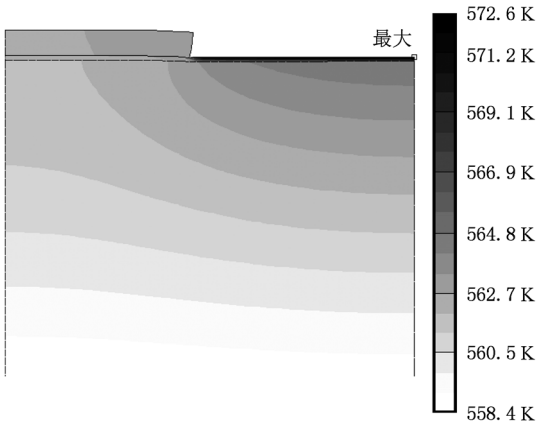

图 4 $t = 1$ ms 时刻 MOS 光敏单元局部的温度分布

近,因此,到达某一厚度后,S 层各处温升达到稳定.

图 5 给出了 $t = 1$ ms 时刻 MOS 光敏单元局部的等效应力(F_{SEQV})分布. 从图中可以看出,应力主要集中在 OS 层间至 S 层一定深度范围内,并且等效应力的最大值出现在光照区的 OS 层间. 进一步分析最大值处 S 层表面(指与 O 层接触的,以下亦同)和 O 层表面(指与 S 层接触的,以下亦同)的等效应力值发现,$F_{SEQV_{S层}} = 2.06$ GPa,$F_{SEQV_{O层}} = 0.55$ GPa,S 层比 O 层高得多,这是由于 S 层硅的热膨胀系数比 O 层二氧化硅的高近两个量级的原因. 由此可知,MOS 光敏单元的等效应力最大值出现在 S 层表面上.

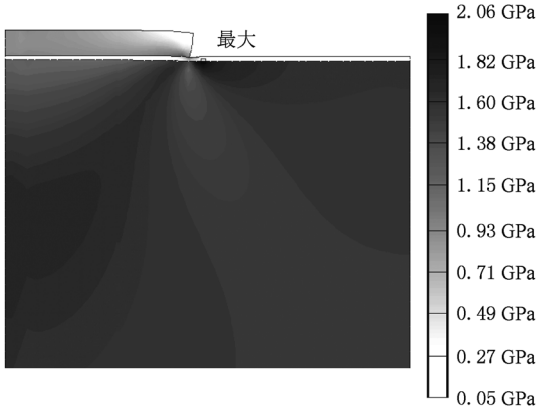

图 5 $t = 1$ ms 时刻 MOS 光敏单元局部的等效应力分布

由图 5 的分析结果可以预测,当注入适当的激光功率密度,S 层表面将首先出现裂纹,又因等效应力的最大值出现在 OS 层间,则此处的层间结合强度会迅速下降,导致 OS 层间分裂,并且 OS 层间分裂的萌生位置正是等效应力最大值处. 另外由于应力集中的影响,裂纹将从此处出发沿层间在光照区扩展,导致光照区的 OS 层间逐步分裂;然后裂纹又从光照区扩展到无光照区,导致无光照区的 OS 层间也逐步分裂.

3.2.2. OS 层间分裂现象分析

由前面分析的结果可知,OS 层间分裂最可能发生在 S 层表面上,因此,分析 OS 层间分裂现象可转化为分析 S 层表面应力分布情况. 根据临界应力判别准则,控制危险点应力循环中的最大应力不得大于应力极限. 所以在激光作用下,当材料的应力超过其应力极限强度时,材料必发生疲劳破坏. 若层状结构中某层材料表面上的径向应力超过其应力极限强度时,将出现沿径向的层间滑移;若层状结构中某层材料表面上的环向应力超过其应力极限强度时,该层材料表面上将出现沿径向展开的裂纹;若层状结构中某层材料表面上的轴向应力超过其应力极限强度时,将出现沿轴向的层间分离.

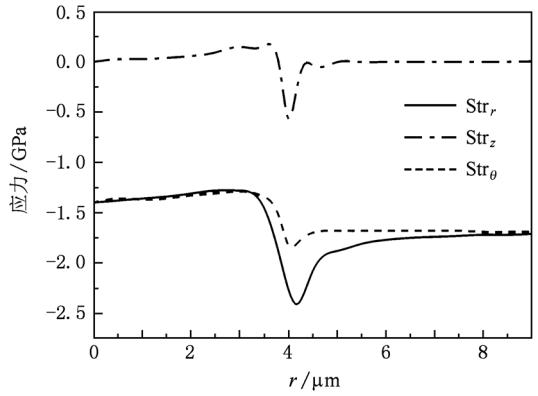

图 6 $t = 1$ ms 时刻 S 层表面径向应力(Str_r)、轴向应力(Str_z)和环向应力(Str_θ)的径向分布

图 6 给出了 $t = 1$ ms 时刻 S 层表面径向、轴向和环向应力的径向分布. 这三个方向的应力都有可能引起层状结构的层间结合强度下降,进而导致层间分裂. 由图 6 中 S 层表面径向应力(Str_r)结果可知,S 层表面上的径向应力全部为压应力,并且压应力值已全部超过其抗压强度(硅的抗压强度是 120 MPa),这表明在整个 OS 层间出现层间滑移现象. 由图 6 中 S 层表面环向应力(Str_θ)结果可知,S 层表面的环向应力全部为压应力,并且压应力值已全部超过其抗压强度,这表明在整个 S 层表面上出现了沿径向展开的裂纹. 由图 6 中 S 层表面轴向应力(Str_z)结果可知,S 层表面轴向应力在无光照区表现为拉应力,在光照区与无光照区交界处转变为压

应力,并且在整个光照区为压应力. 由图 6 可知,在光照区范围内,临近光照区与无光照区交界的微小区域内,S 层表面的轴向应力超过其抗压强度,这表明在该微小区域内出现了沿轴向的层间分离.

从图 6 中的结果还可以看出,S 层表面径向和环向压应力均比轴向压应力高得多,由此可知,径向和环向压应力在 OS 层间分裂现象中起到主要作用. 另外,S 层表面径向压应力略高于环向压应力,由此可知,径向压应力首先引起 S 层表面达到应力极限,引起 OS 层间结合强度下降,进而导致 OS 层间分裂. 因此,S 层表面径向压应力是导致 OS 层间分裂萌生的起因.

综上所述,在长脉冲激光作用下,S 层表面径向压应力引发了 OS 层间分裂,并可能在径向、环向和轴向压应力的共同作用下,引起 OS 层间完全分裂,并且结合图 4 给出的温度分布结果可知,OS 层间完全分裂可能发生在光敏单元熔融之前.

3.2.3. OS 层间分裂对 MOS 光敏单元和整个 CCD 传感器的影响

由上述分析结果可知,激光能量破坏了 Si-SiO_2 键位,使 OS 层间不断分裂. 由于 OS 层间分裂能够削弱氧化膜层对硅的保护和钝化作用,使光敏单元的电性能退化并产生由于潮湿、离子或其他外部污染物引起的漏电流;同时 OS 层间分裂可使 Si-SiO_2 界面处产生大量的缺陷、界面态等,信号电荷在这里容易被各种陷阱俘获,使得 *C-V* 特性曲线发生畸变,电荷转移效率大大降低,引起暗电流噪声. 暗电流和漏电流的产生会形成大量电荷,当这些电荷引起光敏单元内的电荷数超过存储容量时,又会出现由非光生电荷引起的光敏单元饱和,而超出容量的电荷将会直接溢出至串行方向的相邻光敏单元中,此时没有经过读出转移动作.

当 OS 层间分裂扩大至光敏单元的整个层间,对积分期间,该光敏单元将失去积累电荷的能力,引起整个 CCD 传感器的积累电荷效率降低.

如果 OS 层间完全分裂发生在积分后,则该光敏单元内积累的电荷全部不能转移. 由于 CCD 传感器的电荷是串行转移,对一列光敏单元来说,其中一个光敏单元的 OS 层间完全分裂相当于断路,其他处的电荷包不能通过该光敏单元. 若该光敏单元处于一列光敏单元的 1 号至 5 号位置(如图 1 所示),此处断路会引起该光敏单元之前的信号电荷不能转移到存储区;若该光敏单元处于一列中的末尾位置(如图 1 所示的 6 号位置),此处断路导致整个一列的信号电荷都不能转移到存储区. 这个结果造成了整个 CCD 传感器电荷转移效率大大降低,使生成的图像发生失真.

综上所述,OS 层间完全分裂会使光敏单元发生硬破坏,进而导致光敏单元失去积累和转移电荷的能力,即光敏单元的功能完全丧失,造成 CCD 传感器中激光照射区的单个或一列光敏单元的功能完全失效.

4. 结 论

本文以帧转移型面阵 CCD 图像传感器为例,采用有限元法模拟了波长 1.06 μm、ms 量级长脉冲激光辐照 MOS 光敏单元的温度分布和应力分布,并根据计算结果分析了长脉冲激光与单个 MOS 光敏单元的作用过程及硬破坏机理. 得到的结论如下:在长脉冲激光作用下,由于 S 层表面径向压应力超过其抗压强度引起 MOS 光敏单元的光照区 S 层表面上出现了 OS 层间分裂萌生,进而受径向、环向和轴向压应力的共同作用下,在光敏单元还未熔融时,OS 层间分裂就扩大至光敏单元的整个 OS 层间. 研究发现,OS 层间完全分裂会使光敏单元发生硬破坏,进而导致光敏单元失去积累和转移电荷的能力,即光敏单元的功能完全丧失,造成 CCD 传感器中激光照射区的单个或一列光敏单元的功能完全失效.

[1] Zhang C Z, Blarre L, Walser R M, Becker M F 1993 *Appl. Opt.* **32** 5201

[2] Zhang D Y, Zhao J H, Wang W P, Liu C L, Tang X S 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 1050 (in Chinese) [张大勇、赵剑衡、王伟平、刘仓理、唐小松 2003 强激光与粒子束 **15** 1050]

[3] Guo S F, Cheng X A, Fu X Q, Sun Y Q, Wang F, Li W Y, Zhou Y P, Lu Q S, Wen S C 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1783 (in Chinese) [郭少锋、程湘爱、傅喜泉、孙运强、王 飞、李文煜、周玉平、陆启生、文双春 2007 强激光与粒子束 **19** 1783]

[4] Ni X W, Lu J, He A Z 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1795 (in

Chinese) [倪晓武、陆 建、贺安之 1994 物理学报 **43** 1795]

[5] Qiu D D, Zhang Z, Wang R, Jiang T, Cheng X A 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0214006-1 (in Chinese) [邱冬冬、张 震、王睿、江 天、程湘爱 2011 光学学报 **31** 0214006-1]

[6] Qin Y, Chen Y B, Ni X W, Shen Z H, Bi J, Zhang X H 2010 *Opt. and Laser. in Engin.* **48** 361

[7] Wang B, Qin Y, Ni X W, Shen Z H, Lu J 2010 *Appl. Opt.* **49** 5537

[8] Bi J, Zhang X H, Ni X W, Jin G Y, Li C L, Xu L J, Chen Y B 2011 *Lasers in Engineering*. (in Press)

[9] Pronko P P, VanRompay P A, Horvath C, Loesel F, Juhasz T, Liu X, Mourou G 1998 *Phys. Rev.* B **58** 2387

[10] Kong X Q 1998 *The Application of the Finite Element Method in Heat Transfer* (Beijing: Science Press) p134 (in Chinese) [孔祥谦 1998 有限单元法在传热学中的应用(北京:科学出版社)第 134 页]

[11] Chen Y B, Lu J, Ni X W, Bi J, Zhang X H 2008 *J. Mater. Proc. Technol.* **205** 9

[12] Sun C W 2002 *The Effect of Laser Irradiation* (Beijing: National Defence Industry Press) p10—29 (in Chinese) [孙承纬 2002 激光辐照效应(北京:国防工业出版社)第 10—29 页]

Mechanism for long pulse laser-induced hard damage to the MOS pixel of CCD image sensor*

Bi Juan[1)] Zhang Xi-He[1)†] Ni Xiao-Wu[2)]

1) (*School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)

2) (*School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

(Received 7 April 2011; revised manuscript received 10 May 2011)

Abstract

The interaction process between 1.06 μm wavelength Nd:YAG long pulse laser with a millisecond pulse width and the MOS pixel of frame transfer area CCD image sensor and its hard damage mechanism are studied by the finite element method. The thermal-mechanical coupled modeling for long pulse laser irradiation of a MOS pixel is established, and the distributions of temperature and stress are obtained. The results show that the spallations between O layer and S layer appear due to the S layer radial stress on the surface exceeding the compressive strength under the action of the long pulse laser, then it will extend to the entire layer before melting by radial stress, axial stress and hoop stress. Hard damage of pixel occurs as spallation, and one pixel or an array of pixels in the laser irradiation area of CCD sensor is completely in failure. This paper could provide foundation for both laser-induced damage and protection of CCD image sensor.

Keywords: long pulse laser, CCD image sensor, hard damage mechanism, spallation

PACS: 42.62.-b, 85.60.Gz

* Project supported by the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. A3620060122).

† Corresponding author. E-mail: zxh_cust@yahoo.com.cn