

电荷耦合器件硅基底辐照光场研究

高刘正 赵民伟 张威 李颖

中国酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 735000

摘要 对电荷耦合器件(CCD)硅基底的光照能量分布进行了建模分析和实验研究。使用原子力显微镜和扫描电子显微镜获取了 CCD 的关键光学参数,即微透镜表面函数和二氧化硅增厚层厚度。模拟了垂直入射平面光在硅基底表面的能量分布,并与飞秒激光辐照损伤 CCD 的实验图像进行了对比,二者吻合良好。研究表明,微透镜与二氧化硅增厚层的共同作用使得激光能量几乎完全辐照在感光区,激光能量呈哑铃形分布。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 电荷耦合器件; 光场; 折射定律; 菲涅耳公式

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1214004

Light Field on Silicon Substrate of Charge Coupled Device

Gao Liuzheng Zhao Minwei Zhang Wei Li Ying

Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan, Gansu 735000, China

Abstract The distribution of light field on silicon substrate of charge coupled device (CCD) is analyzed via mathematical modeling and experimental research. The atomic force microscope and scanning electron microscope are used to get the critical optical parameters, i. e. the micro lens surface function and the thickness of silicon dioxide thickening layer. The energy distribution of vertical incident planar light on the silicon substrate is simulated and it is compared with the experimental images of femtosecond laser illumination induced damages to CCD and they are consistent with each other. The research results shown that the coaction of micro lens and silicon dioxide thickening layer makes the laser energy almost illuminate at the sensing zone and the laser energy shows a dumbbell-shaped distribution.

Key words laser technique; pulsed laser; charge coupled device; light field; Snell's law; Fresnel formula

OCIS codes 140.3538; 040.1520; 120.5710

1 引 言

电荷耦合器件(CCD)是一种半导体成像器件,具有体积小、功耗低和成像质量高等优点,是光学成像系统和探测系统的核心部件,广泛应用于日常生活、工业生产、教学科研和国防军事等领域。当前,降低 CCD 的激光辐照干扰^[1-2]和损伤是重要的研究方向之一,研究范围遍及毫秒^[3-4]、纳秒^[5-6]、皮秒^[7]和飞秒^[8-9]激光等,已观测到点损伤、线损伤和完全失效三个主要损伤阶段^[6],总结出了二氧化硅绝缘层击穿^[8]、热熔融损伤^[3-4,10]和直接剥离破坏^[9]等作用原理。数值模拟研究主要是以遮光铝膜对光的吸收为基础,分析了热量和热应力对结构材料的损伤^[3,11]。但是,大多数研究未涉及到 CCD 内部光照能量的分布。主要困难是 CCD 为多层复杂精细结构,部分材料及结构参数信息难以获取,导致无法建模。由于激光入射到 CCD 内部后经过多次折射,光照能量分布发生变化,因此研究 CCD 内部感光区的光场对分析 CCD 损伤机理具有重要意义。

本文以 SONY ICX405AL 面阵 CCD 为研究对象,获取了关键的结构和材料参数,数学建模分析了 CCD 感光区表面的光场。根据飞秒激光的无热剥离效应^[8-9,12],进行了飞秒激光辐照损伤 CCD 实验。实验中采用单脉冲辐照,在正常辐照条件下,激光辐照到感光区表面后会迅速发生光电感应,硅基底表面不会留下任何光场痕迹。但是当激光对物质造成损伤时,损伤区域会显示出光场分布的轮廓。对 CCD 受损区域进行扫描观测,获得的损伤区域图像为建模分析结果提供了重要的证据。

收稿日期: 2016-05-10; **收到修改稿日期:** 2016-08-08

作者简介: 高刘正(1987—),男,硕士,助理工程师,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: gaoliuzheng@126.com

2 CCD 结构参数

SONY ICX405AL 面阵 CCD 单个像元的尺寸为 $9.8 \mu\text{m} \times 6.3 \mu\text{m}$, 垂直结构如图 1 所示。其中感光区收集光照产生的电荷, 是激光辐照的主要区域; 传输通道负责电荷的转移及传输; 钨遮光层保护硅电极不被漏光干扰。主要参数: 微透镜材料为聚酰亚胺, 光学折射率为 1.65; 二氧化硅增厚层折射率为 1.46。微透镜材料和二氧化硅对激光的吸收率极低, 可以忽略不计。为计算光照到达硅基底表面的能量分布, 还需要获取的参数是微透镜表面函数和二氧化硅增厚层的厚度。二氧化硅绝缘层厚度为纳米级, 可忽略不计。

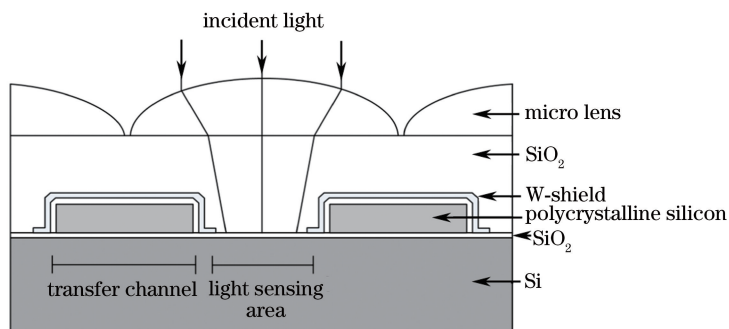


图 1 CCD 单个像元的垂直结构和功能分区

Fig. 1 Vertical structure and functional zones of single pixel unit in CCD

2.1 微透镜表面函数

将 CCD 外包装和电路部分去除, 只留下 CCD 芯片。使用原子力显微镜 (NT-MDT Prima, NT-MDT 公司, 俄罗斯) 对微透镜表面进行扫描, 扫描结果如图 2 所示, 其中不同颜色表示相对微透镜基底的不同高度。选取单个微透镜进行分析, 以透镜的最高点为坐标原点 O , 透镜水平方向为 x 轴, 垂直向上方向为 y 轴, 垂直微透镜表面指向外部为 z 轴正方向, 建立三维坐标系。利用原子力显微镜进行扫描时, CCD 芯片与水平基座间存在垂直或水平角度偏差, 需要通过坐标变换将原始数据进行修正, 可通过微透镜阵列最高点或最低点的数据统计分析来获取偏差角度。

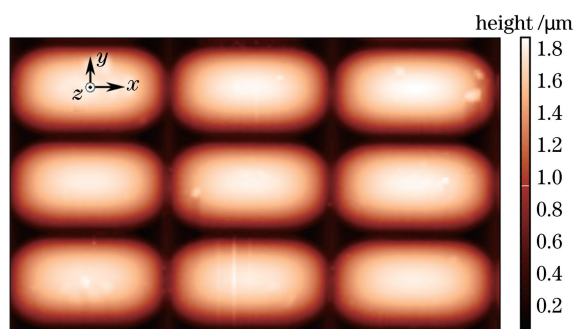


图 2 微透镜表面图像

Fig. 2 Micro lens surface images

分析修正后的微透镜表面数据, 得到微透镜表面函数可近似表示为

$$z(x, y) = a|x|^3 + b|y|^2, \quad (1)$$

式中 a 、 b 分别为水平方向和垂直方向的分布系数, x 和 y 的单位为 μm 。计算得到 $a = -0.0181$, $b = -0.2378$ 。

2.2 二氧化硅增厚层的厚度

二氧化硅增厚层的厚度是 CCD 的截面参数。将 CCD 芯片竖直塑封在聚甲基丙烯酸甲酯 (亚克力) 树脂中, 然后打磨出 CCD 的截面, 使用扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi S4800, 日立公司, 日本) 观察截面微观结构。二氧化硅增厚层的结构如图 3 所示, 厚度 d 为 $3.2 \mu\text{m}$ 。

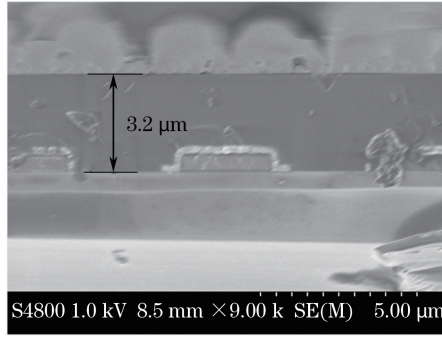


图 3 二氧化硅增厚层截面结构

Fig. 3 Cross sectional structure of silicon dioxide thickening layer

3 硅基底光场分布

3.1 光场分布模拟

激光辐照到微透镜表面会发生折射,进入二氧化硅增厚层后再次发生折射,最后到达硅基底表面,光路如图 4 所示,其中 α 为入射角, β 为微透镜表面折射角, γ 为二氧化硅增厚层表面入射角, θ 为二氧化硅增厚层表面折射角, d 为二氧化硅增厚层厚度。根据折射定律计算光线的位置分布,利用菲涅耳公式计算到达硅基底表面的能量。

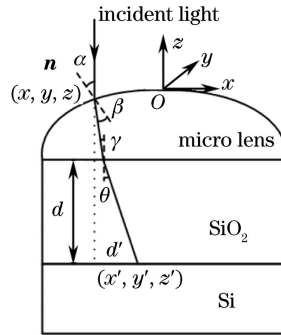


图 4 入射光光路图

Fig. 4 Optical path of incident light

假设入射光为垂直入射平面光,单位能量为 1。入射点在微透镜表面 (x, y, z) 处,那么入射光在与表面法向量 $\mathbf{n} = (\partial z / \partial x, \partial z / \partial y, 1)$ 组成的平面内传播。根据折射定律,可以得到光线到达硅基底表面点 (x', y', z') 与 (x, y, z) 的关系为

$$\begin{cases} x' = x - d' \frac{\partial z / \partial x}{\sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \\ y' = y - d' \frac{\partial z / \partial y}{\sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \\ z' = z - d \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $d' = (2 + y) \tan \gamma + d \tan \theta, \gamma = \alpha - \beta, d = 3.2$ 。

微透镜材料折射率 $n_1 = 1.65$,二氧化硅增厚层折射率 $n_2 = 1.46$,根据折射定律 $\sin \gamma / \sin \theta = n_2 / n_1$ 可知, $\sin \alpha / \sin \beta = n_1$ 。入射角 α 满足关系

$$\cos \alpha = 1 / \sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}. \quad (3)$$

由于光线经过两次折射,反射光能量部分损耗,只计算折射后的能量。根据菲涅耳公式,以 P 波为例,其能量为

$$E = \frac{\sin(2\alpha) \sin(2\beta)}{\sin^2(\alpha + \beta) \cos^2(\alpha - \beta)} \times \frac{\sin(2\gamma) \sin(2\theta)}{\sin^2(\gamma + \theta) \cos^2(\gamma - \theta)}. \quad (4)$$

将 (x, y, z) 遍历微透镜表面函数,可得单位平面垂直入射光在硅基底处的能量分布。使用 Matlab 对(4)式进行数值模拟,得到光场能量分布,如图 5 所示,其中白色框表示硅基底表面感光区域边界。

模拟结果表明,光照在经过微透镜的会聚和二氧化硅的折射后,到达硅基底表面的能量分布呈现局域化,整个能量的分布范围为 $6\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$,呈哑铃形状,几乎全部处于感光区内部(白色线框内)。最大能量区域位于垂直中线的水平两侧,相距约 $4\ \mu\text{m}$,虽然经过两次折射的能量损耗,放大倍数仍高达 40。对于 S 波,分布形状相同,最大放大倍数约为 35。

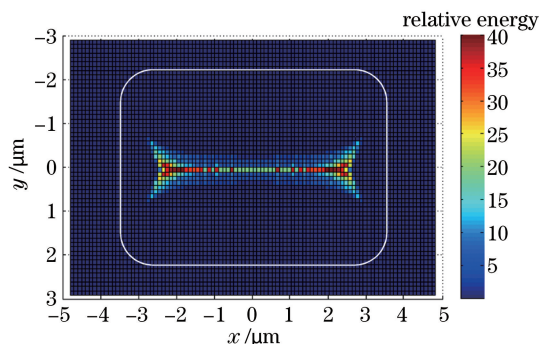


图 5 硅基底表面能量分布的数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation result of energy distribution on silicon substrate surface

3.2 实验结果对比

激光辐照实验所用激光器的波长为 $800\ \text{nm}$,脉冲宽度为 $100\ \text{fs}$,可单脉冲输出。激光器辐射的激光首先经过半波片和偏振分束棱镜进行能量调节,分为能量均匀的两束,一束辐射到能量计上用于测量光功率,另外一束通过凸透镜扩束后辐照到 CCD 表面。CCD 全程处于工作状态,一个位置仅辐照一个脉冲,激光能量缓慢增大,从正常辐照到出现点损伤以及线损伤,损伤状态可以通过 CCD 输出图像判断。对获得的实验样品进行解剖分析:刮去 CCD 损伤样品的微透镜层,用强酸腐蚀掉二氧化硅增厚层,使用 SEM 对损伤区域进行观测。硅基底表面损伤的微观图像如图 6 所示,其中,四周明亮部分为遮光钨材料,中间深色区域为硅基底。图 6(a)为轻微损伤图像,可以看到中间感光区内(白色虚线内)存在两个损伤点,间距约 $4\ \mu\text{m}$;图 6(b)为强烈损伤图像,其中感光区损伤形状呈哑铃形,与理论模拟结果相吻合。实验图像显示,飞秒激光没有对遮光层造成损伤。

理论模拟与实验图像表明,微透镜与二氧化硅增厚层的共同作用,使得入射到 CCD 表面的激光在硅基底表面形成局域分布,其能量被放大。激光能量绝大部分作用于感光区域。

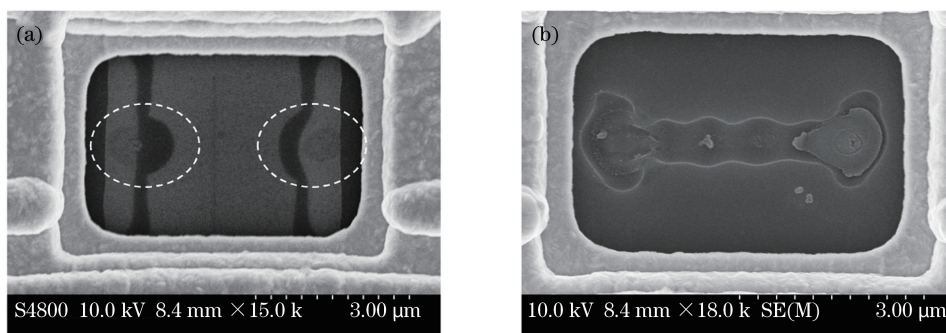


图 6 飞秒激光辐照损伤 CCD 硅基底图像。(a) 轻微损伤图像;(b) 强烈损伤图像

Fig. 6 Images of CCD silicon substrates damaged by femtosecond laser.

(a) Slightly damaged image; (b) strongly damaged image

4 结 论

研究了辐照在 CCD 硅基底的激光能量分布,发现激光在经过微透镜会聚和二氧化硅增厚层的折射后,

到达硅基底表面的光能量呈哑铃形分布,并且局域能量被放大。激光辐照能量绝大部分落在感光区,在损伤初期激光首先与感光区材料发生相互作用。能量的局域放大会降低某些损伤阶段的激光辐照的能量阈值。结论对研究激光对 CCD 的损伤机理具有重要意义。虽然本文只对 SONY ICX405AL 面阵 CCD 进行了分析,但是研究方法具有通用性。

参 考 文 献

- 1 Zhang Jianmin, Zhang Zhen, Feng Guobin, *et al.* Estimating method of jamming thresholds for laser irradiated interline transfer CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0314004.
张检民, 张 震, 冯国斌, 等. 行间转移型 CCD 激光干扰效应阈值估算方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0314004.
- 2 Liu Yi, Zhou Qing, Yin Dayi. Analysis and solution of two-phase FT-CCD charge overflow phenomenon[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080401.
刘 懿, 周 青, 尹达一. 二相驱动帧转移型 CCD 电荷溢出现象分析及解决方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 080401.
- 3 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]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 378-388.
- 4 Li M X, Jin G Y, Tan Y, *et al.* Study on the mechanism of a charge-coupled device detector irradiated by millisecond pulse laser under functional loss[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1257-1261.
- 5 Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices[J]. *Laser Technology*, 1994, 18(3): 153-156.
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.
- 6 Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing, *et al.* Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1449-1454.
沈洪斌, 沈学举, 周 冰, 等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(10): 1449-1454.
- 7 Shao Junfeng, Liu Yang, Wang Tingfeng, *et al.* Damage effect of charge coupled device with multiple-pulse picosecond laser[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(9): 1408-1413.
邵俊峰, 刘 阳, 王挺峰, 等. 皮秒激光对电荷耦合器件多脉冲损伤效应研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(9): 1408-1413.
- 8 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]. *Applied Optics*, 2013, 52(31): 7524-7529.
- 9 Huang Shaoyan, Zhang Yongsheng, Tang Benqi, *et al.* Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1445-1448.
黄绍艳, 张永生, 唐本奇, 等. 500 fs 超短脉冲激光对 CCD 探测器的破坏效应[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(10): 1445-1448.
- 10 Qiu Dongdong, Zhang zhen, Wang Rui, *et al.* Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214006.
邱冬冬, 张 震, 王 睿, 等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214006.
- 11 Jiang Nan, Zhang Chu, Niu Yanxiong, *et al.* Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser and Infrared*, 2008, 38(10): 1004-1007.
姜 楠, 张 雏, 牛燕雄, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(10): 1004-1007.
- 12 Zhao Q Z, Qiu J R, Jiang X W, *et al.* Direct writing computer-generated holograms on metal film by an infrared femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 2089-2092.