

文章编号: 1002-2082 (2021) 03-0534-08

416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 损伤机理研究

欧 渊¹, 石根柱¹, 李点点¹, 吕 勇², 牛春晖²

(1. 军事科学院 系统工程研究院, 北京 100081; 2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘 要: 开展了 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 的损伤实验, 观察到了 CCD 从点损伤到线损伤, 再到面损伤的过程, 并计算出了点损伤、线损伤和面损伤所对应的损伤能量密度阈值分别为 16.7 mJ/cm²~71.9 mJ/cm²、61.0 mJ/cm²~207.8 mJ/cm² 和 352.6 mJ/cm²; 通过对不同损伤状态 CCD 的损伤点表面显微图像的分析, 以及不同损伤状态对应的 CCD 各电极之间电阻值的测量, 得出不同损伤状态主要由二氧化硅绝缘层材料相变引起电阻值改变所产生; COMSOL 软件仿真显示 CCD 各层最先产生熔融的是二氧化硅绝缘层, 能量密度为 420 mJ/cm², 与实验结果相接近。实验结果证明了 CCD 损伤机理分析方法的正确性。

关键词: 电荷耦合器件; 光电对抗; 损伤能量密度阈值; 材料相变

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0307002

Research on damage mechanism of 416 nm nanosecond pulsed laser to CCD

OU Yuan¹, SHI Genzhu¹, LI Diandian¹, LYU Yong², NIU Chunhui²

(1. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Instrumental Science and Photoelectric Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The damage experiment of 416 nm nanosecond pulsed laser to charge-coupled device (CCD) was carried out. The process from point damage to line damage and then to surface damage was observed. The damage energy density thresholds corresponding to point damage, line damage and surface damage were calculated to be 16.7 mJ/cm²~71.9 mJ/cm², 61.0 mJ/cm²~207.8 mJ/cm² and 352.6 mJ/cm², respectively. Through analyzing the microscopic images of the damage point surface of CCD in different damage states and measuring the resistance values between CCD electrodes corresponding to different damage states, it was concluded that the different damage states were mainly caused by the different changes of resistance values caused by the phase change of silicon dioxide insulating layer material. Through simulation of COMSOL software, it was concluded that the silicon dioxide insulating layer was the first layer to melt in each layer of CCD, and the energy density was 420 mJ/cm², which was close to the experimental results and proved the correctness of the analysis of CCD damage mechanism.

Key words: charge coupled device; photoelectric countermeasure; damage energy density threshold; material phase change

引言

电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)是一种半导体固体成像器件,随着 21 世纪信息化时代的到来,CCD 凭借其数字化、高感光度、高灵敏度、体积小等优点,迅速在光电成像系统中得到应用。由于光电成像系统对于入射光束有光学增益

(可达到百万量级)作用,使得处于光电成像系统焦平面处的 CCD 很容易被强激光损伤。当高强度激光尤其是波段内激光辐照到 CCD 器件时,会降低 CCD 的成像质量,严重时甚至会完全损伤 CCD 使之失去成像能力。研究激光作用下 CCD 的损伤机理不但有利于扩展光电对抗手段,而且有利于探究

收稿日期:2020-05-27; 修回日期:2020-12-03

基金项目:国防预研基金

作者简介:欧渊(1984—),男,副研究员,主要从事试验鉴定毁伤评估研究。E-mail: ouy5@163.com

通信作者:石根柱(1969—),男,高级工程师,主要从事靶标总体与毁伤效能评估研究。E-mail: jasonyan9023@163.com

CCD 抗光照加固方法。

国内外已经有许多研究者对激光损伤 CCD 机理展开了研究, 有从理论仿真上探索激光辐照 CCD 产生温升和热应力损伤机理的^[1-6], 有采用连续强激光和脉冲强激光进行 CCD 损伤研究^[7-11], 还有采用不同波长激光进行 CCD 损伤研究^[12-14]。从损伤效果来看, 采用单脉冲高能量激光损伤 CCD 是最有效的手段, 单脉冲峰值功率越高, 越能够用较少能量产生更大损伤。

目前大多数激光损伤 CCD 研究采用的激光为 1 064 nm、532 nm 和 633 nm 等波长, 而对于处于蓝光波段的激光损伤 CCD 研究较少。416 nm 纳秒单脉冲激光用于损伤激光器有以下优势: 1) 在 CCD 通带范围内, 波长越短单个光子的能量越大, 也越容易对分子键实现断裂; 2) 纳秒脉冲可以通过调 Q 方式在单个脉冲中注入更多能量, 使得单脉冲损伤概率更大; 3) 大多数材料对于蓝紫光波段都有较强吸收, 这样很容易把激光能量转换为温升和热应力, 从而引起 CCD 损伤。

本文开展了波长为 416 nm 的纳秒脉冲激光器对 CCD 损伤实验, 在实验中观察到了 CCD 从点损伤到线损伤, 再到面损伤的各个阶段, 并通过显微镜观察损伤后的 CCD 表面形貌, 推断出 CCD 损伤的基本机理。最后, 通过 COMSOL 有限元软件仿真了 CCD 在 416 nm 激光辐照下的温升规律, 计算得到的损伤能量阈值与实验值相吻合, 证实了所推断的损伤机理是正确的。

1 CCD 工作原理及损伤机理

CCD 图像传感器工作方式是将光信号转化为电信号, 图 1(a) 为 CCD 层级结构, 依次为“微透镜层”、“分色滤光层”、“感光层”。微透镜层用以扩展每个像素的感光面积, 提高采光率; 分色滤光层实现色彩信息的形成; 感光层将光信号转化为电信号。CCD 工作区域主要利用感光半导体材料的内光电效应, 在感光层中 CCD 基本像元 MOS 结构以阵列方式紧密排布, 实现信号电荷的产生、存储和转移。CCD 的基本像元 MOS 结构主要包括: 金属、氧化物和半导体, 如图 1(b) 所示。在硅衬底上生长一层 SiO_2 作为绝缘层, 其上再镀一层薄铝作为栅电极, 从而形成 MOS 电容。MOS 电容以阵列方式排布在硅衬底上, 所有像素共用一个 Si 衬底, CCD 通过 MOS 电容器的非稳态状态工作。

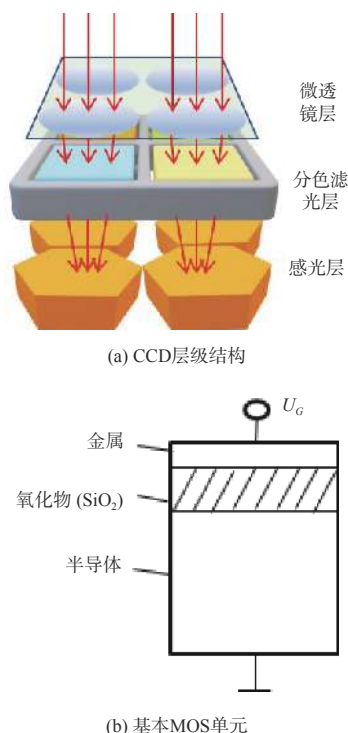


图 1 CCD 结构

Fig. 1 CCD structure

CCD 的工作过程主要包括: 电荷产生、存储以及转移。行间转移型面阵 CCD 构造图如图 2 所示。大致由 4 部分组成: 光敏区(光电二极管)、垂直移位寄存器、水平移位寄存器和信号读出检测电路。行间转移型 CCD 的工作原理是, 当光信号汇聚到不同像元的光敏区时, 根据光强差异转换成不同浓度的载流子电荷, 这些电荷一次性同时读出至各像素的存储区, 即垂直移位寄存器, 在垂直驱动脉冲的作用下, 依次向下传至水平移位寄存器中, 进一步在水平驱动脉冲信号的作用下传输至电荷检测端, 经由检测电路处理后, 将电荷包信号转换成电压信号输出。

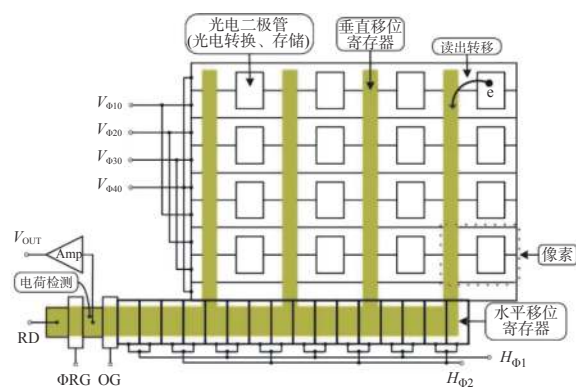


图 2 行间转移型面阵 CCD 构造图

Fig. 2 Structure diagram of inter-line transfer array CCD

激光作用于 CCD 后,依次经过微透镜层、分色滤光层,然后到达感光层,感光层由硅基底和其表面的金属遮光层组成。波长不同 CCD 各层材料吸收系数不同,一般硅基底层和金属层吸收激光能量最多,产生较多热量。产生的热量除了引起自身温度升高,还会通过热传导扩散到周围区域,使各层材料都有不同的温升效应。随着温度的升高,材料状态会发生一系列改变,从而对 CCD 性能产生影响。当温度升高但还没有达到材料熔点时,有可能引起材料的相变,使材料的电导率增大(特别是SiO₂绝缘层),从而引起 MOS 结构中出现微弱电流,产生点损伤。当温度继续升高,达到绝缘层材料熔点时,绝缘层中将掺入部分金属或硅原子, MOS 结构被破坏,损伤点处将有明显电流,形成一个电流源,经过垂直移位,使得整个列都有电荷产生,此时形成线损伤。当熔融区域向周围扩散,使得更多 MOS 结构被破坏,使各转移电极之间产生电连接,从而使整个 CCD 失去电荷转移能力,产生面损伤,此时 CCD 完全失去成像能力。

2 416 nm 纳秒脉冲激光损伤 CCD 实验

2.1 实验

实验装置原理图如图 3 所示。采用波长为 416 nm、脉宽为 5 ns 的脉冲激光作为损伤激光,波长为 632 nm 的氦氖激光器作为指示光源,用于辅助光路调节。图 3 中,光阑用于控制 416 nm 激光出射光斑大小,电子快门用于选取单个 416 nm 激光脉冲;分光镜把 416 nm 激光分为 2 束,一束用能量计探测单脉冲能量,另一束入射到成像镜头,并聚焦于 CCD 表面实现损伤。首先记录 416 nm 远场光斑的位置,然后调整氦氖激光束与 416 nm 激光束平行,在实验阶段,通过观察氦氖激光光斑位置判断 416 nm 激光光束方位。CCD 放置于二维调整台上,可以在 x 和 y 方向进行微调,从而调整

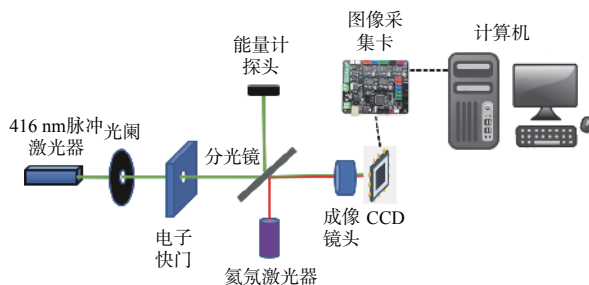


图 3 实验装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

416 nm 激光对 CCD 的不同点进行损伤。

能量计探头采用 Thorlabs 的 ES111C 型号,输入孔径尺寸为 11 mm,可测波长范围 0.185 μm~25 μm,分辨率为 100 nJ,可测能量范围 10 μJ~150 mJ,配套表头采用 Thorlabs 生产的 PM100D。

激光损伤的 CCD 是 Sony 公司生产的型号为 ICX633BKA 的行间转移型固态图像传感器,采用 Ye、Cy、Mg 和 G 的互补彩色马赛克滤光片,总像素数为 537(H)×597(V),有效像素数为 500(H)×582(V),每个像素的尺寸为 9.8 μm(H)×6.3 μm(V)。

2.2 损伤过程

实验中,416 nm 纳秒激光单个脉冲能量是逐渐增加的,并在单脉冲能量增加过程中观察到了点损伤、线损伤和面损伤现象。

416 nm 激光致 CCD 不同位置产生点损伤时 CCD 记录的图像如图 4 所示。图 4(a)、4(b)和 4(c)可以观察到不同的单脉冲引起不同位置的点损伤,损伤点皆为白点,且白点的外侧包围着一圈暗黑点,损伤处基本呈椭圆状。

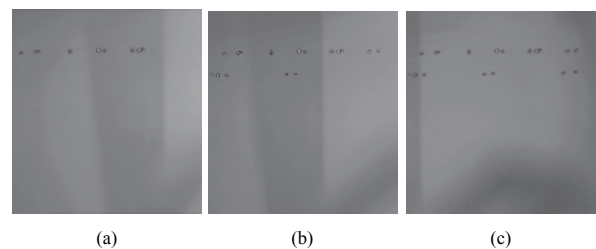


图 4 CCD 不同位置点损伤图像

Fig. 4 Point damage images of CCD in different positions

416 nm 激光致 CCD 不同位置出现线损伤时的图像如图 5 所示。从图 5(a)、5(b)和 5(c)中可观察到,线损伤是由激光作用处的椭圆形白点加纵向贯穿整个幅面的白线组成,各白线线宽基本一致,只是亮度有差异,说明损伤程度不同。

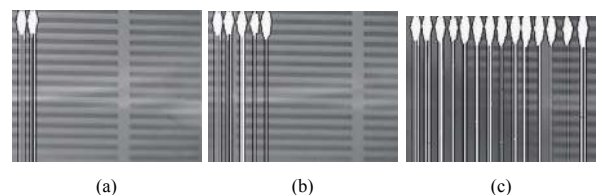


图 5 CCD 不同位置线损伤图像

Fig. 5 Line damage images of CCD in different positions

图 6 所示为 CCD 面损伤图像,此时屏幕呈现中间一条黑线,其他部分都为白屏。当把面损伤后的 CCD 放置 2 个小时再工作,画面仍显示图 6

所示图像,说明此时 CCD 被完全硬损伤,失去了对景物的成像能力。



图 6 CCD 面损伤图像

Fig. 6 Surface damage image of CCD

通过对 5 个 CCD 中每个 CCD 点损伤和线损伤采集不少于 10 组数据,得出了 CCD 各损伤状态下损伤能量阈值的范围,如表 1 所示。由表 1 可以看出,416 nm 单脉冲纳秒激光作用于 CCD 时,不同的能量密度可以产生不同的损伤状态。其中,点损伤对应于能量密度 $16.7 \text{ mJ/cm}^2 \sim 71.9 \text{ mJ/cm}^2$,线损伤对应于能量密度 $61 \text{ mJ/cm}^2 \sim 207.8 \text{ mJ/cm}^2$,面损伤对应平均能量密度为 352.6 mJ/cm^2 。由表 1 可知,各损伤状态对应的损伤能量阈值范围较大,并且点损伤和线损伤的损伤能量阈值有所重叠,这与 CCD 各个像素单元特性的不均匀以及实验过程中激光点作用区域的随机性有关。从激光损伤 CCD 需求来看,需要使 CCD 完全不能成像才能达到目的,因此,应该把面损伤能量阈值作为设计光电对抗装置的参考指标。

表 1 各损伤状态损伤能量阈值

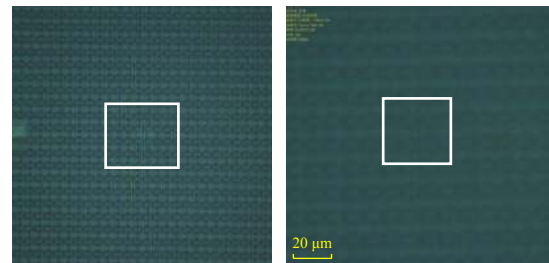
Table 1 Damage energy thresholds for various damage states

损伤状态	损伤能量阈值/ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$
点损伤	16.7~71.9
线损伤	61.0~207.8
面损伤	352.6

3 实验结果分析

图 7 所示为点损伤 CCD 表面的显微图像,其中图 7(a)为微透镜层显微图像,图 7(b)为去除微透镜层后看到的二氧化硅层显微图像。从图 7(a)可以看出,点损伤时微透镜层被轻微漂白(方框内),与周围未损伤区域相比颜色变浅。由 ICX633BKA 型 CCD 的数据手册可知,微透镜层的下方是二氧

化硅加厚层,从图 7(b)中去除微透镜层后看到的二氧化硅层显微图像也可以看到,CCD 损伤点处有轻微的颜色改变,表明在点损伤时,损伤主要产生于内层材料,引起了内层材料的物理特性发生变化。



(a) 微透镜层

(b) 二氧化硅层

图 7 点损伤 CCD 显微图像

Fig. 7 Microscopic image of point damaged CCD

为了进一步研究点损伤机理,测量了 CCD 各引脚之间的电阻值,未损伤 CCD 各引脚之间的电阻值如表 2 所示。 $V1$ 、 $V2$ 、 $V3$ 、 $V4$ 分别代表 4 个垂直移位寄存器驱动电极上的电压, SUB 为基底电压, $H1$ 代表水平移位寄存器其中一个电极上的电压。从表 2 可以看出,在 CCD 未损伤时,各引脚之间的电阻值基本都趋于无穷大,较低电阻值也在 $20 \text{ M}\Omega$ 以上。

表 2 未损伤 CCD 各引脚之间电阻值

Table 2 Resistance values between undamaged CCD pins

	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	SUB	$H1$
$V1$	—	—	—	—	—	—
$V2$	∞	—	—	—	—	—
$V3$	∞	∞	—	—	—	—
$V4$	∞	∞	∞	—	—	—
SUB	∞	25.8	∞	25.8	—	—
$H1$	∞	58.5	∞	58.6	22.9	—
$H2$	∞	∞	∞	∞	24.9	∞

产生点损伤之后 CCD 各引脚之间的电阻值如表 3 所示。与表 2 中值相比较可以看出,各引脚之间的电阻值基本没有明显变化,只是与未损伤时相比 $H1$ - $V2$ 和 SUB- $V4$ 之间的电阻值下降了近 $0.2 \text{ M}\Omega$,而 $H1$ -SUB 之间的电阻值下降了 $0.8 \text{ M}\Omega$,可认为引脚 $H1$ - $V2$ 、引脚 SUB- $V4$ 和引脚 $H1$ -SUB 之间的绝缘层受到轻微损伤,这和图 7 中只看到轻微颜色变化相吻合,说明 CCD 出现点损伤时只轻微破坏

了 CCD 水平驱动电极与垂直驱动电极间的绝缘层,引起电阻值下降,从而产生漏电流,在未有光照时还会有电荷产生,形成白点损伤。

表 3 点损伤 CCD 各引脚之间电阻值
Table 3 Resistance values of CCD pins under point damage

MΩ						
	V1	V2	V3	V4	SUB	H1
V1	-	-	-	-	-	-
V2	∞	-	-	-	-	-
V3	∞	∞	-	-	-	-
V4	∞	∞	∞	-	-	-
SUB	∞	25.8	∞	25.6	-	-
H1	∞	58.3	∞	58.6	22.1	-
H2	∞	∞	∞	∞	24.9	∞

产生线损伤时损伤点处 CCD 微透镜层显微图像如图 8 所示。从图 8 可以看出,此时 CCD 芯片的微透镜层有肉眼可见的明显颜色变化,颜色变浅,说明此时损伤不只发生在内层材料,在最表面的微透镜层也发生了化学变性。

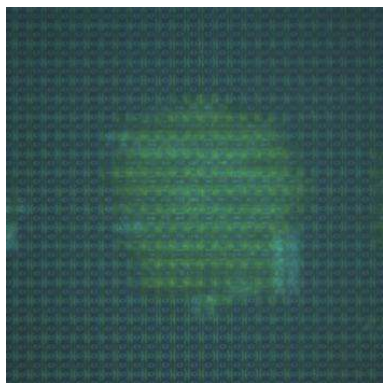


图 8 线损伤 CCD 微透镜层显微图像

Fig. 8 Microscopic image of CCD microlens layer under line damage

表 4 为产生线损伤时 CCD 各引脚之间电阻值。比较表 4 和表 3 可知,引脚 V2-SUB、H1-V2、V4-SUB、H1-V4、H1-SUB 和 H2-SUB 之间电阻值都有不同程度下降,其中 H1-V2 之间电阻值降幅将近 4 MΩ。该结果表明激光进一步损伤了 CCD 水平-垂直驱动电极间的绝缘层,这样会使得损伤点处漏电流进一步增大,从而形成电流源,经垂直移位电极的电荷转移,在同一列中的所有像素上都产生了电荷,对外表现为线损伤。

表 4 线损伤 CCD 各引脚之间电阻值

Table 4 Resistance values of CCD pins under line damage

MΩ						
	V1	V2	V3	V4	SUB	H1
V1	-	-	-	-	-	-
V2	∞	-	-	-	-	-
V3	∞	∞	-	-	-	-
V4	∞	∞	∞	-	-	-
SUB	∞	25.1	∞	25.2	-	-
H1	∞	54.4	∞	54.8	21.8	-
H2	∞	∞	∞	∞	24.5	∞

面损伤时 CCD 微透镜层显微图像如图 9 所示。从图 9 可以看出,在损伤处微透镜层被熔融破坏,熔融处周围的金属网层清晰可见,说明周围区域也发生较轻微损伤;另外,从图 9 还可以看出,硅基底也产生了熔融损伤,其溢出物十分明显,说明损伤深度达到了十几个 μm,把基本 MOS 结构彻底破坏。

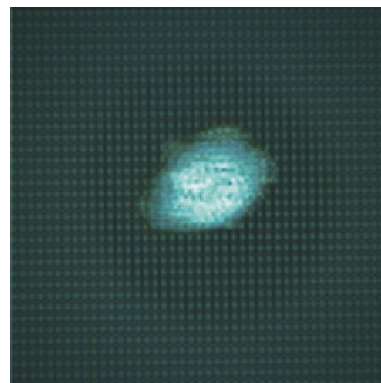


图 9 面损伤 CCD 微透镜层显微图像

Fig. 9 Microscopic image of CCD microlens layer under surface damage

面损伤时 CCD 各引脚之间电阻值如表 5 所示。与表 4 比较可以明显看出,各引脚之间的电阻值均有大幅度下降,特别是垂直移位电极间的电阻值直接由无穷大下降到 kΩ 量级,水平移位电极 H2 与各垂直移位电极间的电阻值由无穷大下降至 MΩ 量级。说明垂直移位电极和水平移位电极都连接到一起,彻底失去了电荷转移能力,此时 CCD 彻底失去成像功能,为完全失效状态。

4 仿真分析

当激光照射到材料表面时,主要以光热模型为主,一部分激光能量被反射,另一部分能量被激光

表 5 面损伤 CCD 各引脚之间电阻值

Table 5 Resistance values of CCD pins under surface damage

	Ω					
	V1	V2	V3	V4	SUB	H1
V1	-	-	-	-	-	-
V2	21.7 k	-	-	-	-	-
V3	32.7 k	27.3 k	-	-	-	-
V4	23.1 k	17.5 k	24.3 k	-	-	-
SUB	10.8 M	10.9 M	10.9 M	10.5 M	-	-
H1	26.8 M	26.8 M	26.9 M	26.4 M	21.6 M	-
H2	30.7 M	30.8 M	30. M	30.6 M	24.3 M	∞

作用区材料吸收, 可以把激光等效为一个二维热源。材料吸收的功率密度根据玻-耳定律可以表示为

$$Q(z) = Q_0(1 - R_i) \cdot e^{-\alpha z} \quad (1)$$

式中: $Q(z)$ 表示距离材料表面 z 处单位体积介质吸收的辐射功率; Q_0 表示介质表面接收的光功率; R_i 为材料反射率; α 为材料的吸收系数 (cm^{-1})。

CCD 吸收热量后在不同材料间进行传导, 假设 CCD 的构成材料是各向同性且均匀的, 其二维轴对称模型的热传导方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (\mathbf{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(z) \quad (2)$$

式中: ρ 是材料的密度; c_p 是材料的比热容; T 是热力学温度; \mathbf{u} 是速度矢量, 代表 COMSOL Multiphysics 模型部分模型在材料框架中移动时由平移运动子节点定义的速度场; ∇ 为几何梯度算子; k 为材料的导热系数; $Q(z)$ 为激光热源; 等号左边第一部分为热量积累, 第二部分为对流项; 等号右边第一部分为热传导项。

方程(2)属于偏微分方程, 对于较复杂结构难以给出解析解, 需要采用有限元仿真软件进行数值求解。

为了进一步对 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 损伤实验现象进行解释, 通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 温升过程进行仿真。

采用如图 10 所示的 CCD 像元几何模型。该模型中金属钨的宽度和高度均为 $1 \mu\text{m}$; 多晶硅电极的宽度为 $1 \mu\text{m}$, 高度为 $0.5 \mu\text{m}$; 硅基底的宽度为 $5 \mu\text{m}$, 高度为 $10 \mu\text{m}$; 多晶硅电极与金属钨之间的二氧化硅层的宽度与高度和多晶硅电极的宽度和高度相同, 多晶硅电极与硅基底之间的二氧化硅绝缘层的高度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

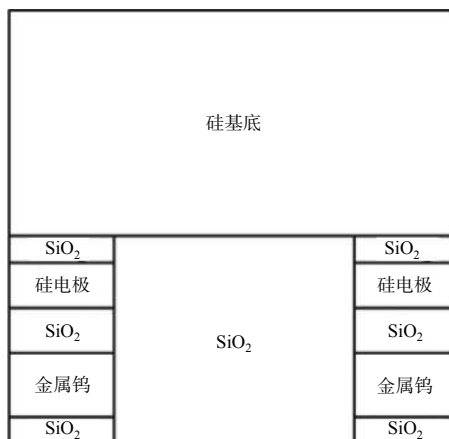


图 10 CCD 像元模型

Fig. 10 CCD pixel model

本模型中未对微透镜层和位于微透镜层和遮光层之间的滤色片的材料进行设置, 是因为这两种材料位于遮光层之上, 对 CCD 产生硬损伤的主要部分二氧化硅层影响较小。

采用能量密度为 420 mJ/cm^2 、脉宽为 5 ns 的单个脉冲作用于 CCD 模型, 得出 5 ns 时温度场分布如图 11 所示。从图 11 中可以看出, 温度最高区域是金属遮光层, 其次是硅基底。图 12 所示为此时纵向温度分布值。从图 12 可以看出, 遮光钨的温度高达 $1800 \text{ }^\circ\text{C}$, 硅电极的温度在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 遮光层下硅基底的温度也在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 可见遮光钨未达到其熔点 $3410 \text{ }^\circ\text{C}$, 且遮光层起到了保护硅电极的作用。因此, 遮光钨层和硅基底的形貌几乎不会变化, 而形貌最可能变化的是与温度最高区域钨相邻的二氧化硅绝缘层。从图 12 可知, 金属钨遮光层相邻的二氧化硅层的温度已经达到了 $1800 \text{ }^\circ\text{C}$, 这一温度值已经超过了二氧化硅的熔点 $1723 \text{ }^\circ\text{C}$, 从而导致二氧化硅出现了熔融。二氧化

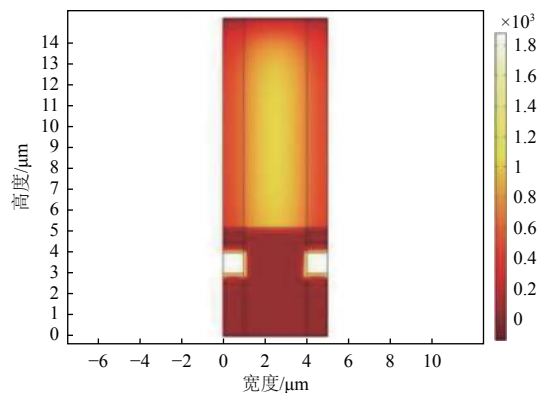


图 11 CCD 像元温度场

Fig. 11 CCD pixel temperature field

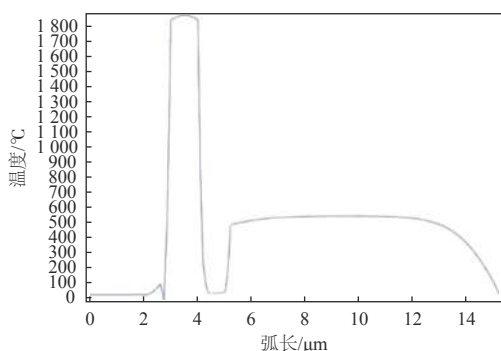


图12 纵向温度变化

Fig. 12 Longitudinal temperature change

硅的熔融将会导致各电极之间的绝缘层损坏,从而把各电极连接到一起,使垂直移位电极和水平移位电极彻底失去转移电荷能力,引起 CCD 完全失效。此时的完全损伤能量密度为 420 mJ/cm^2 ,与表 1 所示的面损伤平均能量密度 352.6 mJ/cm^2 接近,说明实验和仿真结果相一致。

5 结论

综上所述,本文开展了 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 的损伤实验,实验中观察到了随着激光能量密度增加,CCD 出现了从点损伤到线损伤,再到面损伤的过程,并计算出了点损伤、线损伤和面损伤所对应的损伤能量密度阈值,分别为 $16.7 \text{ mJ/cm}^2 \sim 71.9 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $61.0 \text{ mJ/cm}^2 \sim 207.8 \text{ mJ/cm}^2$ 和 352.6 mJ/cm^2 。通过对不同损伤状态 CCD 的损伤点表面显微图像分析,并测量不同损伤状态对应的 CCD 各电极之间电阻值,得出不同损伤状态主要由 SiO_2 绝缘层材料相变引起电阻值不同改变量所产生的。最后,通过 COMSOL 有限元软件仿真得出 CCD 各层最先产生熔融的是 SiO_2 绝缘层,计算得出 SiO_2 熔融时的能量密度为 420 mJ/cm^2 ,与实验结果相接近,说明了本文对 CCD 损伤机理的分析是正确的。

参考文献:

[1] GRIGOROPOULOS C P, BUCKHOLZ R H, DOMOTO G A. A heat transfer algorithm for the laser-induced melting and recrystallization of thin silicon layers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(7): 2304.

[2] SCHWARZ B, RITT G, KOERBER M, et al. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-optoelectromechanical systems[J]. *Optical Engineering*,

2017, 56(3): 034108.

- [3] NIE Jinsong, WANG Xi, LI Hua, et al. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by $1.06 \mu\text{m}$ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 380-386.
- 聂劲松, 王玺, 李化, 等. $1.06 \mu\text{m}$ 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.
- [4] QIU Dongdong, ZHANG Zhen, WANG Rui. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 144-148.
- 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): 144-148.
- [5] HAN Yutao, BI Juan, CHEN Guibo. Numerical simulation on thermal stress of anti-reflection film produced by multiple pulse laser irradiation[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 38(4): 52-56.
- 韩玉涛, 毕娟, 陈桂波. 多脉冲激光辐照增透膜产生热应力的数值模拟[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(4): 52-56.
- [6] ZHANG C Z, WATKINS S E, WALSER R M, et al. Laser-induced damage to silicon CCD imaging devices[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(5): 651.
- [7] ZHANG C, BLARRE L, WALSER R M, et al. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(27): 5201-5210.
- [8] HALL D J, GOW J, MURRAY N J, et al. Optimization of device clocking schemes to minimize the effects of radiation damage in charge-coupled devices[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(4): 1099-1106.
- [9] HAN Min, NIE Jinsong, YE Qing, et al. Damage proceeding and effects of damage on imaging capability of charge coupled device by $1.06 \mu\text{m}$ continuous laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 192-200.
- 韩敏, 聂劲松, 叶庆, 等. $1.06 \mu\text{m}$ 连续激光损伤 CCD 的进程及损伤对成像能力的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 192-200.
- [10] GUO Shaofeng, CHENG Xiangai, FU Xiquan, et al. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1783-1786.
- 郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉, 等. 高重复频率飞秒激光对面

- 阵 CCD 的干扰和破坏 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1783-1786.
- [11] LI Hua, WANG Xi, NIE Jinsong, et al. Influence of pulse width on damage effects of CCD detector induced by laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2): 403-406.
- 李化, 王玺, 聂劲松, 等. 脉冲宽度对 CCD 探测器激光损伤效果的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 403-406.
- [12] MIKAMI K, ISHINO M, DINH T, et al. Laser-induced damage on silica glasses by irradiation of soft X-ray laser pulse [C]. Cham: Springer, 2016.
- [13] HAN Min, NIE Jinsong, SUN Ke, et al. Experiment on the temporal evolution characteristics of a CCD multilayer structure irradiated by a 1.06 μm continuous laser[J]. Applied Optics, 2018, 57(16): 4415-4420.
- [14] SUN Shouhong, GUO Lihong, WANG Lijun. Interference damage to visible light plane array CCD induced by 808 nm laser [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 31(1): 19-21.
- 孙守红, 郭立红, 王立军. 808 nm 激光对可见光面阵 CCD 的干扰损伤研究 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 19-21.