

文章编号: 1001-3806(2016)05-0730-04

## 单脉冲激光损伤 CCD 探测器的有限元仿真

栗兴良, 牛春晖\*, 马牧燕, 吕 勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 为了研究激光对 CCD 探测器的损伤效应, 采用有限元分析的方法进行了激光损伤 CCD 的理论分析和实验验证。阐述了激光辐照 CCD 探测器的损伤机理, 设计了激光辐照 CCD 探测器热效应的仿真模型, 针对波长为 532nm 的高功率激光辐照硅基 CCD 探测器而产生的热效应, 利用有限元法进行了仿真计算, 得到了 CCD 探测器受到 532nm 激光辐照时硅电极的温度曲线以及硅电极损伤时间阈值, 并相应计算出损伤 CCD 探测器所需要的激光能量阈值为 220mJ/cm<sup>2</sup> 左右。结果表明, 损伤阈值随着激光功率密度的增大而减小, 但变化幅度不大; 当多脉冲毫秒激光辐照 CCD 探测器, 在一个脉冲结束、下一个脉冲到来之前, 探测器温度恢复到环境温度。该模型可以较为准确地对单脉冲激光辐照 CCD 探测器时产生的热损伤效应进行模拟。

**关键词:** 激光物理; CCD 探测器; 有限元法; 损伤; 阈值

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.023

### Finite element simulation of damage characteristics of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation

LI Xingliang, NIU Chunhui, MA Muzhan, LÜ Yong

(School of Instrumentation Science &amp; Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science &amp; Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to explore the damage mechanism of charge-coupled device (CCD) detectors under laser irradiation, CCD detectors irradiated by pulsed laser were analyzed theoretically and verified experimentally based on the finite element method. Damage mechanism of CCD detectors irradiated by laser was described and simulation model of thermal effect of CCD detectors irradiated by laser was designed. Simulation calculation was carried out for thermal effect of silicon CCD detectors irradiated by high power laser at wavelength of 532nm by using finite element method. Temperature curve of silicon electrodes and time threshold of silicon electrode damage were obtained. After calculation, the corresponding laser damage threshold for CCD detector was about 220mJ/cm<sup>2</sup>. Simulation result shows that damage threshold decreases with the increase of laser power density and but it changes slightly. When multi-millisecond pulse laser irradiates CCD detectors, detector temperature returns to the ambient temperature before the next pulse and after the former pulse. The model can accurately simulate the thermal damage effect of CCD detectors under single laser pulse irradiation.

**Key words:** laser physics; CCD detector; finite element method; damage; threshold

## 引言

电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 于 1969 年由美国贝尔实验室发明, 具有重量轻、灵敏度高、体积小、功耗低、分辨率高等大量优点, 已经广泛应用于军事、民用领域。例如美国全球鹰无人侦察机上的电子光学/红外线系统, 电子光学系统采用的是柯达数字式 CCD 探测器, 可以实现全时段、全方位的地面

监控。然而 CCD 器件具有极高的探测灵敏度特性, 极易受到激光的干扰和损伤, 所以在光电对抗中, 激光对 CCD 的干扰损伤的研究越来越广泛, 研究内容也越来越深入<sup>[1-7]</sup>。CCD 探测器损伤的实验成本非常高, 一块普通 CCD 系统售价也在千元以上, 同时 CCD 种类繁多, 做一两次实验又不具有代表性, 需要大量的实验数据, 导致大部分研究人员无法承担。随着计算机的发展, 有限元仿真的研究越来越广泛, 有限元分析软件也越来越为人熟知。KORFIATIS 等人对飞秒激光对 Si 的热损伤的围观机理、融化阈值给出了定义及数值计算模型<sup>[4]</sup>。WU 等人基于有限元仿真软件, 仿真计算了单脉冲激光辐照 CCD 时探测器的损伤阈值<sup>[5]</sup>。JIANG 等人利用有限元数值计算了不同能量密度下脉

作者简介: 栗兴良 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光应用与检测的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: 13520185497@163.com

收稿日期: 2015-07-17; 收到修改稿日期: 2015-09-14

冲激光辐照 CCD 的温度场分布<sup>[6]</sup>。LIAO 等人通过实验得出面阵 CCD 的永久破坏阈值比线阵 CCD 低<sup>[7]</sup>。

有限元分析法的应用,使很多研究项目进入了新的天地,不再需要大量损坏 CCD,就可以进行 CCD 损伤研究,显著地降低了成本。相关研究在国内外已大量开展,但由于数值计算的局限性,各物理场模型一般分开计算,多物理场综合作用的研究则较少。本文中的模型将把电磁热、固体传热、相变传热耦合到同一个模型中进行仿真计算,以提高计算精度。

### 1 激光对 CCD 热损伤机理

CCD 典型结构为三明治结构,如图 1a 所示,最上边一层是微透镜,中间一层是分光板,最下边一层是感光元件。当感光元件受到破坏时,CCD 便受到永久性损伤,停止工作。感光层基本单元是金属氧化物半导体(metal oxide semiconductor, MOS),即场效应管。MOS 单元结构如图 1b 所示,最下边是硅衬底,该衬底上镀了一层二氧化硅,然后上边是硅电极。由于硅材料比较容易吸收激光能量,所以硅层的温度升高最快,当硅电极吸收能量达到熔点后融化,硅电极脱落,无法形成电势差,进而无法形成势阱,CCD 也就随之失效。

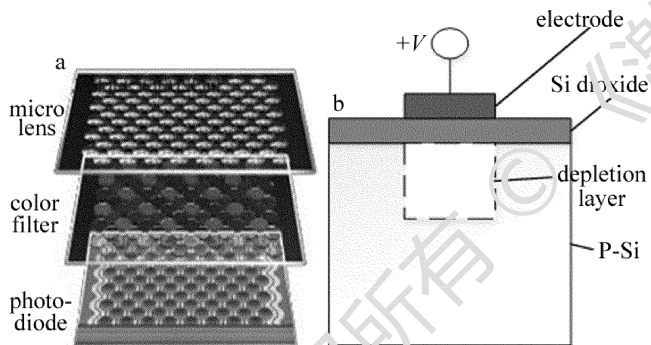


Fig. 1 Structure of CCD detector  
a—sandwich structure b—MOS structure

### 2 仿真模型

根据上面论述的 CCD 三明治结构,采用图 2a 所示的仿真模型。由下而上分别为微透镜阵列、遮光铝膜、SiO<sub>2</sub>层、Si 电极、SiO<sub>2</sub>层及 Si 基底,激光从下而上入射。其中透镜、二氧化硅层、硅层宽度都是 5μm,微透镜厚度为 3μm,遮光铝板厚度 1μm,二氧化硅绝缘层为 0.5μm,多晶硅电极厚度为 1μm,硅衬底厚度为 20μm。模型整体宽度采用周期性模式,设置为无限大,上下面设置为对流边界层。

当激光照射到材料表面时,主要以光热模型为主<sup>[8]</sup>,一部分激光能量被反射,另一部分能量被激光作用区材料吸收,在这个过程中,激光束等效为一个具有一定时间和空间分布的热源。对于材料吸收的功率

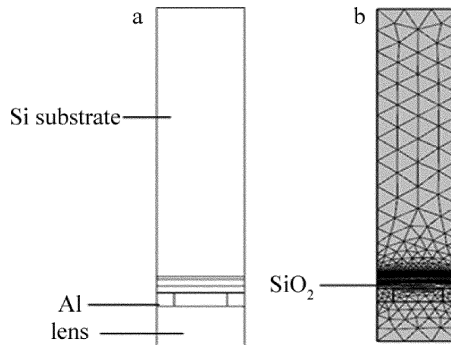


Fig. 2 Simulation model and mesh subdivision  
a—model b—network

密度,可以根据玻意耳定律来表示:

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

式中,  $Q(z)$  为距表面  $z$  处单位体积材料吸收的辐射能量,  $Q_0$  为材料表面接收到的激光功率,  $1 - R_s$  为材料吸收率,  $\alpha$  为材料的吸收系数 ( $\text{cm}^{-1}$ )。

热量传递分为导热、对流、辐射三部分,它们的机理各不相同,方程也不一样。总的传热方程为:

$$\rho c \partial T / \partial t + \rho c (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \nabla (\kappa \nabla T) + Q(z) \quad (2)$$

式中,  $\rho$  是材料密度,  $c$  是材料比热容,  $T$  是绝对温度,  $\mathbf{u}$  是速度矢量,  $\nabla$  为几何梯度算子,  $\kappa$  为材料导热系数。等号左边第 1 项为热量积累,第二部分为对流项,等号右边第 1 项为热传导项。

当材料加热到熔点之后会发生相变,在发生相变的部分,传热方程是有区别的,可以采用等效热熔法来处理传热方程中的相变。设置一个很小的温度区间,假设材料在这个温度区间内发生相变,其中相的含量用一个参量  $\theta$  来表示,相变过程中  $\rho, c, \kappa$  都会发生变化,具体如下:

$$c = \theta c_1 + (1 - \theta) c_2 + L \partial \alpha / \partial T \quad (3)$$

$$\kappa = \theta \kappa_1 + (1 - \theta) \kappa_2 \quad (4)$$

$$\rho = \theta \rho_1 + (1 - \theta) \rho_2 \quad (5)$$

$$\alpha = [(1 - \theta) \rho_2 - \theta \rho_1] / \{2[\theta \rho_1 + (1 - \theta) \rho_2]\} \quad (6)$$

Table 1 Thermodynamic parameters of Si and SiO<sub>2</sub>

	silicon (solid)	silicon (liquid)	SiO <sub>2</sub> (solid)
density/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$2330 - 2.19 \times 10^{-2} T$	$2330 - 2.19 \times 10^{-2} T - 1.21 \times 10^{-2} T^2$	2500
thermal conductivity/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$22.23 + 422.52 \times \exp(-T/255.45)$	62	1.19
specific heat capacity/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$352.43 + 1.78 T - 2.21 \times 10^{-3} T^2 + 1.3 \times 10^{-6} T^3 - 2.83 \times 10^{-10} T^4$	1021.84	841
latent heat/ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1805	—	—
melting point/K	1687	—	1923
dielectric constant	$(4.14 + i \times 0.045)^2$	—	1.46 <sup>2</sup>

式中,  $\theta$  即按海维塞德函数改变, 由于计算不易处理跳变, 故设置成在小温度区间内均匀变化,  $c_1, \kappa_1, \rho_1$  和  $c_2, \kappa_2, \rho_2$  分别为相变之前和之后的比热熔、导热系数和密度,  $L$  为相变潜热。

采用三节点三角形对模型进行剖分, 三角形单元对复杂几何轮廓有较强的适应能力, 很容易通过增加三角形网格数量来精确地逼近复杂的几何边界<sup>[9]</sup>, 如图 2b 所示。Si 材料和 SiO<sub>2</sub> 基本参量如表 1 所示。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同功率密度辐照 CCD 的热损伤研究

不同强度, 不同脉宽的激光辐照 CCD 产生的结果是完全不一样的, 以脉宽为 10ns,  $I = 100\text{mJ}/\text{cm}^2$  的单脉冲激光辐照单个 MOS 元为例, 直径 5nm 的激光经过微透镜汇聚成直径为 3nm 的光斑, 在 10ns 时刻各层温度分布如图 3 所示。从图中可以看出, 硅电极的温度非常高, 硅衬底温度相对较低, 二氧化硅绝缘层和透镜由于不容易吸收激光能量, 温度也较低, 模型各层温度变化梯度较大, 各层之间的温度差别明显。

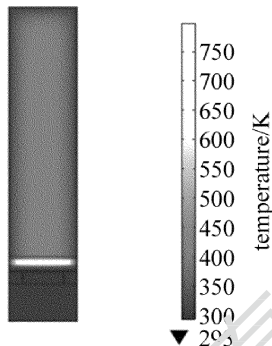


Fig. 3 Temperature distributions (pulse width is 10ns,  $I = 100\text{mJ}/\text{cm}^2$ , time is 10ns)

硅电极的温度随时间变化的曲线如图 4 所示。从曲线可以看出, 当激光辐照探测器时, 探测器温度迅速升高, 在脉冲结束的时候温度达到最大值, 然后温度迅速降低, 在 200ns 左右便降到环境温度。

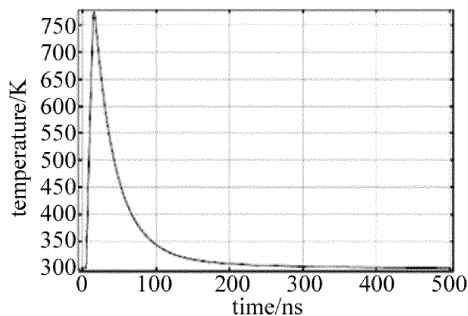


Fig. 4 Temperature change of Si electrode

现在常用的军用激光 YAG 脉冲激光器脉宽一般为 8ns ~ 10ns 左右, 重频为 1Hz ~ 20Hz, 故在激光器发出一个脉冲之后, 探测器温度迅速升高, 在 100ms 发

送第 2 个脉冲之前, 探测器温度已经由于对流等作用, 温度降为环境温度, 当第 2 个脉冲发出之后, 又开始重复第 1 个脉冲的温度响应。所以进行脉冲激光对 CCD 探测器的损伤研究, 可以只研究单脉冲激光 CCD 的损伤效应。在重频作用下, CCD 硅电极被多次破坏, 破坏程度相对大一些。

#### 3.2 不同功率密度辐照 CCD 的热损伤研究

分别以功率密度为  $8 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2, 1 \times 10^7 \text{W}/\text{cm}^2, 3 \times 10^7 \text{W}/\text{cm}^2, 5 \times 10^7 \text{W}/\text{cm}^2, 10^8 \text{W}/\text{cm}^2, 10^9 \text{W}/\text{cm}^2, 10^{10} \text{W}/\text{cm}^2$  7 种功率密度的激光辐照 CCD 探测器进行仿真。当功率密度太低时, 无论辐照时间多长, 都无法达到硅电极的熔点<sup>[5]</sup>, 作者经过仿真验证, 当功率密度低于  $5 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$  时, 便无法达到硅层熔点。

以功率密度为  $10^7 \text{W}/\text{cm}^2$  的激光连续辐照 CCD 探测器, 硅电极温度变化见图 5a。从曲线可以看到, CCD 温度迅速上升, 当辐照时间为 46.5ns 时, 硅电极达到熔化温度, 熔化之后, 温度变化变缓, 这是由于固体 Si 的常压比热容为  $700\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 液体 SiO<sub>2</sub> 的常压热熔为  $1687\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 两种形态的比热熔差别较大。

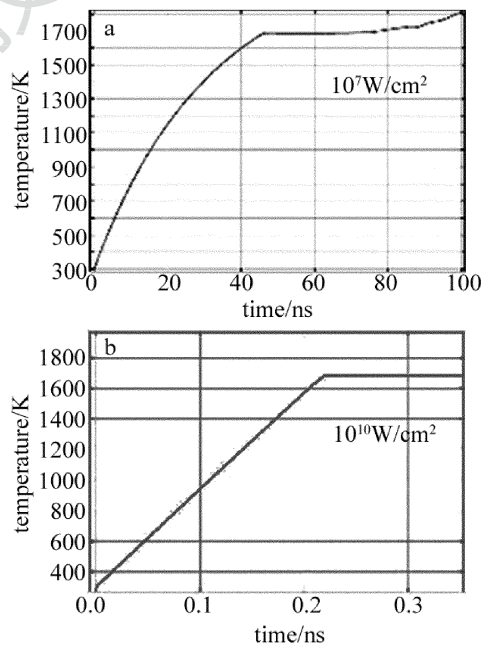


Fig. 5 Temperature change of Si electrode with different power density

利用不同功率密度激光辐照 CCD 探测器, 硅电极达到熔融性损伤的时间阈值如表 2 所示。从表中可以看到, 随着激光功率密度的增大, 硅电极达到损伤的时间阈值变短, 当功率密度为  $8 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$  时, 时间阈值几乎达到了 90ns, 此时激光能量密度为  $893\text{mJ}/\text{cm}^2$ ; 将功率密度增大, 其损伤时间阈值也相应增大, 激光能量密度阈值也迅速降低; 当激光能量继续增大后, 硅电极损伤的阈值趋于稳定, 当把激光功率密度提高到  $10^9 \text{W}/\text{cm}^2$  时, 激光脉冲仅需要 0.22ns 就可以将 CCD

Table 2 Time threshold and energy threshold of melting Si electrode with different power density

power density/(W · cm <sup>-2</sup> )	time threshold/ns	energy density/(J · cm <sup>-2</sup> )
8 × 10 <sup>6</sup>	89.3	0.893
10 <sup>7</sup>	46.5	0.465
3 × 10 <sup>7</sup>	9.2	0.276
5 × 10 <sup>7</sup>	5.1	0.251
8 × 10 <sup>7</sup>	3.1	0.241
10 <sup>8</sup>	2.42	0.242
10 <sup>9</sup>	0.22	0.220
10 <sup>10</sup>	0.022	0.220

探测器击毁,激光的能量密度为 220mJ/cm<sup>2</sup>。激光器功率较小时,击毁 CCD 所需时间较长,CCD 热传导、对流等效应明显,导致所需的激光能量增大。

将功率密度和脉宽都换算成以 10 为基底的对数值,分别以 x 变量、y 变量做图,如图 6 所示。可以看出,经对数换算后,功率密度与时间阈值几乎成线性关系。

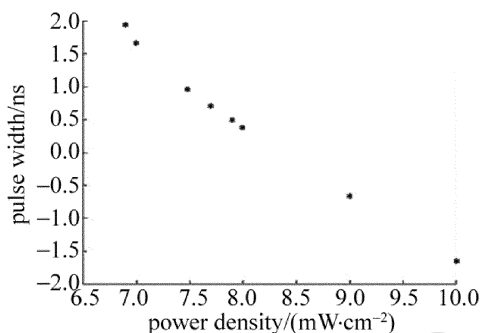


Fig. 6 Time threshold of CCD detector irradiated by 532nm laser

### 3.3 仿真数据与实验对比

国内有部分单位利用 532nm 激光器做过激光辐照 CCD 探测器的实验,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究得比较深入,也进行了大量的实验研究。SHAO 等人利用脉宽为 8ns 的 532nm 激光器进行了辐照可见光 CCD 探测器的损伤实验,当单脉冲激光能量密度为 263mJ/cm<sup>2</sup> ~ 1146mJ/cm<sup>2</sup> 时,CCD 探测器出现无法修复性损伤<sup>[10]</sup>。本文仿真中的数据与其实验数据完全一致。脉冲功率激光技术国家重点实验室的 LI 等人采用不同脉宽激光,对 CCD 探测器进行了损伤实验,得出当脉宽减小导致单脉冲功率密度的量级显著增大时,损伤阈值减小<sup>[11]</sup>的结论。仿真损伤阈值变化趋势也实验相符。

## 4 结论

针对波长为 532nm 的激光辐照 CCD 探测器产生的热损伤效应进行了仿真计算,得出激光功率在每平

方厘米两百毫焦级别时,便能够对 CCD 探测器造成熔融性损伤,仿真数据与实验数据基本相符,变化趋势与实验一致。但由于模型还不够完善,仿真数据与实验数据还有一定的差异。首先实际损伤过程中,由于漏光,有的时候最先损伤的是微透镜和遮光铝膜;其次,由于模型温度的梯度变化,产生的热应力也会损伤遮光铝膜和多晶硅电极。下一步模型优化需要加入热应力场,使计算结果更加接近实际数据。

本研究中所用模型是由参考文献[5]中的模型改进而来,原模型的传热方程未考虑各种材料的相变,但实际上,CCD 结构中易熔材料会在激光加热过程中提前融化,所以作者在对多孔径传热方程中加入相变进行研究,计算结果更加稳定,也更加接近实验结果。

### 参 考 文 献

- [1] MEIDINGER N, SCHMIDTGER B, STRUDER L. Alpha particle, proton and X-ray damage in fully depleted pn-junction CCD detectors for X-ray imaging and spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999, 45(6): 2849-2856.
- [2] TSUKAHIGUCHI T, STEFANOV K D, MIYAMOTO A, et al. Electron and neutron radiation damage effects on a two-phase CCD[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(3): 1280-1291.
- [3] WANG A, GUO F, ZHU Zh W, et al. Comparative study of hard CMOS damage irradiated by CW laser and single-pulse ns laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(9): 43-47 (in Chinese).
- [4] KORFIATIS D P, THOMA K A, VZRDAXOGLU J C. Conditions for femtosecond laser melting of silicon[J]. Applied Physics, 2007, 40(21): 6803-6808.
- [5] WU M, LI X Y, NIU Ch H, et al. Thermal effect simulation of CCD detector under single-laser-pulse irradiation[J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 78-81 (in Chinese).
- [6] JIANG N, ZHANG Ch, NIU Y X. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 1004-1007 (in Chinese).
- [7] LIAO H, SUN N Ch, FENG G Y, et al. Experimental study on 532nm laser-induced failure of array and linear CCD[J]. Laser Technology, 2010, 35(5): 643-646 (in Chinese).
- [8] FENG A X, ZHUANG X H, XUE W, et al. Damage characteristics of polysilicon under wavelength of 1064nm, 532nm and 355nm laser irradiation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 461-465 (in Chinese).
- [9] WANG Ch G, CUI D L. Finite element method of heat transfer and structural analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 2012: 18-20 (in Chinese).
- [10] SHAO J F, LIU Y, WANG T F, et al. Damage effect of charged coupled device with multiple-pulse picosecond laser[J]. Acta Armamentaria, 2014, 35(9): 1408-1413 (in Chinese).
- [11] LI H, WANG X, NIE J S, 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 (in Chinese).