



激光能量密度对CMOS探测器的感光面热应力的影响研究

代金芪 于海龙 王君光 高勋

Influence of laser energy density on thermal stress at photosensitive layer of CMOS detector

DAI Jinqi, YU Hailong, WANG Junguang, GAO Xun

引用本文:

代金芪, 于海龙, 王君光, 等. 激光能量密度对CMOS探测器的感光面热应力的影响研究[J]. *应用光学*, 2024, 45(3): 568–574. DOI: 10.5768/JAO202445.0310011
DAI Jinqi, YU Hailong, WANG Junguang, et al. Influence of laser energy density on thermal stress at photosensitive layer of CMOS detector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 568–574. DOI: 10.5768/JAO202445.0310011

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究](#)

Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation

应用光学. 2018, 39(5): 751–756 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0506003>

[基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计](#)

Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis

应用光学. 2019, 40(6): 1160–1166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605004>

[用于铝板缺陷无损检测的激光超声有限元模拟研究](#)

Finite element simulation in laser ultrasound for non-destructive testing of aluminum defect materials

应用光学. 2019, 40(1): 150–156 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107004>

[PIN光电探测器的建模与仿真分析](#)

Modeling and simulation analysis of PIN photodetector

应用光学. 2019, 40(5): 723–730 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501002>

[纳秒脉冲激光对金属丝电爆炸过程的瞬态测量方法研究](#)

Transient measurement on electric explosion of metal wire by nanosecond pulsed laser

应用光学. 2019, 40(6): 1109–1114 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603005>

[416 nm纳秒脉冲激光对CCD损伤机理研究](#)

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

应用光学. 2021, 42(3): 534–541 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 03-0568-07

激光能量密度对 CMOS 探测器的感光面热应力的影响研究

代金芪¹, 于海龙¹, 王君光², 高 勋¹

(1. 长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要: 开展了入射脉冲激光能量密度对纳秒脉冲激光辐照 CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 光电探测器的感光面(二氧化硅层/硅层交界面)处热应力的影响研究。建立了 CMOS 光电探测器的仿真几何结构模型, 基于傅里叶热传导方程及热力耦合方程组对纳秒脉冲激光辐照下 CMOS 光电探测器感光面中心点温升和热应力进行了仿真计算, 并对入射脉冲激光能量密度对温升时间演化过程以及热应力的空间分布进行了探讨。仿真计算结果表明, 随着入射脉冲激光能量密度增大, CMOS 光电探测器的感光面处峰值温度增加以及热应力增大。在纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器时, 感光面处存在的拉应力使 CMOS 光电探测器先发生力学损伤, 随着激光能量密度增大, 再发生热学损伤。研究结果对于纳秒脉冲激光诱导 CMOS 光电探测器损伤机制以及损伤效果的研究具有一定的理论支持。

关键词: 纳秒脉冲激光; 热应力; 有限元分析; CMOS 光电探测器

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0310011](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310011)

Influence of laser energy density on thermal stress at photosensitive layer of CMOS detector

DAI Jinqi¹, YU Hailong¹, WANG Junguang², GAO Xun¹

(1. School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Optoelectronics Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: A study was conducted on the influence of incident pulse laser energy density on the thermal stress at the photosensitive layer (silicon dioxide layer/silicon layer interface) of a nanosecond pulse laser irradiated complementary metal oxide semiconductor (CMOS) photodetector. A simulation geometric structure model of CMOS photodetector was established. Based on the Fourier thermal conduction equation and thermal coupling equation system, the temperature rise and thermal stress at the central point of the photosensitive surface of CMOS photodetector under nanosecond pulse laser irradiation were simulated and calculated. The influences of incident pulse laser energy density on the temperature rise time evolution process and the spatial distribution of thermal stress were discussed. The simulation results show that as the energy density of the incident pulse laser increases, the peak temperature and the thermal stress at the photosensitive layer of the CMOS photodetector increase. When a nanosecond pulse laser irradiates a CMOS photodetector, the tensile stress at the photosensitive layer causes mechanical damage to the CMOS photodetector first. As the laser energy density increases, the thermal damage occurs. The research results have certain theoretical support for the study of the damage mechanism and damage effect of nanosecond pulse laser induced CMOS photodetector.

收稿日期:2023-10-31; 修回日期:2023-12-11

基金项目:吉林省自然科学基金 (20220101035JC)

作者简介:代金芪 (1998—), 男, 硕士, 主要从事光电对抗技术研究。E-mail: 2227543763@qq.com

通信作者:高勋 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光与物质相互作用研究。E-mail: gaoxun@cust.edu.cn

Key words: nanosecond pulse laser; thermal stress; finite element analysis; CMOS photodetector

引言

随着集成电路设计技术和工艺水平的提高, CMOS 光电探测器正朝着高分辨率、高灵敏度、低噪声、大动态范围的方向不断发展。目前, CMOS 光电探测器在民用、科研、军事等领域均有广泛应用。二氧化硅层/硅层交界面为 CMOS 光电探测器的核心部件感光面, 在光电对抗领域, CMOS 器件的感光面极易受到强激光辐照产生干扰甚至损伤, 从而失去光学成像探测功能。因此, 开展激光辐照下 CMOS 光电探测器的损伤机理研究, 对于 CMOS 光电探测器的激光防护有重要意义。

目前, 研究人员对激光辐照下 CMOS 光电探测器的损伤机理研究主要侧重于实验方面。王昂等人^[1]开展了 1064 nm 单脉冲激光和 1080 nm 连续激光对 CMOS 光电探测器的损伤效果对比研究, 发现脉冲激光作用下 CMOS 光电探测器各阶段损伤阈值都远小于连续激光。邵铭等人^[2]对比了激光对 CMOS 及 CCD(charge couple device) 两种光电探测器的干扰效果, 结果发现要达到相同的干扰面积, 用于 CMOS 光电探测器干扰所需的激光功率为 CCD 光电探测器条件下的 10 倍~100 倍, 这表明 CMOS 光电探测器具有较好的抗激光干扰能力。高润等人^[3]对 632 nm 激光辐照 CMOS 光电探测器产生的干扰现象进行了研究, 发现随着激光功率增大, CMOS 光电探测器的纵向干扰宽度不断增大。朱孟真等人^[4]开展了复合激光对 CMOS 光电探测器的损伤实验研究, 结果表明, 双波长复合激光对 CMOS 光电探测器具有较好的干扰及损伤效果, 双脉宽复合激光融合了毫秒激光的高能量热学损伤以及纳秒激光高峰值功率的热学和力学损伤效果, 提高了 CMOS 光电探测器的激光损伤效果。在理论模拟方面, 目前 CCD 光电探测器的研究较多, 而 CMOS 光电探测器的研究较少。韩敏等人^[5]基于热传导及热弹性力学方程建立了 1.06 μm 连续激光辐照 CCD 光电探测器的热力耦合模型, 结果显示, 在熔融损伤及应力损伤的共同作用下, 探测器硅电极会发生熔融现象而遭到破坏, 探测器 SiO₂ 绝缘层会在应力作用下受到破坏, 从而导致探测器内部发生短路。张巧云等人^[6]建立了 1064 nm 激光辐照 CMOS 光电探测器的有限元仿真模型, 计算得到了激光辐照 CMOS 光电探测器的温度分布曲线。

由于制造工艺问题, CMOS 探测器的列放大器

间存在一定差异, 该差异会导致探测器成像质量下降^[7]。而在高能量密度激光辐照 CMOS 探测器的过程中, 热应力的变化会使探测器感光面处的结构发生变形, 导致探测器列放大器的输出电信号存在差异, 从而使 CMOS 探测器的成像质量受到影。本文将采用有限元仿真方法对纳秒激光脉冲辐照 CMOS 探测器感光面处的热应力进行计算, 为脉冲激光诱导 CMOS 探测器成像功能损伤机制的解析提供一定理论支持。

1 理论模型分析

纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器时, 较小部分激光能量经由探测器光敏结构转化为电信号, 而大部分激光能量被光电探测器吸收转换为焦耳热, 并以热传导的方式在光电探测器内部进行扩散, 基于傅里叶的热传导方程可描述这一过程。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial T}{\partial y}) + Q(x, y, t) \quad (1)$$

$$Q = I(1-R)\alpha \exp(-\alpha y) \exp\left(\frac{-2x^2}{r_0^2}\right)g(t) \quad (2)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1 & NT_0 \leq t \leq NT_0 + \tau \\ 0 & NT_0 + \tau < t < (N+1)T_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为材料密度; C 为材料比热容; K 为材料导热系数; T 为温度; t 为时间; Q 为热源项; I 为辐照在 CMOS 上的峰值功率密度; R 为材料反射率; α 为材料吸收系数; r_0 为激光光斑半径; $g(t)$ 为脉冲激光热源的时间分布函数; T_0 为脉冲激光周期。脉冲激光平均功率与脉冲峰值功率密度间的关系为

$$I = \frac{P}{\pi r_0^2 \cdot \tau \cdot f} \quad (4)$$

式中: P 为脉冲激光平均功率; τ 为脉冲宽度; f 为重复频率。

一般 CMOS 光电探测器由铝、二氧化硅、硅电极、硅衬底等多层材料组成, 而每层材料的热物理性参数存在差异。当高功率纳秒激光辐照 CMOS 光电探测器时, 由于材料受热变形程度不同, 在层与层的交界面处会产生较大的热应力, 从而导致探测器内部材料交界面出现层裂。交界面处产生的热应力可由热弹性方程组进行求解。

$$\begin{cases} \nabla^2 u_x + \frac{1}{1-2\gamma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{2(1+\gamma)}{1-2\gamma} \beta \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ \nabla^2 u_y + \frac{1}{1-2\gamma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{2(1+\gamma)}{1-2\gamma} \beta \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_x 和 u_y 分别表示 x 和 y 方向上的位移分量; γ 、 ε 、 β 分别代表材料泊松比、体应变和材料热膨胀系数。

传统类型的 CMOS 光电探测器为前照式结构^[8], 如图 1(a)所示。当入射光进入探测器后首先经过片上透镜和彩色滤光片, 然后通过金属排线, 最终才能到达光接收层。由于片上透镜只起到聚光作用, 而彩色滤光片只会滤除一些杂散光, 对于单色性较好的激光, 大部分激光能量会透过片上透镜及彩色滤光片。因此在建立模型时, 做简化处理忽略片上透镜和彩色滤光片的影响, 由此可以得到激光与 CMOS 光电探测器作用的仿真模拟结构如图 1(b)所示。其中 Al 层包括铝制金属排线及 CMOS 栅极, SiO_2 为绝缘层, 底层由硅作为衬底材料。

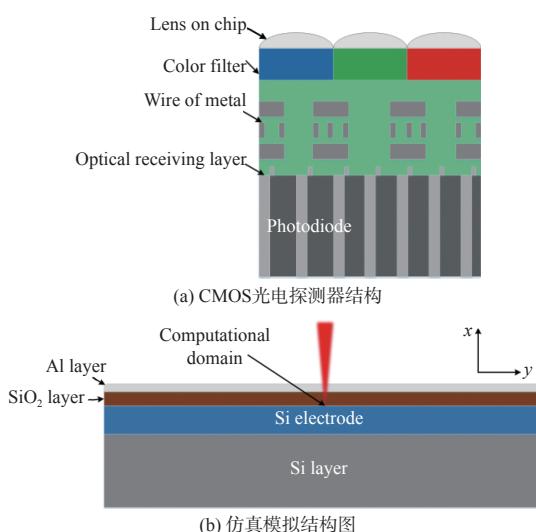


图 1 CMOS 光电探测器结构及仿真模拟结构图

Fig. 1 Diagram of CMOS photodetector structure and simulation structure

CMOS 光电探测器的金属排线有一定开口率, 且 SiO_2 层对 200 nm~1100 nm 范围内的光谱具有较好的透光性, 因此波长为 1064 nm 的激光辐照 CMOS 光电探测器, 大部分激光能量将被底部硅材料吸收, 所以在建立 1064 nm 脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器的理论仿真模型时, 将光源直接加载在硅层。考虑到激光对 SiO_2 绝缘层的破坏会使 CMOS 光电探测器中漏电流增加, 而 Si 电极熔融会使 CMOS 电路发生损伤, 所以在理论仿真计算中将对 CMOS 光电探测器的硅层/二氧化硅层交界面, 即探测器感光面处位置进行计算。设置 CMOS

光电探测器的几何尺寸信息为: Al 层厚度 1 μm , SiO_2 层厚度 0.5 μm , Si 衬底厚度 100 μm , Si 电极厚度 0.5 μm , 仿真模型的整体宽度 550 μm 。为提升计算精确度及求解效率, 对激光作用区域进行网格细化处理, 如图 2 所示。首先对 Al 层上表面、 SiO_2 上表面及 Si 电极层上表面进行边界细化, 3 个边界处最大网格尺寸为 1 μm 。其次, 对 Al 层、 SiO_2 层、Si 电极区域进行划分, 3 个区域最大网格尺寸为 2 μm 。

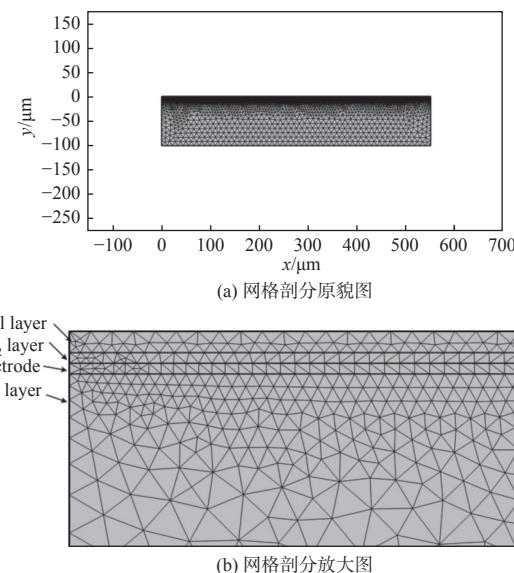


图 2 网格剖分原貌图及网格剖分放大图

Fig. 2 Original appearance and enlarged view of grid meshing

在计算过程中, 假设 CMOS 光电探测器中各层材料均为各向同性, 且各层材料间处于热连续及热平衡, 设置初始环境温度为 $T_i(0)=300 \text{ K}$ 。假设 CMOS 光电探测器的上表面存在对流换热, 其余边界均为绝热状态, 则纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器的初始条件和边界条件为

$$T(h_i) = T(h_{i+1}) \quad (6)$$

$$T_i(x, y, t)|_{t=0} = T_i(0) = 300 \text{ K} \quad (7)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_0) \quad (8)$$

式中 h 表示与环境空气的对流换热系数(5 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)。

纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器的初始时刻($t=0$), CMOS 光电探测器内部材料对应的位移及膨胀速度为 0, 存在:

$$\begin{cases} u_x|_{t=0} = 0 \\ u_y|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_x}{\partial t}|_{t=0} = 0 \\ \frac{\partial u_y}{\partial t}|_{t=0} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器的仿真模拟所需材料热力学参数来源于文献 [9]~[12], 具体数值如表 1 所示。纳秒激光脉冲参数为: 激光输出波长 1064 nm, 脉冲宽度 10 ns, 聚焦到 CMOS 光电探测器表面位置处的光斑直径为 160 μm 。

表 1 材料热物性参数

Table 1 Parameters of material thermal properties

Parameters	Al	SiO ₂	Si
Density/kg·m ⁻³	2700	2640	2330
Coefficient of thermal conductivity/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	238	1.3	148
Specific heat capacity/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	900	787	700
Coefficient of thermal expansion/K ⁻¹	1.37×10^{-5}	5.0×10^{-7}	7.8×10^{-6}
Poisson ratio	0.33	0.17	0.28
Melting point/K	933	1973	1687

2 结果和探讨

在激光脉冲能量密度为(5~50) mJ/cm² 范围内的单脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器过程中, CMOS 光电探测器的感光面处激光作用区域中心点的温度时间演化如图 3 所示。对应的激光作用区域中心点峰值温度随脉冲激光能量密度变化如图 4 所示。激光脉冲作用结束时, CMOS 光电探测器轴向温度空间分布如图 5 所示。

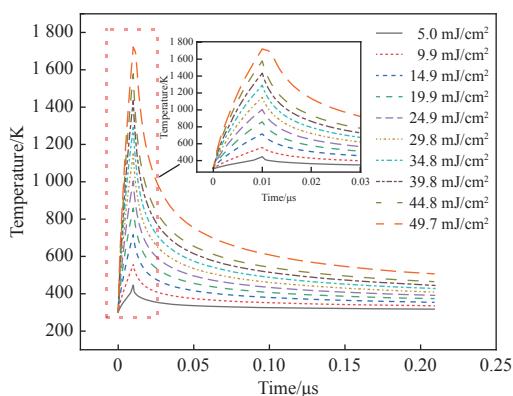


图 3 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器感光面处中心点的温度时间演化

Fig. 3 Temporal evolution of temperature at photosensitive surface center of CMOS photodetector irradiated by nanosecond pulse laser

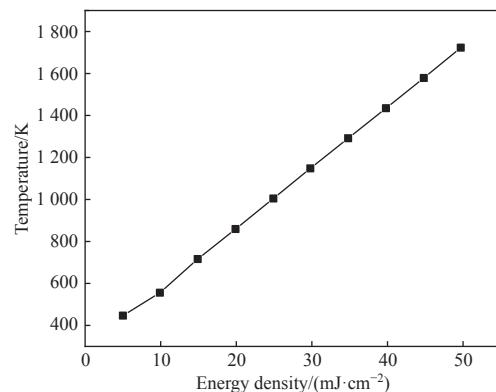


图 4 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器感光面处中心点的峰值温度随脉冲激光能量密度的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of peak temperature evolution with pulse laser energy density at photosensitive surface center of CMOS photodetector irradiated by nanosecond pulse laser

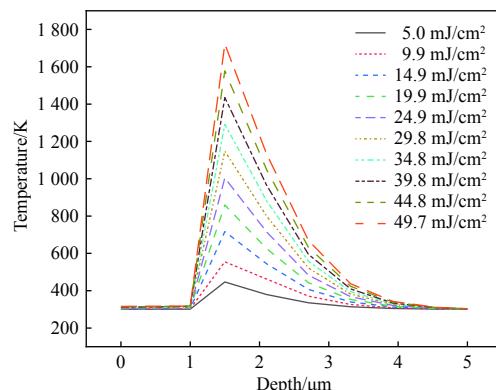


图 5 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器的轴向温度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of axial temperature in CMOS photodetector irradiated by nanosecond pulse laser

当脉冲激光辐照到 CMOS 光电探测器后, 探测器材料吸收纳秒脉冲激光能量, 激光辐照 CMOS 光电探测器感光面中心点的温度增加。当脉冲激光结束后, 由于 CMOS 光电探测器内的热传导以及与空气间的对流换热, 导致温度出现快速下降。当热传导导致 CMOS 光电探测器每层材料间的温度趋于平衡时, 温度下降变缓。当能量密度为 49.7 mJ/cm² 的脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器时, 感光面中心点峰值温度达到 1722 K, 超过了硅材料的熔点 1687 K, 因此在脉冲激光结束后, 可以看到温度下降过程中出现了液-固相变过程。从图 4 可知, 随着入射脉冲激光能量密度的增加, 激光辐照 CMOS 光电探测器感光面中心点的峰值温度呈现增大趋势。当能量密度为 5.0 mJ/cm² 时,

中心点峰值温度最低为 446 K; 当能量密度为 49.7 mJ/cm² 时, 中心点峰值温度最高为 1722 K, 此时中心点温度已超过硅的熔点 (Si:1687 K), CMOS 光电探测器硅电极材料表面出现熔化, 从而使 CMOS 光电探测器开始出现热损伤。入射脉冲激光能量密度越大, 脉冲激光对 CMOS 光电探测器造成的损伤愈严重。从图 5 中可以看出, 在探测器模型深度 1 μm~1.5 μm 处存在较大的温度梯度, 且深度为 1.5 μm 处的温度最高。这是因为探测器铝层有一定开口率, 且二氧化硅对模拟所用的 1064 nm 激光透过率较高, 在仿真过程中将热源直接加载在硅层所导致的结果。由此可以看出, 1064 nm 激光对 CMOS 探测器感光面具有较严重的损伤效果。

图 6 为纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器感光面处脉冲结束时刻 (10 ns) 与仿真截止时刻 (200 ns) 的中心点温度差值随入射脉冲激光能量密度的变化曲线。当入射脉冲激光能量密度为 5.0 mJ/cm² 时, 感光面处的中心点温度差值为 129 K。当入射脉冲激光能量密度增大为 49.7 mJ/cm² 时, 中心点温度差值可达到 1216 K。表明从激光停止辐照 CMOS 光电探测器后, 探测器内部的热传导作用以及探测器与空气间的对流换热导致了 CMOS 光电探测器内部的温度下降, 在相同的降温时间内, 入射脉冲激光能量密度越大, 温度的下降速率越快。

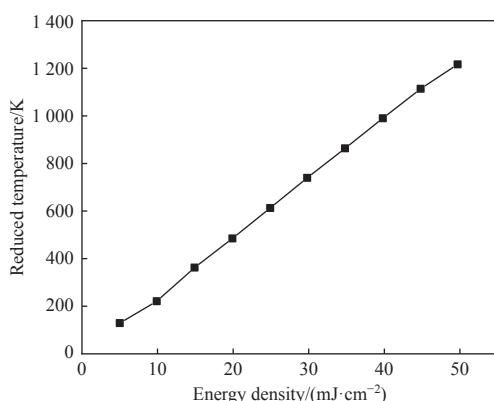


图 6 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器感光面处中心点温度差值随脉冲激光能量密度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of temperature difference evolution with pulse laser energy density at photosensitive surface center of CMOS photodetector irradiated by nanosecond pulse laser

在激光入射方向上, 由于热传导过程中 CMOS 光电探测器不同位置处材料的温度不同, 从而产

生了一定大小的热应力。在 CMOS 光电探测器不同材料交界面处, 由于材料的物理特性不同, 故而存在较大的热应力。在激光脉冲辐照结束时, CMOS 光电探测器的温度最大, 仿真计算得到的 CMOS 光电探测器激光入射方向上热应力的空间分布随入射脉冲激光能量密度的变化曲线如图 7 所示, 对应最大热应力随脉冲激光能量密度变化曲线如图 8 所示。

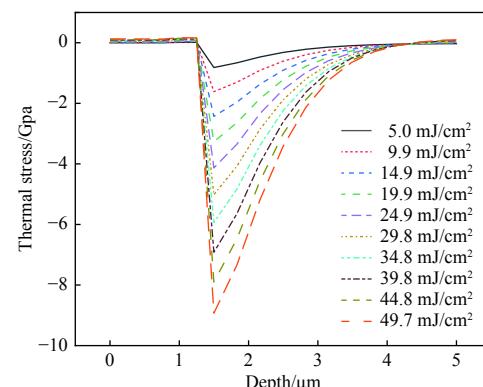


图 7 不同入射脉冲激光能量密度下纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器热应力的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of thermal stress in CMOS photodetector irradiated by nanosecond pulse laser under different incident pulse laser energy density

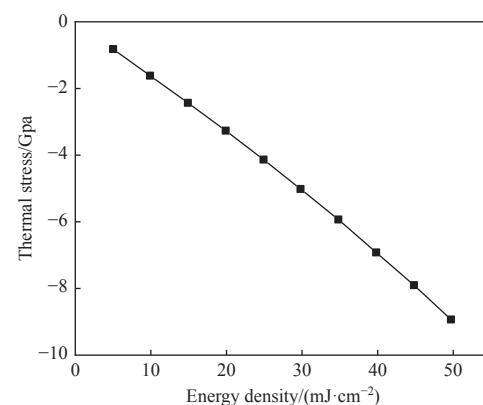


图 8 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器最大热应力随脉冲激光能量密度的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of maximum thermal stress evolution with pulse laser energy density of CMOS photodetector irradiated by nanosecond pulse laser

从图 7 中可知, 在 CMOS 光电探测器深度方向 1 mm~3 mm 处存在较大的热应力, 热应力值呈现先增大后减小的变化。在 1 mm~1.5 mm 深度范围内热应力变化显著, 该空间对应 CMOS 光电探测器的二氧化硅层, 其导热系数较低, 为 1.19 W/(m·K),

致使热量在该层传递较为困难, 从而导致二氧化硅层上下表面存有较大的温度差异, 因此在 $1\text{ mm} \sim 1.5\text{ mm}$ 范围内热应力差值较大。在 CMOS 光电探测器深度方向 1.5 mm 处存在着较大的热应力, 该位置正对应着 CMOS 光电探测器感光面处。在激光能量密度为 5.0 mJ/cm^2 时, CMOS 光电探测器感光面处的热应力最小, 为 -0.82 Gpa ; 当激光能量密度增大到 49.7 mJ/cm^2 时, 该处热应力增加到 -8.93 Gpa 。热应力的负号表征为感光面处存在的热应力为拉应力, 这是由于二氧化硅层和硅层的热膨胀系数不同, 导致了在热传导过程中产生了不同的膨胀位移, 进而在感光面处产生拉应力。

随着入射脉冲激光能量密度的增加, 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器最大热应力呈现增大趋势(见图 8)。这是因为, 随着入射激光能量密度逐渐增大, 激光辐照 CMOS 光电探测器感光面中心点的峰值温度逐渐升高, 使 CMOS 光电探测器二氧化硅层和硅层的热变形程度变大, 从而导致了二氧化硅层和硅层间的拉应力增大。由于 CMOS 光电探测器感光面存在较大的拉应力, 意味着在激光辐照作用下感光面位置易发生层裂现象, 从而导致 CMOS 光电探测器的内部电场发生变化, 进而导致 CMOS 光电探测器发生激光损伤。在激光能量密度为 5.0 mJ/cm^2 时, 激光辐照 CMOS 光电探测器感光面处的拉应力为 0.82 Gpa , 已超过二氧化硅的抗压强度 0.3 Gpa , 说明感光面处已发生层裂。但是感光面处中心点温度为 446 K , 未达到硅和二氧化硅的熔点(硅: 1687 K , 二氧化硅: 1687 K), 该结果表明, 此时 CMOS 光电探测器已经发生力学损伤而未发生熔融损伤。高功率纳秒脉冲激光对 CMOS 光电探测器的损伤是一个复杂的过程, 需要同时考虑 CMOS 光电探测器受到的应力及温度变化情况。仿真模拟计算表明, 纳秒脉冲激光辐照 CMOS 光电探测器导致的应力损伤要早于熔融损伤发生。

3 结论

本文基于有限元方法及热力耦合理论, 建立了脉冲激光辐照下 CMOS 探测器的热效应模型, 模拟了探测器感光面处的温度分布及热应力分布, 并分析了脉冲激光能量密度对温升及热应力的影响。结果表明, 随着激光能量密度的增加, 探测器感光面处温度及热应力均增大。探测器感光面处

存在较大的热应力, 仿真结果显示, 当激光能量密度为 5.0 mJ/cm^2 时, 该处热应力为 0.82 Gpa , 已超过二氧化硅层抗压强度 0.3 Gpa 。这说明在激光辐照下, CMOS 探测器感光面处易发生力学损伤, 从而使探测器成像功能受到影响。本文研究内容对激光诱导 CMOS 探测器功能损伤具有一定的理论支持作用。

参考文献:

- [1] 王昂, 郭峰, 朱志武, 等. 连续激光与单脉冲纳秒激光对 CMOS 的损伤效应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 49-53.
WANG Ang, GUO Feng, ZHU Zhiwu, 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): 49-53.
- [2] 邵铭, 张乐, 张雷雷, 等. $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光对 CCD、CMOS 相机饱和干扰效果对比研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 163-167.
SHAO Ming, ZHANG Le, ZHANG Leilei, et al. Comparative study on saturation effect of $1.06\text{ }\mu\text{m}$ laser jamming CCD and CMOS cameras[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 163-167.
- [3] 高润, 牛春晖, 李晓英. 632 nm 激光对 CCD 和 CMOS 的干扰实验及机理分析[J]. 激光杂志, 2016, 37(9): 5-9.
GAO Run, NIU Chunhui, LI Xiaoying. Experiment and mechanism analysis of 632 nm laser jamming CCD and CMOS[J]. Laser Journal, 2016, 37(9): 5-9.
- [4] 朱孟真, 刘云, 米朝伟, 等. 复合激光损伤 CMOS 图像传感器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 3788.
ZHU Mengzhen, LIU Yun, MI Chaowei, et al. Experimental study on a CMOS image sensor damaged by a composite laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 3788.
- [5] 韩敏, 聂劲松, 豆贤安, 等. 基于激光不同加载方式下 CCD 损伤特性的时间演化规律[J]. *发光学报*, 2019, 40(6): 788-794.
HAN Min, NIE Jinsong, DOU Xian'an, et al. Temporal evolution characteristics of CCD detector based on different laser loading methods[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(6): 788-794.
- [6] 张巧云, 陈青山, 牛春晖. 激光热效应对 CMOS 探测器的干扰机理分析[J]. 激光杂志, 2018, 39(2): 72-76.
ZHANG Qiaoyun, CHEN Qingshan, NIU Chunhui. Jam-

ming mechanism analysis of laser thermal effect on CMOS detector[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(2): 72-76.

[7] 张涛, 李新阳, 李剑峰, 等. 基于自适应多点法的 sCMOS 实时非均匀性校正[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 210036.
ZHANG Tao, LI Xinyang, LI Jianfeng, et al. sCMOS real-time nonuniformity correction based on adaptive multipoint method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(5): 210036.

[8] 温佳起, 卞进田, 李欣, 等. 激光干扰和损伤 CMOS 图像传感器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 3788.
WEN Jiaqi, BIAN Jintian, LI Xin, et al. Research progress of laser dazzle and damage CMOS image sensor (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 3788.

[9] 姜楠, 张维, 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.
JIANG Nan, ZHANG Chu, NIU Yanxiong, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1004-1007.

[10] 毕娟, 张喜和, 倪晓武. 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[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 340-345.
BI Juan, ZHANG Xihe, NI Xiaowu. Mechanism for long pulse laser-induced hard damage to the MOS pixel of CCD image sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 340-345.

[11] 何跃娟, 彭青, 张薇. 金属管材中周向激光热应力场的有限元分析[J]. 应用激光, 2009, 29(4): 317-319.
HE Yuejuan, PENG Qing, ZHANG Wei. Analysis of the laser-induced circumferential thermal stress fields in hollow metal cylinders by finite element method[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(4): 317-319.

[12] 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.