



红外探测系统的激光辐照热效应仿真分析*

袁 磊¹, 王毕艺², 罗 超³, 郇文忠¹, 冉均均¹, 柳 建^{1,3}

(1. 成都理工大学 工程技术学院, 四川 乐山 614007; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308;
3. 核工业西南物理研究院, 成都 610225)

摘 要: 为研究红外探测系统受激光辐照后的热效应与二次热辐射对探测器成像的影响, 使用 Ansys 软件对红外探测器进行热辐射仿真和有限元结构仿真; 采用黑体辐射定律和 DO 辐射计算模型模拟计算探测器内光学系统在不同激光辐照度下的温度随时间变化情况以及探测器内部温升对靶面成像的二次热辐射干扰情况; 采用热弹性力学模型仿真计算探测器内部的热应力和热变形情况。结果表明: 探测器受到 1.06 μm 激光照射, 矫正镜激光辐照度在 50 W/cm^2 时, 靶面受到二次热辐照度在 0.6 s 时达到 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的量级, 使红外探测器达到饱和; 探测器受激光辐照后系统最高温度出现在矫正镜中心处, 拟合得到系统最高温度与受照时间函数关系, 可预测探测器升温结构破坏; 最大热变形出现在矫正镜背面中心处, 由外向内形成不等附加光程差, 干扰探测器的成像效果; 最大热应力出现在矫正镜前面中心处, 得到最大热应力与激光辐照度间的线性关系曲线, 为矫正镜热应力破坏提供预测参数。

关键词: 红外探测; 成像质量; DO 辐射模型; 热弹性力学模型; 二次热辐射

中图分类号: TN215

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220157

Simulation analysis of thermal effect of laser irradiation in infrared detection system

Yuan Lei¹, Wang Biyi², Luo Chao³, Li Wenzhong¹, Ran Junjun¹, Liu Jian^{1,3}

(1. The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China;
2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China;
3. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China)

Abstract: To study the thermal effect and secondary thermal radiation of infrared detection system after laser irradiation on the detector imaging, this paper uses Ansys software for thermal radiation simulation and finite element structure simulation of infrared detector. The blackbody radiation law and DO radiation calculation model are used to simulate the temperature variation with time of the optical system in the detector under different laser irradiance and the interference of the secondary thermal radiation caused by the temperature rise in the detector to the imaging of the target surface. The thermal stress and deformation in the detector are simulated by thermoelastic model. The results show that, under the condition that the detector is irradiated by 1.06 μm laser while the laser irradiance of the corrective lenses is 50 W/cm^2 , then, the secondary thermal irradiance of the target reaches the order of 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ in 0.6 seconds, the infrared detector reaches saturation. After the detector is irradiated by laser, the maximum temperature of the system appears at the center of the corrective lenses, and the function relationship between the maximum temperature of the system and the exposure time is obtained by fitting, which can predict the damage of the heating structure of the detector. The maximum thermal deformation appeared at the center of the back of the mirror, which formed unequal additional optical path difference from the outside to the inside and interfered with the imaging effect of the detector. The maximum thermal stress appeared in the front center of the corrective lenses, and the linear relationship between the maximum thermal stress and the laser irradiance was obtained, which provide the prediction parameters for the thermal stress damage of the corrective lenses.

Key words: infrared detection, image quality, DO radiation model, thermoelastic model, secondary heat radiation

* 收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2022-09-29

基金项目: 光电信息控制和安全技术重点实验室开放基金项目 (6142107190310)

联系方式: 袁 磊, yuanlei11@163.com。

通信作者: 王毕艺, wangbiyi530@163.com。

自然界中的一切物体都通过红外辐射方式与环境进行能量交换^[1-2], 红外光具有谱段宽、信息广、抗干扰力和穿透力强、不受环境影响和不受昼夜限制等特点, 因而在成像应用上具有显著的优势^[3-4], 红外成像技术在医疗检测、安防监控、地理物探、遥感监控等军民行业上得到广泛应用^[5-8]。作为红外成像系统中的重要组成部分, 红外光学系统负责收集、处理红外辐射并将光学信号传递到探测器上, 它的镜面材料的细微破损和变形都将对探测器接收信号产生干扰^[9]。本文就对红外探测器在受不同激光辐照度下的热应力、热变形和二次热辐射进行仿真分析, 得到相关的探测器破坏和热辐射干扰情况。

1 探测器温度场仿真分析

1.1 模型的建立

探测器工作时, 1.06 μm 激光从头罩进入探测器, 在主镜和次镜镜面上经过两次反射, 最终照射在矫正镜上, 矫正镜表面吸收后, 剩余部分向周围环境辐射, 这部分辐射量没有进入矫正镜内部, 仿真时忽略了其影响。探测器结构及激光光路如图 1 所示。

按照探测器的光学结构, 建立探测器镜片几何模型和数值传热计算模型, 并划分计算域网格, 探测器网格参数如表 1 所示。

按照相关参数划分后的探测器网格和数值传热计算网格如图 2 所示。

1.06 μm 的高斯激光透过头罩, 经主镜、次镜反射后照射到矫正镜上, 头罩对 1.06 μm 的入射激光的吸收率为 10%, 主镜吸收率为 1%, 次镜吸收率为 1%, 矫正镜吸收率为 50%, 整个光学系统受到激光辐射后迅速升温。高斯光源的定义如下

$$q = Q \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{r^2}} \quad (1)$$

式中: q 为辐射功率密度分布; Q 为最大功率密度; r 为腰斑半径。

表 1 模型参数表

Table 1 Model parameter list

parts	geometric radius/mm	waist radius/mm	grid type	grid size/mm	grid number
primary mirror	51	51	Hex	3	2100
secondary mirror	18.5	18.5	Hex	3	417
corrective lens	12.5	8	Hex	1.5	786
target	5.5	—	Hex	1	449
hood	125	51	Hex	3	24858
fluid	150	—	Tet	6	1116834

调整入射激光最大功率密度 Q 值, 使矫正镜上获得的平均激光辐照度分别为 50、100、300、500 W/cm², 并根据各镜片对 1.06 μm 激光的吸收率计算各镜片获得的热辐射量, 并对各镜片获得热量按高斯分布进行加载, 根据表 2 设置各镜片材料参数。

1.2 探测器温度场计算

考虑到探测器各镜片在受照升温后将对外部进行热辐射, 进而影响探测器各镜片的温度分布情况, 在计算过程中。在热辐射过程中, 存在部分吸收介质, 因此有必要考虑能量方程中的一些附加项, 即

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [V\rho E] = \nabla \cdot [k\nabla T] + S_r \quad (2)$$

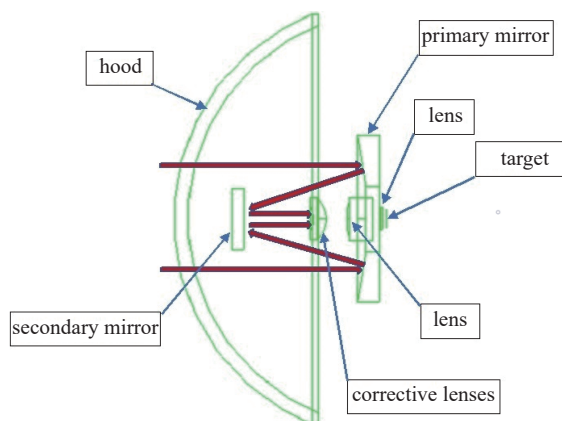


Fig. 1 Diagram of detector structure and optical path

图 1 探测器结构及光路图

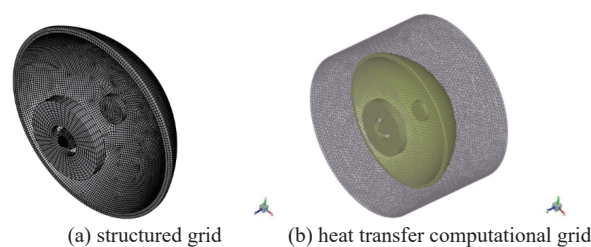


Fig. 2 Detector grid model

图 2 探测器网格模型

式中： ρ 为介质密度； E 为辐射力； V 为体积单元； k 为热传导系数； T 为温度； S_r 为源项。其中：

$$S_r = -\nabla \cdot \mathbf{q}_r = \alpha G - 4an^2\sigma T^4 \quad (3)$$

式中： $\nabla \cdot \mathbf{q}_r$ 为辐射源项， W/m^3 ； G 为投射辐射； α 为吸收系数(m^{-1})； n 为介质折射率； σ 玻耳兹曼常数。

表 2 材料参数表

Table 2 Material parameters

material	density/($kg \cdot m^{-3}$)	specific heat capacity/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	thermal conductivity/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	absorption coefficient/ m^{-1}	refractive index
Si	2328.3	700	148	864	1.5
MgF ₂	3177	1003	0.3	1.4	1.48
Al	2700	934.92	237	17	1
Air	1.225	1006.43	0.0242	0	1

在辐射传输方程(RTE)中,辐射强度 I 沿任意方向的变化描述方程为^[10]

$$\frac{\partial I(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{\partial s} = -(\alpha + \sigma_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + \alpha \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi d\Omega \quad (4)$$

式中： $I(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ 为 \mathbf{r} 方向， \mathbf{s} 位置处的入射辐射强度； σ_s 为散射系数(m^{-1})； Φ 为散射项函数； Ω 为立体角。

采用DO辐射计算模型计算镜片间的热辐射^[11]，DO模型通过有限数量的离散固体角或方向求解辐射传输方程^[12]

$$\nabla \cdot [I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \cdot \mathbf{s}] + (\alpha + \sigma_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi d\Omega \quad (5)$$

DO模型中,通过 $N_\theta \times N_\phi$ (N_θ, N_ϕ 分别表示离散坐标系中的方向角和极角数目)离散纵坐标来计算辐射传输方程。每个离散模型中都有一个方向,表示固体角度内的辐射。 N_θ 和 N_ϕ 给出了固体角离散化的精细程度,综合考虑计算模型和计算精度后选取 5×5 辐射离散模型,计算时设置计算时间步数为100步,计算步长为0.1s,即计算探测器受照10s内的温度变化情况。矫正镜在50、100、300、500 W/cm^2 的平均激光辐照度下受照10s后系统的最高温度都位于矫正镜上,最高温度分别达到312.3、467.5、800.3、1127.1 K。50 W/cm^2 平均激光辐照度下10s内探测器各镜片温度随时间变化情况如图3所示,系统内部最高温度(矫正镜中心温度)随时间变化曲线如图4所示。由图4可见,由于系统内部升温将对环境产生二次热辐射,系统内部最高温度随受照时间逐渐变缓,最终将与环境达到热平衡。

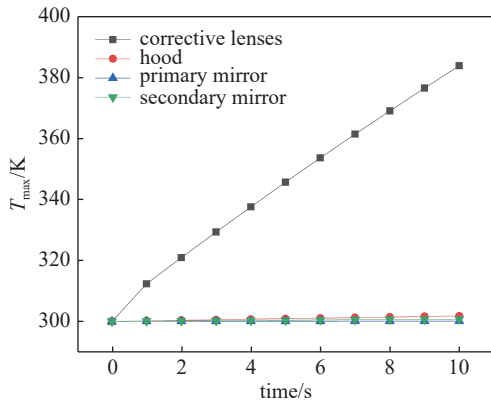


Fig. 3 Temperature curve of each lens within 10 s after irradiation with average laser irradiance of 50 W/cm^2

图3 50 W/cm^2 平均激光辐照度下照射10s内各镜片温度变化曲线

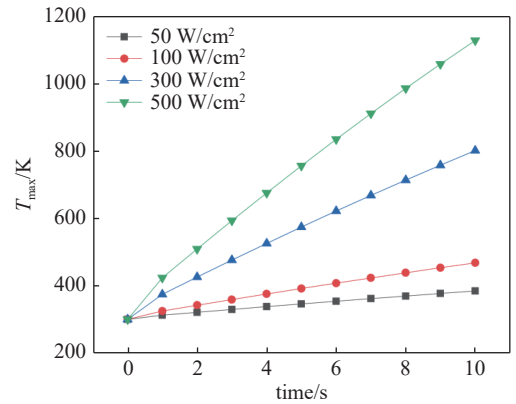


Fig. 4 Maximum temperature of the system varies with time under different laser irradiance

图4 不同激光辐照度下系统最高温度随时间变化情况

在不考虑材料变形情况下,采用指数函数拟合系统温升方程,得到矫正镜受50、100、300、500 W/cm^2 平均激光辐照度下的最高温度随激光辐照时间 t 的变化曲线分别为

$$T_{\max,50} = 736.02 - 433.54 \times 0.979^t;$$

$$T_{\max,100} = 853.57 - 550.77 \times 0.965^t;$$

$$T_{\max,300} = 2\,102.76 - 1\,789.72 \times 0.969^t;$$

$$T_{\max,500} = 3\,542.21 - 3\,212.91 \times 0.972^t$$

不考虑系统材料破损变形情况下,由该拟合公式,预测系统受 50、100、300、500 W/cm² 平均激光辐照度下的最高温度分别约为 736、853、2102、3542 K,过高的镜片温度不仅会出现二次红外辐射干扰成像效果,而且会使镜片出现变形及镀膜损伤,影响成像效果。

2 探测器热变形与热应力分析

探测器的镜片受到激光辐照后升温将产生一定量的变形,这部分变形可能对光学系统的成像产生干扰,忽略光学膜对镜体变形的影响,假设镜片的热传导系数、热应变张量都是各向同性的。此时,镜片变形可以采用热弹性力学模型方程组求解。该方程组在直角坐标系下的张量形式为^[13]。

$$\begin{cases} k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} = \rho C_\varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} + T_0 \beta \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \\ \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \beta T \delta_{ij} \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 是坐标向量, ρ 为材料密度, C_ε 是热容, T_0 是参考温度, β 是热模量, ε 是应变张量, σ 是应力张量, u 是位移向量, λ 和 μ 是拉梅系数。

通过有限元方法,对式(6)进行离散,然后进行数值计算,可以获得确定约束下的镜片形变,进而得到镜片的变形量。

整个光学系统大部分由硅和氟化镁组成,硅与氟化镁的材料物性参数如表 3 所示。

表 3 材料物性参数表
Table 3 Material property parameters

material	density/(kg·m ⁻³)	elasticity modulus/GPa	Poisson ratio	dilatation coefficient/K ⁻¹	melting point/K
Si	2330	190	0.24	2.5×10 ⁻⁶	1687
MgF ₂	3177	1.32	0.276	7×10 ⁻⁶	1528
Al	2700	70	0.3	2.46×10 ⁻⁶	933

系统中的镜片都被固定在探测器内部,为与实际约束情况相符合,本次结构计算采用全约束方式进行约束^[14]。分别对头罩、主镜、次镜、矫正镜、透镜、靶镜的侧面进行全约束。计算并得到矫正镜在不同激光辐照度下,受照 10 s 时探测器内部的热变形和热应力情况如图 5 所示。由图 5、图 6 可见,探测器的最大热应力和热变形都出现在矫正镜上,将矫正镜分别在不同激光辐照度下 10s 时的最大应力、应变数据进行整理如表 4 所示。由表 4 可见,探测器的最大热应力和应变与平均激光辐照度呈现线性关系,经拟合分析,可以得到探测器系统在受照 10 s 时所受到的最大应力和最大变形拟合曲线,即

$$\sigma_{\max} = 1.54E + 2.0$$

$$\varepsilon = 0.087E + 0.094$$

式中: σ_{\max} 为最大应力 (MPa); E 为激光辐照强度 (W/cm²); ε 为最大应变 (μm)。

研究发现^[15],矫正器的热应力将影响材料的使用稳定性及镜片表面镀膜的使用寿命,矫正镜片的表面变形将直接影响到探测器的成像效果,探测器内部矫正器表面变形数据情况如图 7 所示。可见,矫正镜的热变形量由外向内逐渐加剧,最大变形量都出现在其背面中心处,这使得矫正镜背面法向变形,由外向内形成不等附加光程差,一定程度上干扰了探测器的成像效果。

3 探测器靶面二次热辐射分析

系统内部温度上升对外产生二次红外辐射,矫正镜由于温升最大,在 3~5 μm 波段产生的二次热辐射也最大,

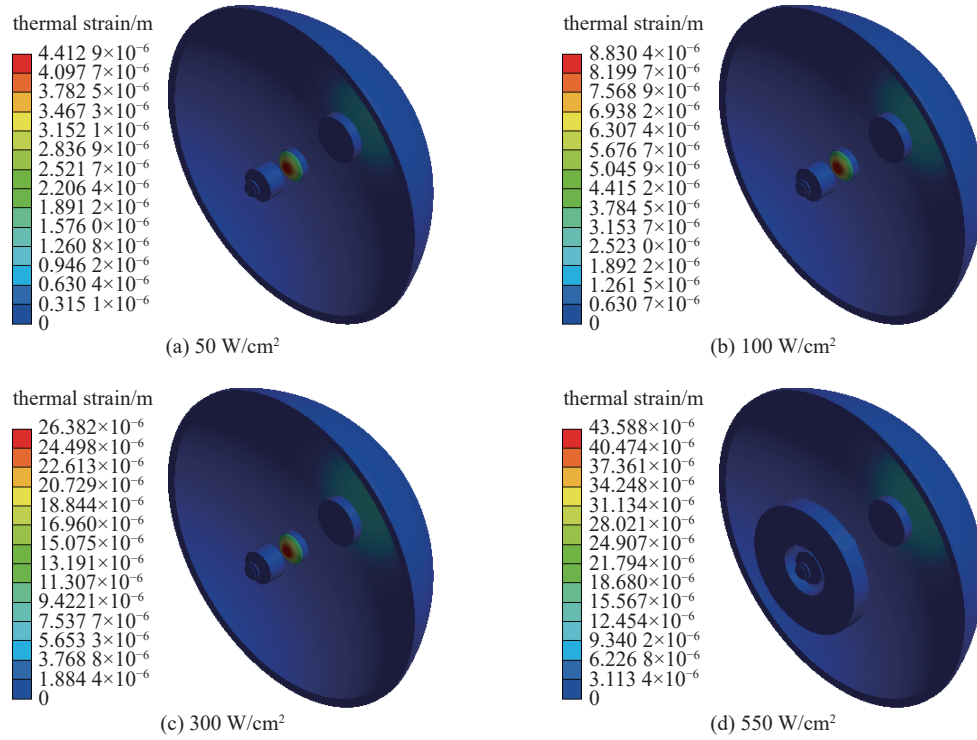


Fig. 5 Thermal strain cloud image of detector irradiated by laser for 10 s

图 5 探测器受激光辐照 10 s 时的热应变云图

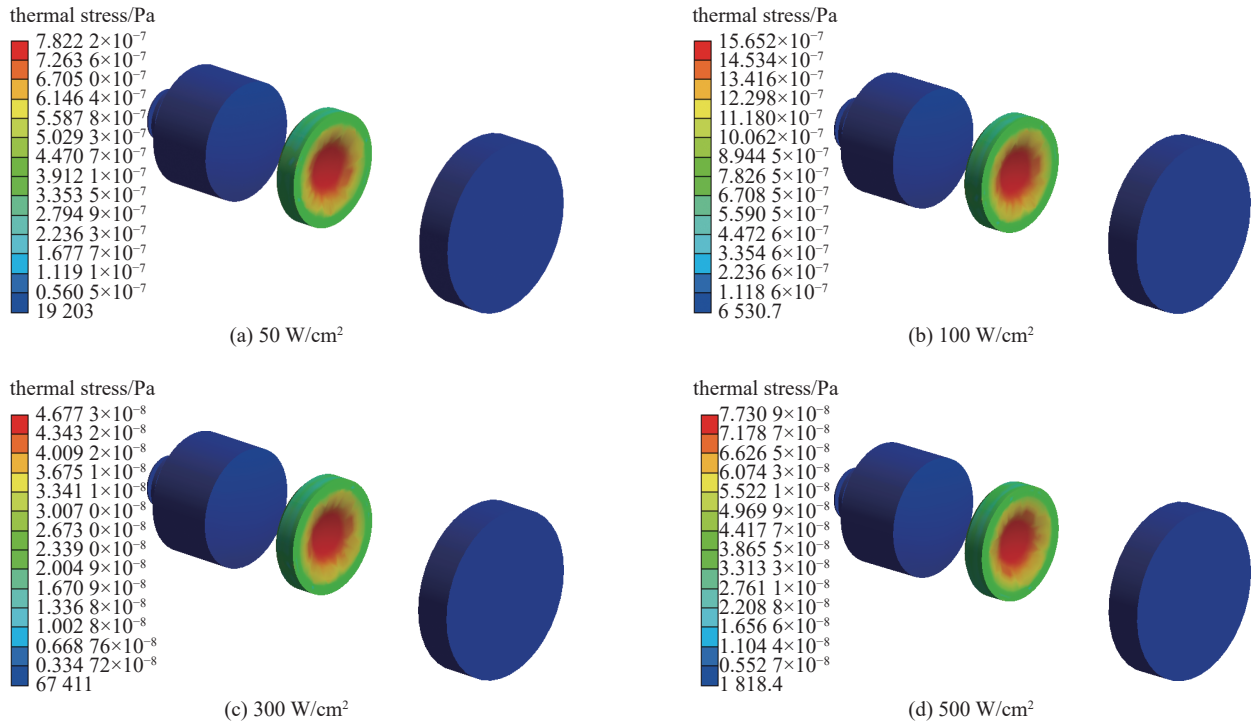


Fig. 6 Thermal stress cloud images of detector irradiated by laser for 10 s

图 6 探测器受激光辐照 10 s 时镜片热应力云图

表 4 探测器在不同激光辐照度下 10 s 时的最大热应力和热应变表

Table 4 Maximum thermal stress and thermal strain of the detector for 10 s irradiation at different laser irradiance

irradiation intensity/(W·cm ⁻²)	maximum stress/MPa	maximum strain/ μ m
50	78.2	4.4
100	156.5	8.8
300	476.7	26.38
500	773.1	43.6

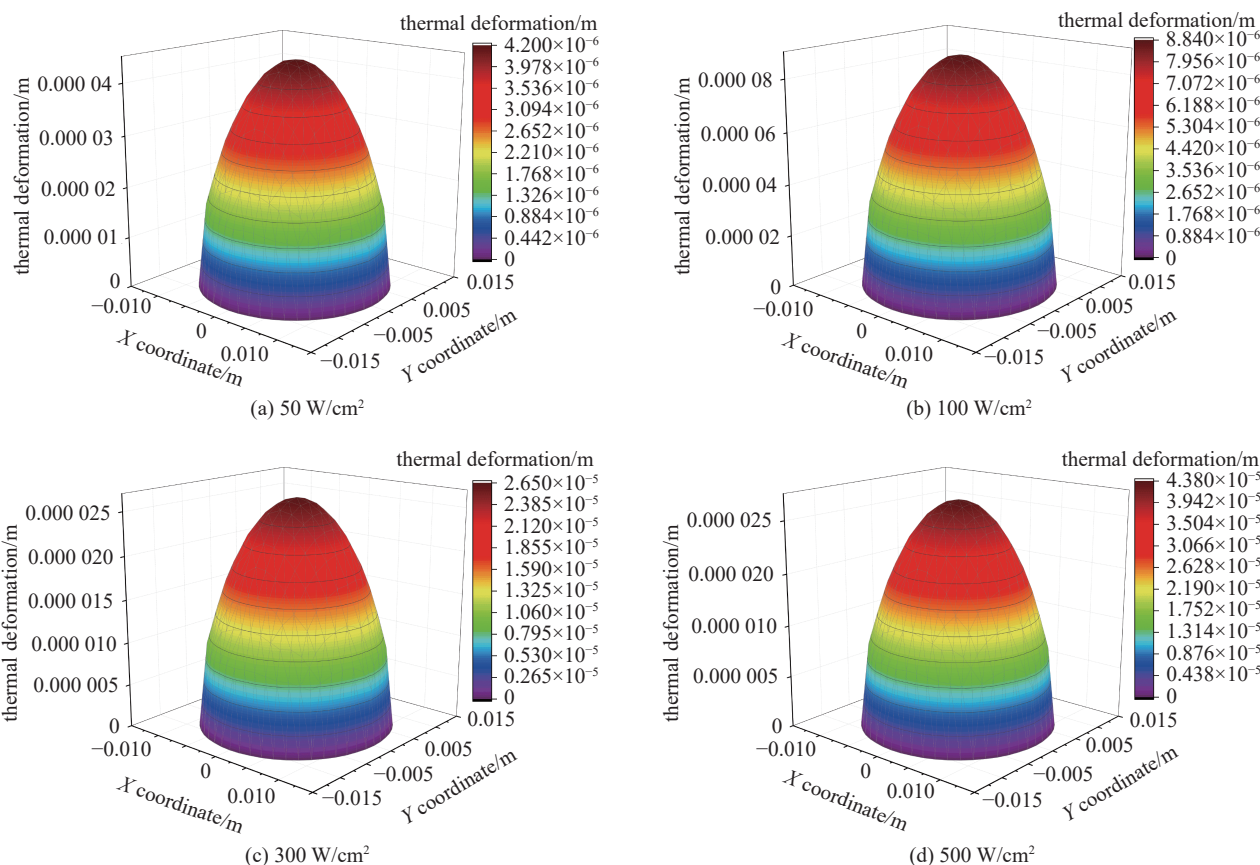


Fig. 7 The thermal deformation of the mirror under different laser irradiance

图 7 矫正镜在不同激光辐照度下镜面热变形量

这部分辐射这部分辐射剂量通过矫正镜后的光学系统和探测器内环境达到靶面,对靶面成像产生干扰。分析计算矫正镜在 50 W/cm² 激光辐照度下,靶面受到由光学系统和环境到达靶面的 3~5 μm 波段的二次辐射剂量如图 8 所示。可见,通过光学系统达到靶面的热辐射为靶面成像受干扰和的主要因素,矫正镜在 50 W/cm² 激光辐照下,0.6 s 时靶面达到 100 μW/cm² 的红外辐照量级,这将使红外探测器达到饱和,干扰成像^[16]。

4 结 论

本文主要研究了红外探测系统的受到激光破坏热效应,采用有限体积法对探测器内部的温升情况进行数值模拟,得到系统内部温度场,再采用有限元法模拟计算探测器内部的热应力和热变形情况。结果表明:探测器受照后,系统的最高温度出现在矫正镜的中心处且随时间和激光辐照度的增加而增加,探测器受激光辐照度分别为 50、100、300、500 W/cm²,时间为 10 s 时最高温度分别为 383.8、467.5、800.3、1127.1 K。系统内部温升将对环境产生热辐射,采用指数函数拟合系统温升方程,在不考虑材料变形情况下,预测系统受 50、100、300、500 W/cm² 激光辐照度下的最高温度分别约为 736、853、2102、3542 K。得到探测器系统在受照 10 s 时所受到的最大应力和最大变形拟合方程,可对激光探测器在不同受照情况下的最大应力和最大变形进行预测;探测器受照后将产生一定量的热应力和热变形,镜片受到的热变形将会对探测器的成像产生一定影响,较大的热应力会使镜片受损。矫正镜的二次红外辐射通过光学系统达到靶面的热辐射为探测器的主要辐射干扰,它将使红外探测器短时间内达到饱和。

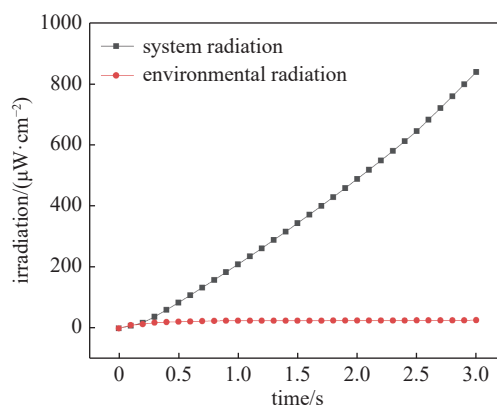


Fig. 8 Curve of the amount of secondary irradiation on target surface with time

图 8 靶面受二次辐照随时间变化曲线

矫正镜的二次红外辐射通过光学系统达到靶面的热辐射为探测器的主要辐射干扰,它将使红外探测器短时间内达到饱和。

参考文献：

- [1] 刘炜, 牛誉霏, 肖龙龙, 等. 红外焦平面阵列及星载红外成像系统的发展[J]. 红外, 2021, 42(11): 15-24. (Liu Wei, Niu Yufei, Xiao Longlong, et al. Development of infrared focal plane array and spaceborne infrared imaging system[J]. Infrared, 2021, 42(11): 15-24)
- [2] 张晓菲. 红外成像系统及其超分辨率重建技术的研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020. (Zhang Xiaofei. Study on the imaging and super-resolution reconstruction of the infrared optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020)
- [3] 闫晶. 高变倍比红外连续变焦光学系统设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014. (Yan Jing. Design & research of high ratio IR continuous zoom system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014)
- [4] 杨小乐, 史漫丽, 凌龙. 制冷型红外探测器关键驱动与信号处理电路设计[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 556-560. (Yang Xiaole, Shi Manli, Ling Long. Design of the key driving and signal processing circuit for cooled infrared detector[J]. Infrared Technology, 2016, 38(7): 556-560)
- [5] 邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 441-444. (Xing Suxia, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 441-444)
- [6] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. 红外技术, 2013, 35(1): 1-8. (Shi Yanli. Choice and development of the third-generation infrared detectors[J]. Infrared Technology, 2013, 35(1): 1-8)
- [7] 石永山. 红外焦平面成像技术的军事应用与发展[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(10): 21-24,39. (Shi Yongshan. Application and the development of the abroad infrared stealth technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(10): 21-24,39)
- [8] 刘永昌, 陈洪印. 红外制导与红外对抗技术分析[J]. 红外技术, 1997, 15(1): 15-20. (Liu Yongchang, Chen Hongyin. Analysis of IR guidance and IRCM techniques[J]. Infrared Technology, 1997, 15(1): 15-20)
- [9] 王岭雪, 蔡毅. 红外成像光学系统进展与展望[J]. 红外技术, 2019, 41(1): 1-12. (Wang Lingxue, Cai Yi. Recent progress and perspectives of infrared optical systems[J]. Infrared Technology, 2019, 41(1): 1-12)
- [10] 文爽. 基于卡尔曼滤波的参与性介质时变热流与温度场在线重构[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. (Wen Shuang. Online retrieval of time-varying heat flux and temperature field in participating media based on Kalman filtering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020)
- [11] Ebrahimpour Z, Sheikholeslami M, Farshad S A, et al. Solar energy application for LFR unit with trapezoidal cavity receiver considering radiative mode[J]. Physica Scripta, 2020, 95: 125701.
- [12] 付丽荣. 对流—辐射耦合传热模拟及其在柴油机缸内过程应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. (Fu Lirong. Numerical simulation of convection and radiation combined heat transfer and study of the in-cylinder radiation heat transfer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016)
- [13] 尚钢. 热冲击下分区均质材料耦合热弹性问题的变分原理[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1999, 45(5A): 610-612. (Shang Gang. Variational principles on coupled thermal-elasticity of zoned homogeneous materials under thermal shock[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 1999, 45(5A): 610-612)
- [14] 李欢, 胡亮, 孟祥福, 等. 基于ANSYS Workbench的光学探测系统热-结构仿真分析[J]. 红外技术, 2020, 42(12): 1141-1150. (Li Huan, Hu Liang, Meng Xiangfu, et al. Simulation analysis of thermal-structure of an optical detection system[J]. Infrared Technology, 2020, 42(12): 1141-1150)
- [15] 任嘉木. 复合脉冲激光辐照下元件损伤特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021. (Ren Jiamu. Investigation on damage characteristics of element under composite pulse laser irradiation[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021)
- [16] 张成, 许宏, 赵万利, 等. 激光对红外探测系统产生的二次辐射效应[J]. 光电技术应用, 2021, 36(4): 33-36. (Zhang Cheng, Xu Hong, Zhao Wanli, et al. Effect of second radiation on laser to infrared detection system[J]. Electro-Optic Technology Application, 2021, 36(4): 33-36)