

2.79 μm 中红外激光对 PbS 探测器的损伤实验研究

王玺^{1,2*}, 叶庆^{1,2}, 董骁¹, 雷武虎^{1,2}, 吕桐林¹, 郭彦廷¹, 胡以华^{1,2,3*}

- (1. 国防科技大学 电子对抗学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 国防科技大学 电子对抗学院 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;
3. 国防科技大学 电子对抗学院 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:开展了不同重频下 2.79 μm 中红外激光对 PbS 探测器的损伤实验。基于传热学理论,利用有限元法对 2.79 μm 中红外激光辐照 PbS 探测器中的温度分布进行了数值分析,并比较了脉冲数目、重复频率对损伤效果的影响,分析了 2.79 μm 中红外激光辐照 PbS 探测器的损伤机理,获取了相关阈值数据。研究表明,2.79 μm 中红外激光对 PbS 探测器的损伤机理主要以热熔融为主,在温度没有达到 PbS 熔点时,PbS 就会发生热分解反应,析出黄色沉淀物 PbO;计算得到单脉冲 2.79 μm 中红外激光对 PbS 探测器的损伤阈值为 13.03 J/cm²,且脉冲数目、重复频率对损伤效果影响很大,损伤累积效应明显。理论模型能够较好地解释 PbS 表面初始损伤形貌特征。

关键词:激光损伤;数值分析;2.79 μm 中红外激光;PbS 探测器

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Experimental study of PbS detector irradiated by 2.79 μm mid-infrared laser

WANG Xi^{1,2*}, YE Qing^{1,2}, DONG Xiao¹, LEI Wu-Hu^{1,2}, LYU Tong-Lin¹,
GUO Yan-Tin¹, HU Yi-Hua^{1,2,3*}

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology, Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
3. Key Laboratory of Electronic Restricting Technique of Anhui Province, Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: It has very important application value to investigate the damage performance of PbS detector irradiated by mid-infrared laser. In this paper, the experiment research on damage in PbS detector irradiated by 2.79 μm mid-infrared laser is carried out. Furthermore, the theoretical model of PbS detector irradiated by 2.79 μm laser is developed and a numerical simulation is performed to calculate temperature distribution in PbS detector using finite element method, and the relationship between laser parameters and damage effect is also studied. The simulation and experimental results indicate that the damage mechanism of PbS detector irradiated by 2.79 μm mid-infrared laser is mainly melting damage, and the melting damage threshold is calculated to be 13.03 J/cm². Before the temperature reaches the melting point of PbS, the thermal decomposition reaction of PbS begins, and then separates out PbO which is the yellow precipitate. It is shown that pulse repetition frequency and the number of pulses affect damage considerably, and the accumulation of multi-shot laser induced damage in PbS detector is obvious. The theoretical analysis is in agreement with the initial damage morphology of PbS surface.

Key words: laser damage, numerical analysis, 2.79 μm mid-infrared laser, PbS detector

收稿日期:2021-01-16,修回日期:2021-07-16

Received date:2021-01-16, Revised date:2021-07-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61871389),国防科技大学校科研计划项目(ZK18-01-02),安徽省自然科学基金面上项目(1908085MF222),脉冲功率激光技术国家重点实验室基金项目(SKL2019ZR04),先进激光技术安徽省实验室基金项目(AHL2021ZR04)。

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China(61871389)and the Research Plan Project of the National University of Defense Technology(ZK18-01-02) and the Anhui Province Natural Science Foundation(1908085MF222)and the Foundation of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (SKL2019ZR04)and the Foundation of the Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology(AHL2021ZR04).

作者简介(Biography):王玺(1981-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为激光对抗技术及应用

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: eastangus@126.com, yh_hu@263.net;

引言

PbS 探测器作为一种发展成熟的中红外波段探测器,具有灵敏度高,时间常数小,生产工艺简单等诸多优点^[1],且近年来,新型纳米材料量子点的发展与应用^[2-3],使 PbS 探测器拥有更高的响应度与探测能力,发展前景广阔,目前已广泛应用于环境监测、非接触测温、光通信与卫星探测等领域^[4]。随着新型激光武器的发展,用于军事上的各类光电探测器几乎都面临着高功率激光武器的严重威胁。当探测器受到强激光辐照时,光敏元件会吸收激光能量使其温度升高,当温度达到一定值,便会发生损伤^[5-8]。

目前,对红外探测器的损伤效应研究主要集中在近红外波段 1.06 μm 激光和远红外 10.6 μm 激光上^[9-11],而对于中红外波段激光,特别是对 PbS 探测器的损伤实验研究,相关报道的文献较少。2.79 μm 激光处于大气窗口,拥有空气散射小、传播距离远的特点^[12-15],而且这一波段也是大多数天基侦察、监视、预警卫星等系统的工作波段,正好与 PbS 探测器的工作波段所匹配。因此,在未来空间应用上,高功率的 2.79 μm 中红外激光有着很大的潜在价值。研究中红外波段激光对 PbS 探测器的辐照效应,探索卫星、空间站等航天设备上的光电探测器件的激光干扰和损伤条件,在激光攻防领域有着重要的应用参考价值。

本文开展了不同重频的 2.79 μm 中红外激光对 PbS 探测器的损伤实验,建立了以傅里叶热传导方程为基础的热损伤理论模型,对 PbS 探测器受到激光辐照时产生的温度分布进行了数值模拟,主要讨论了中红外激光损伤机理,分析比较了不同重频下的激光损伤效果并获取了相关阈值数据。

1 实验系统

整个损伤实验系统布局如图 1 所示:

其中 1 为 2.79 μm 中红外激光器,2 为控制作用时间的定时器,3 为衰减器,4 为激光能量计,5 为分

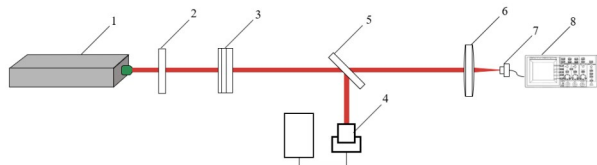


图 1 损伤实验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental system

束镜,6 为蓝宝石聚焦透镜,7 为 PbS 探测器,8 为用于显示响应幅度的示波器。实验过程中,PbS 探测器芯片安装在处理电路中,利用示波器随时显示输出电压,当 2.79 μm 激光脉冲辐照到探测器上时,输出电压会发生下降;当探测器损伤时,下降幅度会相应减小。采用 Nomarski 型的微分干涉相衬显微镜观察 PbS 探测器样品的损伤形貌。

激光在 PbS 探测器上的辐照时间由定时器控制。激光经分束镜,一束用于测量激光能量;另一束对 PbS 探测器进行辐照。通过测定分光镜的分束比,就可以得到辐照在探测器的激光能量大小。2.79 μm 中红外激光器的增益介质为 Cr : Er : YSGG 晶体,脉冲能量随泵浦电压变化,激光器输出脉宽 300 μs ,在输出窗口光束直径为 4.2 mm,输出激光光束符合高斯分布,输出重复频率 5 Hz 和 10 Hz。探测器位于透镜焦点处,经感光相纸测量,聚焦后探测器上的激光光斑有效直径为 0.5 mm。

2 实验结果与分析

不同激光重复频率条件下,PbS 探测器响应电压绝对值随激光能量的变化情况如图 2 所示,随着入射激光能量逐渐增大,PbS 探测器响应电压绝对值逐渐减小。在图 2(a)中,在重复频率 5 Hz 条件下,当入射激光能量超过 340 mJ 时,对应的能量密度为 173.16 J/cm^2 ,逐渐增大激光能量,响应电压绝对值保持不变。在图 2(b)中,在重复频率 10 Hz 条件下,当入射激光能量超过 580 mJ 时,对应的能量密度为 295.39 J/cm^2 ,逐渐增大激光能量,响应电压绝对值也保持不变。

在重复频率 10 Hz,激光能量为 220 mJ 入射条件下,PbS 探测器响应电压绝对值随激光辐照时间的变化情况如图 3 所示。可见,随着激光脉冲数的增多,PbS 探测器响应电压绝对值随时间积累逐渐降低,几乎呈线性下降。

综上实验研究表明,2.79 μm 中红外激光辐照 PbS 探测器后,增加激光能量和辐照时间都会使探测器响应电压绝对值均有不同程度的降低,说明 PbS 探测器探测性能已经受到严重影响。

在激光能量为 720 mJ,即能量密度为 366.69 J/cm^2 的单脉冲激光辐照下,PbS 探测器表面的损伤形貌如图 4 所示。如图 4(b)所示,损伤光斑呈现环形熔融状烧蚀,光斑中心处损伤明显,存在大块的烧蚀痕迹,但未观察到裂纹和断裂等热应力损伤特征。图 4(c)中观察到光斑边缘出现一圈黄色沉淀

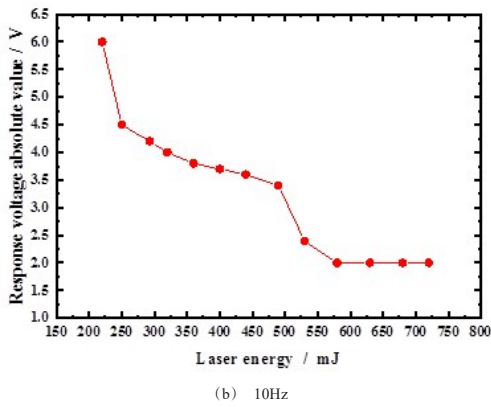
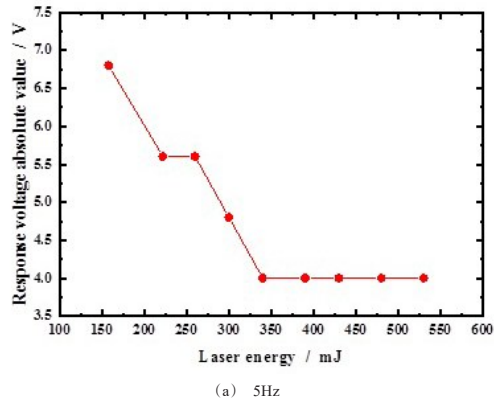


图2 不同重复频率条件下探测器响应电压绝对值随激光能量的变化情况

Fig.2 Response voltage vs laser energy

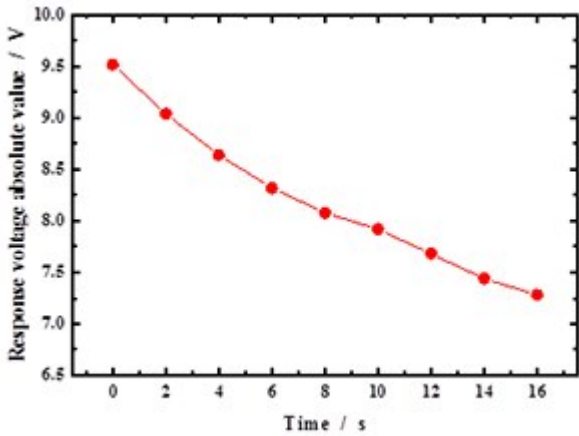


图3 探测器响应电压随时间的变化历程(E=220mJ, PRF=10Hz)

Fig.3 Response voltage vs time(E=220mJ, PRF=10Hz)

物,图4(d)所示光斑中心处材料剥落,烧蚀痕迹明显。

另外,实验发现PbS探测器的蓝宝石窗口内表面附着了大量颗粒,推测可能是由PbS材料熔融气化喷溅形成,不同激光能量密度下蓝宝石窗口上附着的颗粒如图5所示,入射激光能量密度越高,窗口表面附着的喷溅物越密。

3 数值模拟与分析

3.1 理论模型

实验所用PbS探测器光敏面大小为6 mm×6 mm,选用TO-8型晶体管外壳进行封装,并将内部抽至真空。TO式封装和其中的热电冷却器提供低温操作增加其灵敏度和温度稳定性。基本探测单元由敏化的PbS膜、电极和封装在K9基板上的两个电极引线组成,电极引线将光敏面探测到的信号以电信号的形式传输至后置信号处理显示模块。选用厚度为0.5 mm的蓝宝石作为窗口材料,其在2.79 μm波段透光性较好,约为85%,基底材料为K9。PbS探测器结构示意图如图6所示。

损伤形貌是损伤机制的外在表现。从PbS探测器的损伤形貌中分析,2.79 μm中红外激光对激光PbS探测器的损伤机理应为热效应损伤。激光辐照光学材料,从宏观角度上来看,就是物质的热传导问题。激光辐照材料时,一部分激光能量被反射,而另一部分能量被材料的表层所吸收转化为热能,引起温度升高。根据能量守恒定律和傅里叶热传导理论,该能量将以激光作用区域为中心,通过热传导在靶材内扩散形成非均匀的温度场,并且迅速建立局部的热动态平衡。

为了建立合理模型,对实际的PbS探测器结构进行了必要的合理简化。当光束通过上层蓝宝石窗口材料聚焦在芯片上时,因为聚焦的光斑尺寸小于探测器芯片的大小,所以可以将PbS探测器结构看作圆柱体模型,以圆柱中心到边缘处的纵向截面建立简化的PbS探测器模型,圆柱体半径r为3 mm,其组成依次为蓝宝石窗口、真空环境、PbS、K9基底,从上到下依次排列。为了一般性和准确性,模型中各层厚度设为:蓝宝石窗口材料0.5 mm、真空层4 mm、PbS光敏面50 μm、K9基底300 μm。图7所示即为2.79 μm中红外激光辐照PbS探测器多层结构的理论模型。

在PbS光敏面处,考虑激光作用时间短,整个系统处于真空的环境下,无对流换热,且热辐射能量损失相比吸收激光能量很小,对温度场的影响可忽略不计,激光经过蓝宝石窗口后,大部分能量辐照

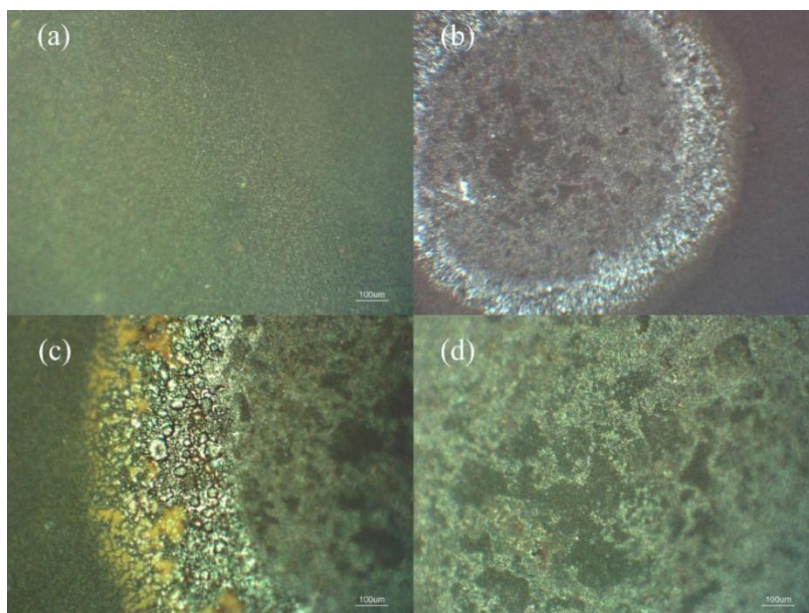


图4 PbS探测器的损伤形貌(单脉冲能量密度 366.69 J/cm²):(a)辐照前,(b)损伤斑全貌,(c)损伤斑边缘,(d)损伤斑中心

Fig. 4 Damage morphology of PbS detector with laser fluence of 366.69J/cm²: (a) before irradiation, (b) damage overall appearance, (c) damage spot edge, (d) damage spot center

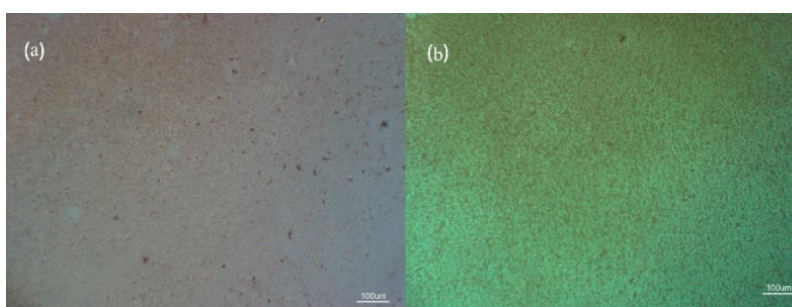


图5 蓝宝石窗口内表面上附着的颗粒图,(a)149.22 J/cm², (b)366.69 J/cm²

Fig. 5 Particles attached to the surface of sapphire window, (a) 149.22J/cm², (b) 366.69J/cm²

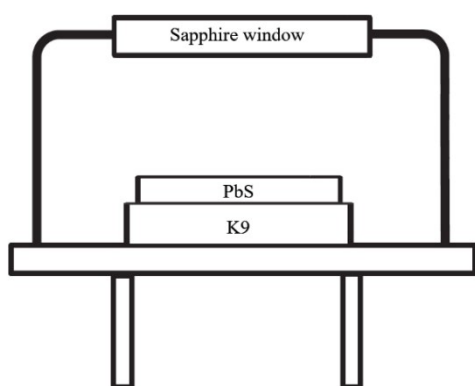


图6 PbS探测器结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of PbS detector

在PbS表面上。在激光对模型的热作用过程中,模型的温度 T 满足傅里叶热传导方程^[16]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c}, \quad (1)$$

式(1)中 ρ 、 c 和 k 分别表示材料的密度、比热容和热传导系数,激光辐照在PbS上时的吸收层很薄,可以认为激光能量在PbS上被吸收为面热源,可以改用边界条件表示面热源^[17]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=4.5\text{mm}} = T(1-R)I, \quad (2)$$

式(2)中, T 为蓝宝石对激光的透过率 0.85, PbS 材料对 2.79 μm 激光的反射率 R 为 0.31, I 为入射到 PbS 探测器表面的激光功率密度,激光光束符合高斯分布, $t=0$ 时刻入射到模型表面,可以表示为:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

式(3)中, I_0 为入射到 PbS 探测器表面的激光功率密

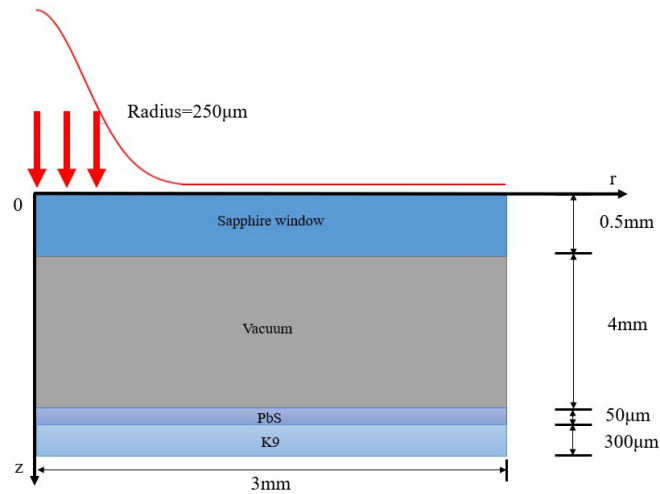


图7 激光辐照PbS探测器的理论模型

Fig. 7 Theoretical model of PbS detector irradiated by 2.79 μm laser

度, ω_0 为激光光斑半径。模型其他边界条件设置为绝热, 此时模型满足的边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=4850\mu\text{m}} = 0, -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=3\text{mm}} = 0 \quad (4)$$

模型的初始条件为: $T_0 = 293 \text{ K}$, 设模型各层材料均匀且各向同性, 材料特性参数为常数, 则材料的性能参数如表1所示。

表1 材料热学参数表^[16,18]Table 1 Material thermal parameters^[16,18]

	PbS	K9	Sapphire window
Thermal conductivity k (W/(cm·K))	0.030	0.015	0.300
Specific heat c (J/g·K)	0.208	0.868	1.530
Density ρ (g/cm ³)	7.600	2.500	4.080

3.2 温度场分布

取 2.79 μm 中红外激光单脉冲能量密度为 10 J/cm², 激光辐照 300 μs 后 PbS 探测器模型的温度等值云图如图 8(a) 所示, PbS 光敏面的温度场分布和模型轴线上温度场分布分别如图 8(b)、8 所示。从图 8 中可以看出, 在激光辐照下, PbS 光敏面表层吸收激光能量造成温度迅速上升, 并沿径向和轴向发生热传导, 同时向上部真空层辐射多余热量, 整个模型的最高温度位于轴线上的 PbS 表面中心处, 约为 1164 K, 没有达到 PbS 材料的熔点(1387 K), 因此表面不会发生熔融损伤, 由于激光光束分布是高斯型, 所以 PbS 表面温度场分布也近似于高斯型分布。

如果用更高能量的激光对探测器进行辐照, PbS 光敏面的光斑中心温度及周围温度就会达到或超过热分解反应温度、熔化及气化温度, 造成不同的损伤形貌。

3.3 损伤机理分析

PbS 常以单晶或多晶的形式作为中红外探测器的核心元件, 目前 PbS 光敏面的制备方式常见的有: 化学浴沉积法, 电沉积法, 紫外线照射法, 微波辅助加热法, 电化学法, 其中化学浴沉积法易操控, 工艺简单, 常作为制备主要方法。高性能的 PbS 在制备敏化过程中不可避免引入了少量的 PbSO₄ 及极少量的铅的氧化物^[19], 根据上述分析: 硫化铅探测器光敏面的主要物质为 PbS 及少量的 PbSO₄。

PbS 光敏面在受激光辐照后, 材料吸收激光能量导致表面温度迅速升高, 在温度达到 1273K 时, PbS 与 PbSO₄ 发生热分解反应, 主要产物为氧化铅(PbO)、铅(Pb)与二氧化硫气体(SO₂)等; 当温度达到 1340 K 时, PbS 与上一反应中产生的 PbO 再次发生热分解反应生成 Pb 与 SO₂ 气体等; 当温度达到 PbS 熔点 1387 K 时, PbS 发生熔融^[20]。热分解反应产物 PbO 在冷却后为颗粒状黄色沉淀, 由于光斑中心温度过高, 超过 PbO 气化点, 同时会在探测器内部热流场影响下在封装壳内部流动。取单脉冲能量密度为 10 J/cm² 时, 0.05 s 后探测器内部喷溅颗粒流动轨迹如图 9 所示。在内部热流场影响下, 部分 PbO 喷溅附着至上部的蓝宝石窗口表面, 形成颗粒状如图 5 所示的形貌, 而另一部分会沉积在损伤斑边缘处形成如图 4(c)

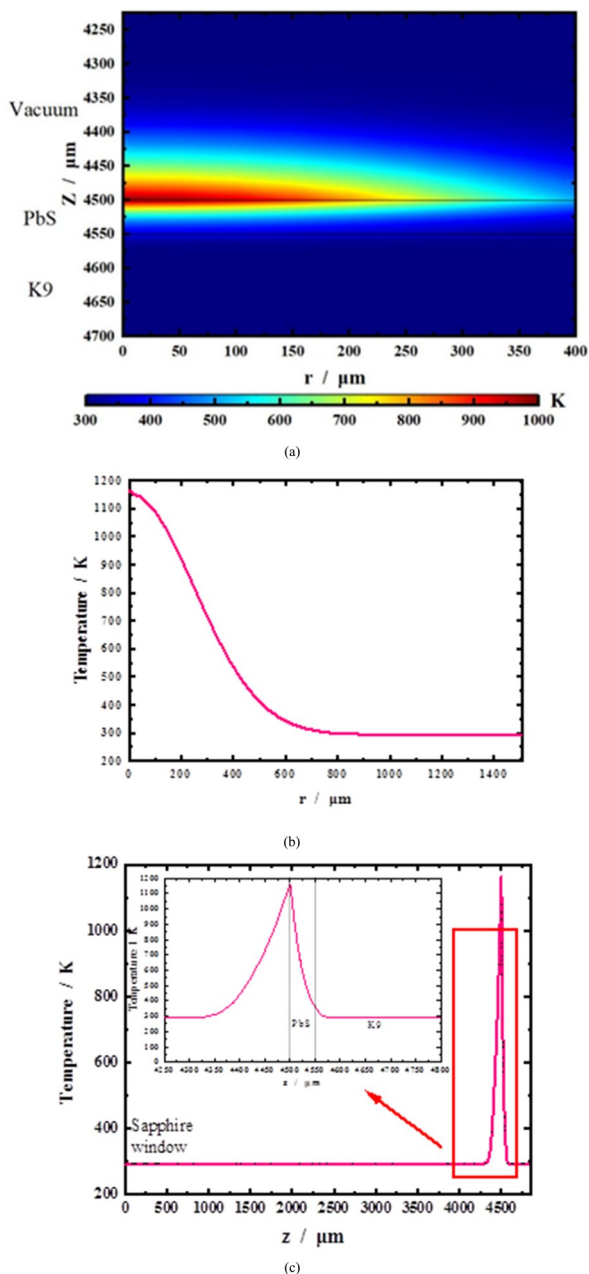


图8 PbS探测器的温度场分布, (a)PbS探测器温度等值云图, (b)PbS光敏面上的温度分布, (c)模型轴线上的温度分布
 Fig.8 Temperature distribution with laser fluence of 10 J/cm², (a) contour of temperature distribution in PbS detector, (b) temperature distribution on PbS surface, (c) temperature distribution on axis

所示的黄色沉淀物。可见, 通过理论模型能够较好地解释 PbS 光敏面这一初始损伤形貌, 说明了理论模型的科学性。

由模拟结果图 10 所示, 当单脉冲激光能量密度达到 13.03 J/cm² 时, PbS 光敏面最高温度为 1387 K, 达到 PbS 材料熔点, 形成熔融损伤, 此时能量密度

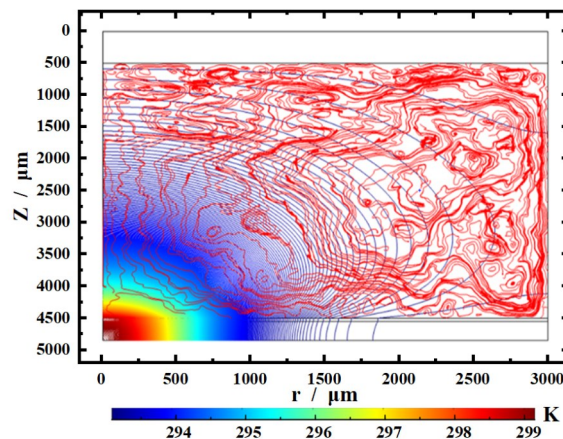


图9 探测器内部内部喷溅颗粒流动轨迹示意图
 Fig.9 Schematic diagram of air flow trajectory inside the detector

13.03 J/cm² 为 PbS 探测器的损伤阈值。

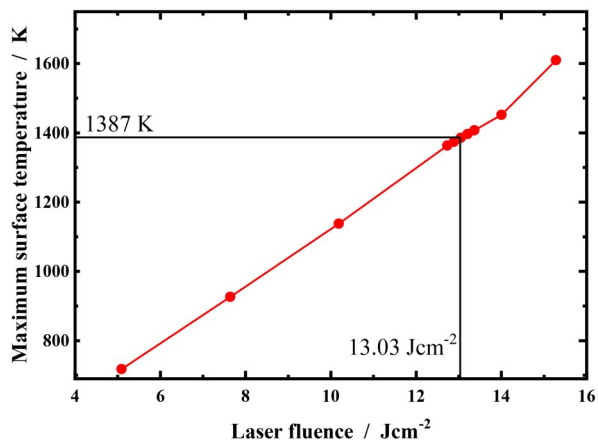


图10 单脉冲激光辐照下 PbS 最高温度与激光能量密度的关系
 Fig.10 The relationship between maximum temperature of PbS and laser energy fluence

取单脉冲能量密度为 10 J/cm²、重频分别为 5 Hz、10 Hz 时, 计算得到探测器最高温度与脉冲数的关系, 如图 11 所示。在多脉冲辐照下, 由于前一脉冲使 PbS 表面温度升高, 脉冲间隔内材料表面未降至室温, 所以后续脉冲热积累能使表面达到更高的温度。由此可见, 2.79 μm 中红外激光重频对材料损伤效果影响很大, 重频造成的热积累效应明显。结合图 2 实验结果, 相同条件下重频为 10Hz 时, 计算得到的探测器温度更高、探测器测得的响应电压绝对值更小。因此, 探测器温度越高, 损伤程度越高, 进而表现为探测器响应电压绝对值越低。由实验结果图 3 和模拟结果图 10 可知, 随着激光辐照时

间和单脉冲能量的提高,探测器分别出现了响应电压绝对值下降和探测器温度升高的特征。上述研究说明,随着重频、激光辐照时间和单脉冲能量的提高,探测器的损伤也越来越严重,表现为模拟结果中探测器温度的提高和实验测得的探测器响应电压绝对值的降低。

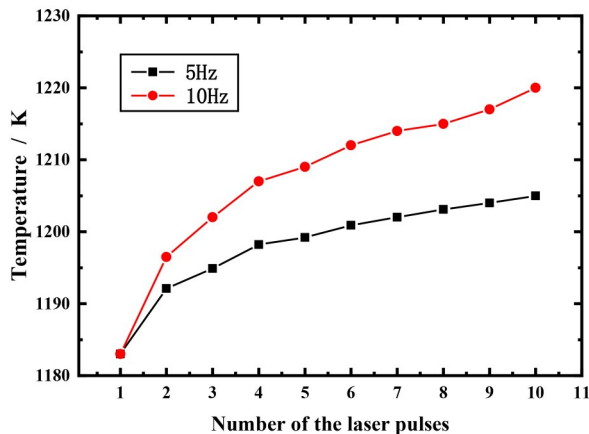


图 11 不同重频下 PbS 最高温度与脉冲数关系图

Fig. 11 The relationship between the maximum temperature of PbS and the number of pulses under different repetition frequencies

4 结论

开展了不同重频下 $2.79 \mu\text{m}$ 中红外激光对 PbS 探测器的损伤实验,观察到激光辐照下探测器的响应电压绝对值变化趋势和损伤形貌,并通过建立 $2.79 \mu\text{m}$ 中红外激光辐照 PbS 探测器的理论模型,数值模拟了 PbS 探测器的温度场分布和内部喷溅颗粒流动轨迹,分析了 $2.79 \mu\text{m}$ 中红外激光辐照 PbS 探测器的损伤机理,获取了相关阈值数据。研究结果表明:在中红外激光辐照下,增加激光能量和辐照时间都会使探测器响应电压绝对值均有不同程度的降低,说明 PbS 探测器探测性能已经受到严重影响; $2.79 \mu\text{m}$ 中红外激光对 PbS 探测器的损伤机理以热熔融为主,在光斑中心处热烧蚀痕迹明显、光斑边缘出现了黄色沉淀物,且喷溅的颗粒物大范围附着;通过进一步理论分析表明,在温度没有达到 PbS 熔点时,PbS 就会发生热分解反应,且黄色沉淀物为热分解反应产物 PbO;计算得到单脉冲 $2.79 \mu\text{m}$ 中红外激光对 PbS 探测器的损伤阈值为 13.03 J/cm^2 ,且脉冲数目、重复频率对损伤效果影响很大。理论分析结果与实验结果吻合良好,说明了理论模型的科学性。

References

- [1] Zhang Wei, Zhang Xiang. The noise research of reducing PbS infrared detector [J]. *ELECTRONIC THCHNOLOGY* (张薇,张翔.硫化铅红外探测器降低噪声的探索.电子技术), 2016, **45**(10):22-24.
- [2] Wang Rui-Li. Lead sulfide quantum dots based optoelectronic materials and devices [D]. Shanghai, P. R. China: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [3] Li Chen-Hao. Research on near infrared photodiode based on lead sulfide quantum dots [D]. Harbin, Heilongjiang, P. R. China: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] Peng Ming-Fa, Wang Yong-Jie, Shen Qing-Qing, et al. High-performance flexible and broadband photodetectors based on PbS quantum dots/ZnO nanoparticles heterostructure [J]. *Science China Materials*, 2019, **62**(02):225-235.
- [5] Wang Si-Wen, Li Yan, Guo Li-Hong, et al. Analysis on the disturbance of CO₂ Laser to long-wave infrared HgCdTe detector [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王思雯,李岩,郭立红,等.CO₂激光对长波红外HgCdTe探测器干扰的分析.红外与毫米波学报), 2010, **29**(02):102-104.
- [6] Zhu Rong-Zhen, Wang Rui, Jiang Tian, et al. Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (朱荣臻,王睿,江天,等.单晶Si、单结GaAs太阳能电池的激光损伤特性对比研究.红外与毫米波学报), 2015, **34**(04):479-485.
- [7] Cheng Zhi-Wu, Cheng Xiang-Ai, Wang Dong, et al. Damage and its mechanism to the visible wavelength filter irradiated by femtosecond laser [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (朱志武,程湘爱,王东,等.多波长飞秒激光损伤可见光滤波片的实验及机理.红外与毫米波学报), 2012, **31**(04):330-335.
- [8] Zhu Ren-Jiang, Pan Ying-Jun, Zhang Peng, et al. Numerical analysis of thermal effects in semiconductor disk laser with heat spreader [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (朱仁江,潘英俊,张鹏,等.半导体薄片激光器窗口散热模式的热效应.红外与毫米波学报), 2014, **33**(03):272-277.
- [9] Ni Jin-Song, 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* (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.红外与激光工程), 2013, **42**(S2):380-386.
- [10] Wang Rui, Si Lei, Cheng Xiang-Ai. The experiment study on optothermal effects of detector irradiated by laser in its response wave band [J]. *Laser and Infrared* (王睿,司磊,程湘爱.波段内激光辐照光电探测器的光热效应实验研究.激光与红外), 2008, **08**:786-788.
- [11] Li Li, Lu Qi-Sheng, et al. PV-type HgCdTe detector irradiated by out-of-band CW $10.6 \mu\text{m}$ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (李莉,陆启生.波段外 $10.6 \mu\text{m}$ 激光辐照中红外 PV 型 HgCdTe 光电探测器机理分析.强激光与粒子束), 2010, **22**(11):2535-2539.
- [12] Zhang Hui-Li, Sun Dun-Lu, Luo Jian-Qiao, et al. Growth, Structure, and spectroscopic properties of a Cr³⁺, Tm³⁺, Ho³⁺, and Pr³⁺ co-doped LuYAG single crystal for $2.9 \mu\text{m}$ laser [J]. *CrystEngComm*, 2016, **18**(31):5826-5831.
- [13] Quan Cong, Sun Dun-Lu, Luo Jian-Qiao, et al. Mid-In-

- frared Laser Performances of Er : YAP Crystals Pumped by Xenon Lamp [J]. *Chinese Journal of Lasers* (权聪, 孙敦陆, 罗建乔, 等. 氙灯抽运 Er:YAP 晶体的中红外激光性能. *中国激光*), 2019, **46**(04): 20-26.
- [14] Liu Jin-Sheng. Development of 2.79 μm Cr, Er : YSGG solid state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering* (刘金生. 2.79 μm Cr, Er : YSGG 固体激光器发展现状. *红外与激光工程*), 2008, **37**(02): 217-225.
- [15] Wang Li, Yang Jing-Wei, Wu Xian-You, *et al.* 2.79 μm narrow pulse, peak power electro-optic Q-switched Cr, Er:YSGG laser [J]. *Chinese Journal of Lasers* (王礼, 杨经纬, 吴先友, 等. 2.79 μm 窄脉冲、高峰值功率电光调 Q Cr, Er:YSGG 激光器. *中国激光*), 2013, **40**(01): 175.
- [16] Wang Xi, Shao Jing-Zhen, Li Hua, *et al.* Analysis of damage threshold of K9 glass irradiated by 248-nm KrF excimer laser [J]. *Optical Engineering*, 2016, **55** (2) : 027102.
- [17] Sun Cheng-Wei, Lu Qi-Sheng, Fan Xiu-Zheng, *et al.* Irradiation Effects of Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press. (孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应. 北京: 国防工业出版社, 2002)
- [18] Wei Li, Chen Jun-Fang, He Qin-Yu, *et al.* Study of lattice thermal conductivity of PbS [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, **584**: 381-384.
- [19] Si Jun-Jie, Wan Hai-Lin, Chen Xiang-Wei, *et al.* Improvement of Respond Uniformity of PbS Photoconductive Film [J]. *Infrared Technology* (司俊杰, 万海林, 陈湘伟, 等. 大面积 PbS 光导薄膜制备工艺优化. *红外技术*), 2007, **29**(3): 143-146.
- [20] Lei Ting, Yu Yu-Nan, Li Yong-Jia, *et al.* Lead Metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. (雷霆, 余宇楠, 李永佳, 等. 铅冶金. 北京: 冶金工业出版社, 2012)