文章编号 2095-1531(2018)06-0983-08

高重频 CO_2 激光干扰技术研究

陈 健*,高慧斌
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要: 本文针对高重频 CO_2 激光干扰技术展开分析和研究。首先,概述了激光对抗武器的概念、分类和特点,以及激光对抗武器的干扰与破坏的主要目标对象。其次,分析了红外探测器激光干扰损伤效果的检测方法。再次,分析了光学元件激光变形损伤效果的检测方法以及光学薄膜的激光损伤检测方法。按照上述检测方法进行实验,分别对红外单元探测器、光学元件、光学薄膜和其他材料的激光损伤阈值实验数据进行分析与讨论。最后,总结了全文并且展望了激光干扰技术的发展。

关 键 词: 激光干扰; 干扰效果评估; 损伤阈值; 高重频; CO_2 激光器
中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A doi: 10.3788/CO.20181106.0983

Research on the interference technology of high repetition frequency CO_2 laser

CHEN Jian*, GAO Hui-bin
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: chenjian*4500@163.*com*

Abstract: This paper analyzes and studies the interference technology of the high repetition frequency CO_2 laser. First of all, the conception, classification and characteristic of the laser weapon as well as the main interference and destruction objects are summarized. Secondly, the detection method of laser interference and destruction effect of the infrared detectors is analyzed. Thirdly, this paper focuses on the analysis of the detection method of laser deformation damage of the optical components. Then, the laser damage detection method of the optical thin film is mainly described. In addition, experiments are carried out in accordance with the above detection methods, and the laser damage threshold experimental data of infrared unit detectors, optical components, optical thin film and other materials are analyzed and discussed. Finally, the laser interference technology is prospected.

Key words: laser interference; interference effect evaluation; damage threshold; high repetition frequency; CO_2 laser

---

收稿日期: 2017-09-11; **修订日期:** 2017-11-13
基金项目: 中国科学院国防科技创新基金项目(No.CXJJ-17-M132)
Supported by National Defense Science and Technology Innovation Fund of Chinese Academy of Sciences(No. CXJJ-17-M132)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

激光对抗武器在系统构成与作战模式上与战术激光武器十分接近，所不同的是，前者主要以干扰、致盲精确制导武器光电传感器为主；后者则更注重对导弹、飞机等目标的硬杀伤。

例如，防空激光对抗武器亦属于激光武器的一种，它以空-地精确光电制导武器为主要作战对象；以干扰、致盲导弹光电传感器或机载光学系统为主要作战目标。通过使其光电传感器迷茫、饱和或暂时失效，从而导致精确光电制导武器偏离航线，光电观瞄设备失去正常工作能力，其对抗能力介于激光致盲武器与战术激光武器之间，是光电有源干扰中最重要的一种对抗手段，也是今后相当一段时间内光电对抗发展的重点[1]。

激光对抗武器具备一些不同于硬杀伤激光武器和对人眼实施激光致盲烦扰设备的特点，主要体现为以下几个方面：(1) 对目标的破坏能力介于激光武器与激光致盲武器之间；(2) 激光器的输出功率与跟瞄精度比硬杀伤激光武器略低；(3) 通常采用与对方光电探测工作波段相近的重频脉冲激光实施干扰。

由于防空型激光对抗武器系统的主要作战对象是空-地光电制导武器，所以首选激光器为 Nd:YAG 固体激光器和 CO_2 气体激光器。Nd:YAG 固体激光器的主要干扰对象是空-地激光制导武器与光学观瞄设备；而 CO_2 气体激光器的主要干扰对象则为空-地红外成像制导武器。

激光对抗武器的干扰/破坏对象主要是光电探测器、光学材料、光学系统，以及非光学材料。但对于长波 CO_2 激光对抗武器来说，则具体有：(1) 中远红外光电传感器，包括 HgCdTe(PC)、HgCdTe(PV)、InSb 和热释电传感器；(2) 长波红外成像系统；(3) 光学透镜及光学材料，包括微光一代管、氟化镁和氟化钡等材料；(4) 光学薄膜；(5) 硬材料，包括玻璃钢和铝镁合金等[2]。

高重频激光是指激光脉冲频率 1 kHz 以上的激光。高重频 CO_2 激光由于具有重复频率高、峰值功率大等优点在军事和工业方面有着重要的应用。

2 红外探测器与红外热像仪系统的激光干扰损伤效果检测

激光损伤阈值的检测方法与激光干扰/损伤阈值的定义密切相关。对于一个激光干扰系统来说，不仅关心作战对象-光电探测器本身的激光损伤阈值，更重要的是其在一个比较接近实际应用系统中的受干扰情况。图 1 给出对红外探测器与红外热成像系统进行激光损伤阈值检测的原理示意图。

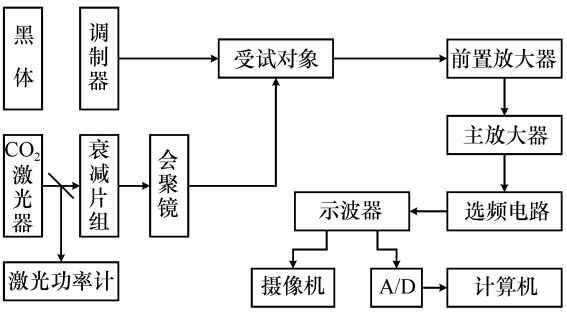

图 1 红外探测器与红外热成像系统进行激光损伤阈值检测的原理示意图

Fig.1 Schematic of laser damage threshold detection of infrared detector and infrared thermal imager

图 1 中 500K 黑体作为红外探测器的参考信号源，该光源信号经调制盘调制后，以 1 000 Hz 的脉冲信号送至受试器件上，经光电转换→前置放大→主放大器→选频电路→示波器及计算机，从监视器屏幕上可以看到红外探测器正常工作时输出的正弦信号波形。再加入一路干扰信号，信号源为重频 CO_2 激光器。该光束经分束器分束，一路送激光功率计进行监测，另一路经光学衰减器>光学会聚透镜>受试对象，与参考信号同时被放大选频，最后得到的是加入干扰激光信号后的器件输出波形。通过增减光学衰减器组的衰减片数，可以改变到达探测器上的干扰激光强度。在实验中可以将系统从正常工作≥受弱干扰≥器件失效的全部过程记录下来。然后再用同一型号的其他几个器件在“受到干扰”和“破坏阈值”的激光功率点上进行验证，以便比较准确地确定“阈值”的量级[3]。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

将光电探测器输出信号波形发生畸变时对应的干扰激光功率密度(W/cm^2) 称为“干扰阈值”; 将探测器输出信号为零时的干扰激光功率密度(W/cm^2) 称为“破坏阈值”。

3　光学元器件激光变形损伤效果检测

光学元器件是指工作在可见光波段的各种光学透镜,它们本身对 10.6 μm 的激光是不透明的,换言之,是强吸收的。故在实际应用中,恰恰能够利用长波激光对其造成损伤,由此扩展激光对抗系统对非工作波段光学系统的作战能力。下面描述光学透镜在 10.6 μm 激光照射下,因受热可能产生的变形、打毛或破裂的实验检测情况。图 2 所示的是一套光学镜片形变自动检测系统。

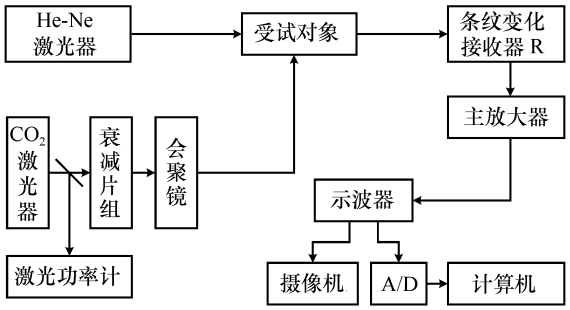

图 2　光学镜片形变自动检测系统

Fig.2　Schematic of auto detection system of optical lens deformation

变形量检测基于迈克耳逊干涉仪的测厚原理(见图 3) 。实验中,把受试镜片插入其中一臂光路中,调整两块反射镜之间的位置,在迈氏干涉仪观察屏上得到完好的干涉花纹,同时在观察屏处放置一个光电接收器件,用以接收亮条纹。亮条纹经放大、滤波处理后,送至示波器、计算机与计数器。条纹不移动时,计数器为零,示波器屏幕上显示的是一组均匀的迈氏条纹; 一旦加入干扰激光并达到一定功率水平时,光学透镜因受热,发生畸变,导致干涉条纹发生变化,最终光电接收器收到一组条纹移动并传至计数器计数,示波器上波形移动。上述检测中,可在很短时间内自动测出条纹移动的个数,在已知其他一些参量后,就可准确计算被测物体的变形量,将光学元件形变时对应的入射激光功率密度定义为“变形阈值”。通过对其形变量的检测可推算透镜畸变对一个光学系统成像所带来的影响。

在图 3 所示的迈克耳逊干涉仪中,当改变 M_1 或 M_2 反射镜的位置时,两束相干光的光程将会改变,在观察屏上就会观察到干涉条纹的移动。

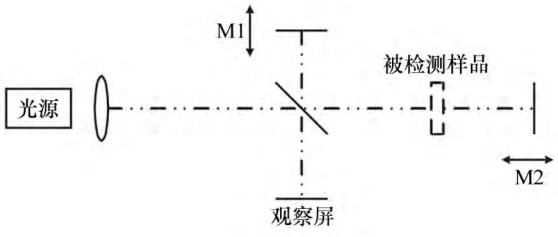

图 3　光学镜片形变自动检测原理示意图

Fig.3　Schematic of auto detection principle of optical lens deformation

若迈克耳逊干涉仪中的光源是波长为 λ,亮度为 B 的单色光,则在观察屏幕上接收到的辐射通量 E 如式(1) 所示。

$$E = B\cos^2\sigma/2 . \tag{1}$$

若以光程差 Δ 代替相位差 σ,则 E 如式(2) 所示。

$$E = B\cos^2(\pi\Delta/\lambda) = B + B\cos[(2\pi/\lambda)\Delta] . \tag{2}$$

式(2) 表示观察屏处的光辐射通量是光程差的余弦函数。如果在观察屏处放置一个光接收器 T,则当光学镜片受强激光照射发生形变时,迈克耳逊干涉仪中两相干光束,将产生额外的光程差 Δ,由此引起条纹移动。T 接收到干涉图形某点处的亮暗变化,并输出一个余弦变化的电信号,该电信号经放大、整形、触发 TTL 计数器。记录光电接收器 R 接收到的迈克耳逊干涉条纹移动个数 N,即可根据下式计算出光学镜片形变量 l,如式(3) 所示。

$$l = N \times \frac{\lambda}{2n} , \tag{3}$$

式中,l 为形变量; N 为计数器计出条纹数目; n 为透镜折射率; λ 波长。

此处的光电接收器为 PIN 管,与一个宽带低噪声放大器混合组成光电接收器件。其响应率为 350 μV/μW($\lambda = 0.84$ μm) ; 带宽 1 MHz; 脉冲上升/下降时间为 250 ns; 输出端 RMS 噪声 ≤ 400 μV; 光敏面直径为 0.5 mm。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上述系统的特点是: 检测精度高、速度快、观察直观。检测精度可达千分之六毫米; 检测速度达每秒 1 兆个条纹数; 并可直接通过显示器观察形变量。

4 激光损伤效果检测

光学薄膜、光学元件和硬材料本不属同类受试对象,但因其检测光路大同小异,故此处一并描述。图 4 给出光学薄膜(或光学元器件、硬材料) 激光损伤实验示意图。

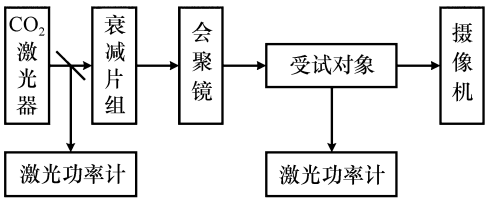

图 4 激光损伤实验示意图

Fig.4 Flow chart of laser damage experiment

虽然激光照射下光学薄膜的损伤阈值检测属于一种传统和常规检测,但在重频 CO_2 激光照射下的实验数据报道的并不多。本实验的受试对象为以石英或硒化锌等材料做基底的 ZnS-A9-ZnSe 膜系,通过监测膜片反射率的变化进行激光损伤效果的间接检测。图 4 中在受试对象下方放置的激光功率计用于读取膜片在正常情况下与受损情况下的反射率变化。

光学元件“破坏”是指除形变以外的诸如“打裂”或“破碎”时对应的激光阈值。受试样品包括可见光透镜、微光一代管、氟化镁和氟化钡材料。图 4 中在受试对象后侧方安置的摄像机,可将器件受损的全过程记录下来。

硬材料的破坏阈值主要指材料在激光照射下的“烧灼”阈值,受试样品有玻璃钢和铝镁合金材料。玻璃钢是导弹头罩最常用的材料,而铝镁合金则是导弹、飞机外壳的蒙皮材料。试验时将干扰激光会聚到受试样品上,直接用肉眼观察其烧灼情况。

5 激光损伤阈值实验结果与讨论

表 1 给出了前述各类器件的激光损伤数据,表中按破坏程度不同,将损伤阈值分成几种,即: 干扰阈值、破坏阈值和其他阈值(如光学元件的变形阈值,硬材料的烧灼阈值等) 。表中还给出了试验用激光器的参数(照射时间、重频率) 和光路参数(会聚光斑的尺寸) ,以及一些受试对象参数,如红外探测器的 D^* 值、材料直径、厚度等,

表 1 不同对象的激光损伤阈值数据

Tab.1 Data of laser damage thresholds for different objects

类型	受试对象名称	激光与光路参数 λ、F、τ	照射时间/s	会聚光斑直径/mm	受试对象参数	损伤阈值(W/ cm^2) 干扰	破坏	其它	说明
红外探测器	HgCdTe(PC)	10.6 μm	0.75~4	1~1.4	D^*: 5.3×10^9~ 8.9×10^{10}	17~22	174~221		
	HgCdTe(PV)	300 Hz 0.2 ms	1	1.4	D^*: (2.8~ 4.8) ×10^9	0.64~0.65	6.5		
	InSb		2.4~2.9	1.2~1.4	D^*: (2.7~ 6.5) ×10^9	20~25	200~245		
	热释电器件		0.75~4.8		D^*: (1.8~ 2) ×10^8	1.3	13		
红外热像仪	HR-2 红外热像仪	10.6μm	4~5	0.2	D^*: 2.2×10^{10}	0.04		严重干扰 ≥300 ~900	干扰阈值: 出现麻点; 严重干扰: 出现饱和和亮线

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光学材料	光学透镜	300 Hz 0.2 ms	4~5	11~28	直径: 15~50 mm 厚度: 2.39 mm; 直径: 48 mm 厚度: 2.3 mm	12~32	变形 91~113	照射 2~5 次碎裂,形变量 0.3~0.4 mm
	氟化钡		4.5~4.8	2	厚度 3 mm	31		出裂纹
	氟化镁		3~4.7	2	Φ 20×1.6 mm	11~14.8		打成三块
薄膜	光学薄膜 ZnS-A9-ZnSe	10.6 μm 300 Hz 0.2 ms	5	1.6	200			
硬材料	玻璃钢	10.6 μm 300 Hz 0.2 ms	4~5	2.2~3.5		烧蚀 8~12	烧出炕	
	铝镁合金		4~5	1~2			无法破坏	

同时注明受到干扰或破坏的程度。

5.1　红外单元探测器实验结果

上述实验涉及 HgCdTe(PC) 、InSb 和热释电传感器 3 种红外探测器,它们均为当今中远红外军用系统中大量使用的探测器件。在 10.6 μm 重频 300 Hz 激光照射下,激光干扰阈值大约为 $6\times10^{-1}\sim2.5\times10^{2}$ W/cm^2,破坏阈值大约为(6~2.5) $\times10^{2}$ W/cm^2。从实验数据与相关干扰现象中可看出: 在 HgCdTe(PC) 、HgCdTe(PV) 和热释电传感器这 3 种均可对 10.6 μm 激光响应的器件当中,HgCdTe(PV) 的激光损伤阈值最低,热释电器件的激光损伤阈值比之高 1 倍; HgCdTe(PC) 的激光损伤阈值比之高 24 倍。而 InSb 器件因对 10.6 μm 激光不响应,因此损伤阈值更高。图 5 给出了上述 4 种器件在比较接近的试验条件下获取的破坏阈值示意图。由图 5 可看出,波长匹配

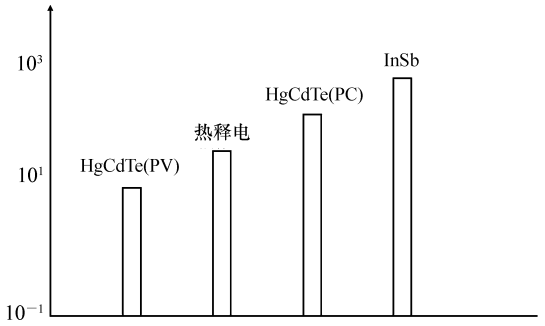

图 5　4 种红外探测器的激光破坏阈值比较(10.6 μm)

Fig.5　Comparison of laser damage thresholds of four infrared detectors(10.6 μm)

器件的破坏阈值低,反之亦然[4-5]。

HgCdTe 探测器分光伏型 HgCdTe 和光导型 HgCdTe。在同样激光功率照射下,光伏型 HgCdTe 较光导型 HgCdTe 的破坏阈值大约低一个量级。由此可见,如果要对光电传感器实施干扰与破坏,激光波长应是被干扰器件的工作波长; 而在长波 HgCdTe 接收器件的选择上,如果为了提高其激光损伤能力,则应首选光导型器件[6-7]。

对照前述 4 类器件的干扰阈值与破坏阈值可以看出, "干扰阈值"通常要比"破坏阈值"至少低一个量级以上。例如,表 1 给出的 HgCdTe(PC) 的干扰阈值为 17~22 W/cm^2,而破坏阈值为 174~221 W/cm^2; HgCdTe(PV) 的干扰阈值为 0.64 W/cm^2,而破坏阈值为 6.6 W/cm^2。

通常重频激光的损伤阈值比单脉冲或连续激光的损伤阈值低。由表 2 列出的 HgCdTe 器件激光损伤数据可知,重频脉冲激光损伤阈值对应的是平均功率密度阈值; 连续激光损伤阈值对应的是连续功率密度阈值; 单脉冲激光损伤阈值对应的是峰值功率密度阈值。如以 HgCdTe(PC) 器件为例,重频激光下损伤阈值比连续激光下的阈值低一个数量级,比脉冲激光下的阈值低 5 个数量级。这是由于重频激光既有较高的峰值功率(实验用激光器的峰值功率为 5 MW) ,同时又有很高的平均功率(300 W) ,所以它对器件具有脉冲积累损伤作用,即当第一个脉冲已致使器件发生损伤斑痕后,它本身就形成一种缺陷,变得比较脆弱,再有后续激光脉冲照射时,将导致该区域激光

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能量的吸收增加或破裂面积扩展，由此造成重频激光下具有较低损伤阈值[8-9]。

表 2 几种激光器损伤阈值比较

Tab.2 Comparison of damage thresholds for different type of lasers

参数	重频(300 Hz) CO_2激光	单脉冲 CO_2激光	连续 CO_2激光
HgCdTe(PC) /(W·cm^{-2})	(1~2)×10^2	8×10^7	≥10^3
照射时间/μs	75~4	1	≥10^6
脉冲宽度/μs	0.2	1	

5.2 红外探测系统实验结果

当照射激光功率处于干扰量级时，重频脉冲为 10.6 μm 激光干扰信号被红外探测系统所接收，并进入其放大电路的通频带。当干扰激光功率达到器件饱和水平时，虽然已经超出了红外系统能够自动增益控制的限度，使之无法正常检测信号，但还未达到使其永久损坏的程度。所以，干扰信号一旦消失后，系统马上又恢复正常工作。激光干扰前后红外器件的信号输出情况如图 6 所示。虽然此时探测器并未真正被破坏，但这种激光干扰对于任何一个制导或跟踪系统来说，都将构成致命打击。因为整个系统在不能正常工作期间将因丢失寻找或跟踪目标而偏离预定的航线。

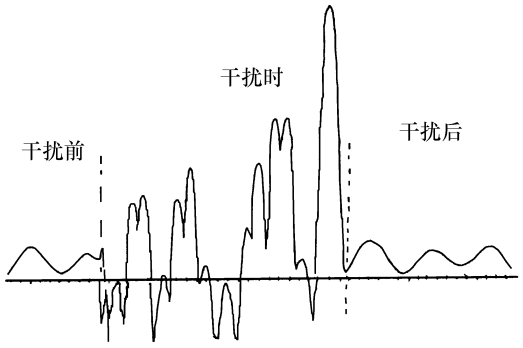

图 6 红外探测器受干扰前后输出信号波形

Fig.6 Output signal wave shapes of infrared detector before and after interference

红外成像系统的激光干扰阈值通常要高于单元器件的相应阈值，这一规律从表 1 所列数据也可看出。例如，红外成像系统发生干扰的阈值大约在几百瓦每平方厘米，而单元 HgCdTe(PC) 器件的干扰阈值仅为几十瓦每平方厘米，虽然前者比后者的激光干扰阈值要高出一个数量级。分析其原因为，红外成像系统为一个扫描系统(25 frame/s)，而干扰激光是以一定重复频率发射(300 Hz)的脉冲串。在此情形下，即使每一个激光脉冲干扰信号都可以进入到红外成像系统的扫描视场中，则红外系统中绝大多数的激光脉冲信号是以一定的倾斜角度射到探测器上的。所以，对于扫描成像系统来说，在同样的 1 s 内，能够落在成像面上的干扰脉冲个数显然大大少于落到一个独立单元器件上的个数，这样激光脉冲对于器件的积累损伤效应就不够强。若想增强干扰效果，就需要提高单脉冲激光的能量，或是进一步提高激光的照射频率。

5.3 光学元件实验结果

10.6 μm 激光对非工作波段光学透镜(尺寸、厚度、材料均不同)、微光夜视一代管、氟化镁和氟化钡材料的损伤效应不再是“干扰”，而直接是“损伤”。由表 1 所列重频 10.6 μm 激光损伤阈值数据可以看到：10.6 μm 激光对工作在可见光至近红外区的光学材料具有很强的破坏效果，它既可造成材料表面变形，也可造成材料烧蚀与破坏。例如，微光夜视仪的像增强器在 CO_2 激光照射下，光纤面板先是烧红、着火，而后炸裂。而可见光玻璃材料的“打毛”现象很少，多是炸裂破坏。对氟化镁和氟化钡这类材料，通常在受照后按晶轴走向十分有规律的分裂成几块。由此可见，在一定的激光功率密度下，对于非工作波段材料，10.6 μm 激光具有相当好的破坏效果。

光学元件样品中如重冕牌玻璃、重钡火石玻璃、F4 玻璃、普通玻璃、K9 玻璃、氟化镁、氟化钡，以及石英等几种材料的损伤阈值，大致分布在 11~31 W/cm^2 范围之内。从数据的离散情况来看，激光损伤阈值与样品尺寸、厚度等关系不是十分密切，但对不同材料有所不同。例如，对于氟化镁材料，若直径与厚度分别为 Φ20 mm×1.6 mm，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

阈值范围在11~14.8 W/cm^2; 而重钡火石镜片,当直径与厚度分别为 Φ32 mm×7 mm 时,阈值范围则为 22.3~30.8 W/cm^2。

5.4　光学薄膜实验结果

实验样品为以 K9 玻璃和熔石英做基底,采用电子束蒸镀或离子镀方法制作的 ZnS 和 ZnSe 膜层。它们是一组可透过可见光和近红外光,可反射 10.6 μm 的分色膜,样品尺寸分别为 Φ10 mm和 Φ35 mm。

实验表明上述 ZnS-Ag-ZnSe 膜片的激光损伤阈值大约在 200 W/cm^{2}量级。可看到以下一些现象,即: 石英基底比 K9 基底材料的损伤阈值高; ZnS 膜系的损伤阈值比 ZnSe 高; 离子镀工艺的膜层抗损伤能力好于电子镀工艺; 重频激光损伤阈值低于单脉冲损伤阈值; 采用相同直径的激光损伤光斑时,小尺寸膜片比大尺寸膜片的损伤阈值低[10]。

5.5　其他材料实验结果

实验样品有玻璃钢和铝镁合金两种,样品厚度大约在 2 mm 左右。激光器波长为 10.6 μm、脉宽为 0.2 μs、重频为 300 Hz,会聚激光斑直径 Φ2 mm。能够达到的损伤效果是: 由于玻璃钢对 10.6 μm 波长具有较高的吸收系数,所以玻璃钢的激光损伤阈值仅为 8~12 W/cm^2。铝镁合金材料则对 10.6 μm 波长具有很高的反射系数,入射激光几乎全部被反射,所以在现有激光功率密度下,看不到任何激光损伤的迹象。

国外对长波激光损伤导弹导引头材料也开展了很长时间的研究,表 3 给出一些典型的实验数据。由于激光器参数、实验条件,以及受试对象不同,所以表中所列数据原则上与不同条件下获得的数据不具有直接的可比性。表 3 见附录。

表 3　CO_2 激光破坏导弹导引头材料实验数据

Tab.3　Experimental data of missile seeker materials destroyed by CO_2 laser

材料	厚度/mm	作用激光功率/W	作用面积/cm^2	功率密度/(W·cm^{-2})	作用时间/s	作用效果	备注
K_8	2	490	4.90	100	2.8	炸裂	远场破坏
K_8	3	562	4.90	114.7	3	炸裂	远场破坏
K_9	5	570	4.90	116.3	5	炸裂	远场破坏
MgF_2	3	505	4.90	103.3	2	炸裂	远场破坏
MgF_2	3	730	2.38	211	0.428	炸裂	远场破坏
MgF_2	6	1 474	3.0	438	0.224	炸裂	近场破坏
K_9	4	905	2.63	344.1	0.896	炸裂	近场破坏
K_9	6	1 463	3.05	556	0.768	炸裂	近场破坏
玻璃钢	3	2 100	3.57	588.2	3	炸裂	头罩实物
玻璃钢	3	3 000			2	炸裂	头罩实物

6　结　论

激光制导武器在实战中表现出了出色性能,使各国对激光干扰技术都非常重视。本文针对高重频 CO_2 激光干扰技术展开分析和研究。首先,本文概述了红外探测器、红外热像仪和光学元器件的激光干扰损伤效果检测。其次,本文分析了激光损伤效果检测方法。然后,进行了激光损伤阈值实验并对激光损伤阈值实验结果进行了分析讨论。

美国自上世纪 70 年代中期起,分别以野战防空和机载自卫为目标,先后开展了多项激光对抗武器系统的开发与研制。经过 20 余年的努力,激光对抗武器不仅已逐步成为一代实用型光电对抗装备,而且还为进一步发展更大功率的战术激光武器与战略激光武器奠定了重要技术基础。

参考文献:

[1]　刘志春,孙玉铭,苏震,等.国外激光干扰技术的发展[J].舰船电子工程,2009,29(7):21-24.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

LIU ZH CH,SUN Y M,SU ZH,*et al*.. Development of the foreign laser interference technology [J]. *Ship Electronic Engineering*,2009,29(7):21-24.(in Chinese)

[2] 朱孟真,程勇,谭朝勇,等.国外空间激光的发展现状 [J].红外与激光工程,2012,41(12):3241-3248.
ZHU M ZH,CHENG Y,TAN CH Y,*et al*.. Development of foreign spaceborne laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,41(12):3241-3248.(in Chinese)

[3] 汤伟,郭劲,邵俊峰,等.激光重频对脉冲非稳腔 TEA CO_2 激光远场传输特性的影响分析 [J].红外与激光工程,2013,42(9):2380-2385.
TANG W,GUO J,SHAO J F,*et al*.. Analysis of far-field characteristics with repetition frequency of TEA CO_2 laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(9):2380-2385.(in Chinese)

[4] 解晓辉,廖清君,杨勇斌,等.HgCdTe 甚长波红外光伏器件的光电性能 [J].红外与激光工程,2013,42(5):1141-1145.
XIE X H,LIAO Q J,YANG Y B,*et al*.. Electro-optical characteristics of HgCdTe very long wavelength infrared photovoltaic detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(5):1141-1145.(in Chinese)

[5] 王思雯,郭立红,赵帅,等.高功率 CO_2 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验 [J].光学 精密工程,2010,18(4):798-804.
WANG S W,GUO L H,ZHAO SH,*et al*.. Experiments of high-power CO_2 laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(4):798-804.(in Chinese)

[6] 王挺峰,汤伟,邵俊峰,等.高重复频率 CO_2 激光重复频率大小对 HgCdTe 晶体温升及损伤特性影响分析 [J].中国激光,2015,42(2):0206006.
WANG T F,TANG W,SHAO J F,*et al*.. Analysis of temperature and damage characteristics of HgCdTe crystal on repetition frequency of CO_2 laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2015,42(2):0206006.(in Chinese)

[7] 汤伟,邵俊峰,赵帅,等.高重频 CO_2 激光对 $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ 晶体的损伤 [J].红外与激光工程,2013,42(10):2663-2668.
TANG W,SHAO J F,ZHAO SH,*et al*.. $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ crystal damaged by high repetition frequency CO_2 laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(10):2663-2668.(in Chinese)

[8] 汤伟,吉桐伯,郭劲,等.高重频 CO_2 激光损伤 HgCdTe 晶体的数值分析 [J].中国光学,2013,6(5):736-742.
TANG W,JI T B,GUO J,*et al*.. Numerical analysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency CO_2 laser [J]. *Chinese Optics*,2013,6(5):736-742.(in Chinese)

[9] 徐向晏,陆卫,陈效双,等.光伏型长波 HgCdTe 红外探测器的数值模拟研究 [J].红外与毫米波学报,2006,25(4):251-256.
XU X Y,LU W,CHEN X SH,*et al*.. Numerical simulation of long wavelength photovoltaic HgCdTe photodiodes [J]. *Infrared Millim Waves*,2006,25(4):251-256.(in Chinese)

[10] 王玺,卞进田,李华,等.重频脉冲 CO_2 激光损伤 K9 玻璃的实验 [J].红外与激光工程,2013,42(5):1204-1207.(in Chinese)
WANG X,BIAN J T,LI H,*et al*.. Experiment on damage in K9 glass due to repetition rate pulsed CO_2 laser radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(5):1204-1207.(in Chinese)

作者简介:

陈 健(1981—),吉林长春人,博士,助理研究员,2005 年、2007 年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2014 年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事高精度快速数字伺服系统方面的研究。E-mail: chenjian4500@163.com

高慧斌(1963—),研究员,1985 年、1990 年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电测量和精密跟踪控制技术方面的研究。E-mail: gaohuibin1@163.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net