

文章编号: 1672-8785(2014)01-0009-05

红外焦平面器件对不同波长激光辐照的响应特性研究

王毕艺¹ 官上洪¹ 赵万里¹ 刘阳²

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北三河 065201;

2. 北方电子设备研究所, 北京 100191)

摘 要: 为了有效地干扰红外焦平面探测器, 需要研究在不同波长激光的辐照下该探测器的响应情况。本文采用四种波长的激光进行辐照实验。研究结果表明, 探测器像元很容易达到饱和状态, 器件的响应与光谱响应曲线基本吻合。结果验证了干扰效果与光谱响应曲线之间的关系, 为中红外激光干扰提供了实验依据。最后对红外焦平面器件对波段内激光的响应机制进行了简要分析。

关键词: 红外焦平面; 饱和阈值; 光谱响应曲线; 响应机制

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.01.002

Study of Response Characteristics of Infrared Focal Plane Device to Irradiation of Different Wavelength Lasers

WANG Bi-yi¹, GUAN Shang-hong¹, ZHAO Wan-li¹, LIU Yang²

(1. Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China; 2. North Electronic Equipment Research Institute, 947 mailbox, Beijing 100191, China)

Abstract: To interfere with an infrared focal plane array (IRFPA) detector effectively, it is necessary to analyze the response of the device under the irradiation of different wavelength lasers. Four lasers with different wavelengths are used in an irradiation experiment. The experimental result shows that the detection elements in the device can reach their saturation states easily and the device's response is in agreement with its spectral response curve. This has verified the relationship between the interference effect and the spectral response curve and provided the experimental basis for the middle infrared laser interference. Finally, the response mechanism of the infrared focal plane device to the laser irradiation in a given waveband is analyzed in brief.

Key words: IRFPA; saturation threshold; spectral response curve; response mechanism

0 引言

自然界中一切高于绝对零度的物体都会发射红外线。红外探测器通过探测目标的红外辐射, 经光电转换、电信号处理等手段, 将目标物

体的温度分布图像转换成视频图像。随着科技的日益发展, 红外器件已被广泛应用于消防、工业、勘探和军事等领域。红外焦平面成像器件由于具有结构简单、空间分辨率高、探测能力强

收稿日期: 2013-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)

作者简介: 王毕艺 (1983-), 男, 湖南湘潭人, 硕士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: wangbiyi530@163.com

和帧频高等优点, 迅速成为红外成像技术的主流器件^[1,2]。

用于制作红外焦平面器件的材料主要有 InSb、PbS 和 HgCdTe 等, 其中 HgCdTe 材料因为电子有效质量高、响应时间短和响应频带宽而得到了广泛的应用。红外探测器属于弱光探测器件, 激光辐照极易对其造成干扰, 使其失去探测能力, 从而造成整个光电系统无法正常工作, 因此研究激光对 HgCdTe 红外焦平面探测器的干扰十分重要。目前, 国内外诸多学者已开展了相关方面的研究, 但这些研究工作主要集中在红外单元器件的激光辐照效应上, 对红外焦平面器件的研究相对较少^[3-5]。因此, 本文通过激光干扰红外焦平面器件的实验, 得出相应的像元饱和阈值。通过分析器件的响应特性, 探索最佳的干扰激光波长, 为中红外激光干扰提供实验依据。最后对器件的响应机理进行初步的解释。

1 实验系统简介

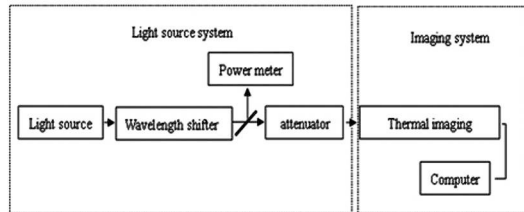


图 1 实验系统的示意图

实验系统分为光源和红外焦平面器件两部分, 如图 1 所示。采用波长可以调节的激光器模拟目标的红外辐射。强光系统为低重频输出, 出口光斑的直径为 5 mm, 输出的激光波长为 3.5 μm 、3.8 μm 、4.15 μm 和 4.3 μm 。光路中功率计实时监测光强, 分束镜的透射光和反射光之比为 1:9。用波长调节组件调节输出波长, 并用衰减片控制光强。衰减后的光线经扩束后进入红外焦平面器件, 激光出光口离探测器的距离为 1 m。选择液氮致冷的 HgCdTe 中波红外传感器阵列作为实验红外焦平面器件, 器件输出的电平信号经图像采集卡后进入计算机, 实时记录图像的变化。器件的积分时间为 2 ms, 频率为 50

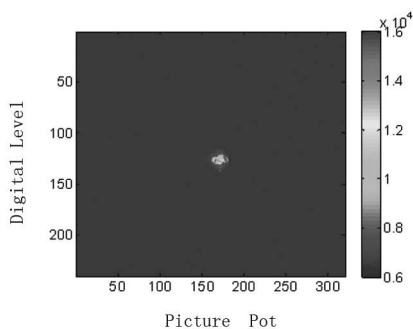
Hz, 像元数为 320×240, 像元尺寸为 30 μm 。探测器响应的波长范围为 3.4 μm ~5.0 μm , 光学镜头的 F 数为 2, 镜头的焦距为 40 mm。

2 实验结果与分析

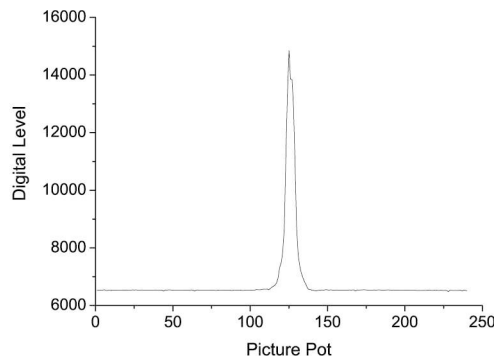
2.1 像元饱和

2.1.1 实验结果

实验在室温下进行。激光器的出光口离探测器的距离为 1 m, 激光器的输出波长为 3.5 μm , 最大输出能量为 4 mW。经衰减片组衰减及传输损耗后, 到达探测器镜头前的激光功率为 1.54×10^{-3} mW。镜头对 3.5 μm 激光的透过率为 0.86。因此, 到达探测器焦平面的激光功率为 1.32×10^{-3} mW。



(a) 干扰图像



(b) 170 列像元的灰度值

图 2 干扰图像及其中心列像元的输出电平值分布

红外焦平面器件的干扰图像如图 2(a) 所示。从图中可以看出, 器件的响应非常明显。其辐照中心像元的响应电平值达到 1.52×10^4 , 接近器件输出电平的饱和值 (214), 表明在此功率

激光的作用下,器件的中心像元已达到像元饱和状态(器件输出的图像为 14 位的 RGB 图像,输出的电平值为 [0,214] 范围内的整数)。

聚焦后的光斑直径约占 12 个像元,器件每个像元的尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,光斑直径为 $12\times 30=360\text{ }\mu\text{m}$,器件焦平面上的光斑面积为

$$S=\pi\times(1.8\times 10^{-2})^2=1\times 10^{-3}\text{cm}^2$$

光斑中心所在列(第 170 列)的所有像元的响应电平值如图 2(b)所示。从图中可看出,图像的背景响应电平值大约在 6500 左右。在激光辐照区域,响应电平值迅速上升,电平的最高值达到饱和值。此时器件达到像元饱和状态。器件的像元饱和阈值为(焦平面处)

$$P'=\frac{P}{S}=\frac{1.3\times 10^{-3}}{1\times 10^{-3}}=1.32(\text{mW}/\text{cm}^2)$$

2.1.1 结果分析

由器件的设计数据可知,实验中所使用的 HgCdTe 材料的单个像元饱和势阱的电子容量为 $N=4\times 10^7$ 个, $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 激光的绝对量子效率 $\eta=25\%$ 。由此可知,器件单个像元饱和所需的光子数 $M=N/\eta=8\times 10^7/0.25=3.2\times 10^8$ 个。

单个光子的能量 $E^p=h\nu=6.63\times 10^{-34}\times 3\times 10^8/(3.5\times 10^{-6})=5.7\times 10^{-20}\text{J}$ 。单个像元饱和所需的能量 $E'=M\times E^p=3.2\times 10^8\times 5.7\times 10^{-20}=1.82\times 10^{-11}\text{J}$ 。

室温时,像元对环境背景的响应电平值为 6800,像元饱和响应的电平值为 2^{14} 。因此,如需使单个像元达到饱和,所需激光能量的理论值 $E^t=E'\times(2^{14}-6800)/2^{14}=1.06\times 10^{-11}\text{J}$ 。

由实验结果可知,入射到器件焦平面处的激光功率为 $1.32\times 10^{-3}\text{ mW}$ 。器件的积分时间为 2 ms 。在器件的积分时间内,器件接收到的激光能量 $E^i=P\times t=1.32\times 10^{-3}\times 2\times 10^{-3}=2.64\times 10^{-6}\text{ mJ}$ 。

光斑在器件焦平面上所占的像元数约为 134 个,所以单个像元所受的激光能量 $E^f=E^i/134=2.64\times 10^{-9}/134=1.97\times 10^{-11}\text{J}$ 。在此能量激光的辐照下,像元达到饱和,如图 2 所示。

排除实验误差及计算误差的影响,对比实验值 $1.97\times 10^{-11}\text{ J}$ 与理论计算值 $1.06\times 10^{-11}\text{ J}$,这两个值比较接近。由此可知,此器件的像元饱和阈值为 $1.32\text{ mW}/\text{cm}^2$ 。

2.2 器件对不同强度不同波长的激光响应

2.1.1 器件对不同强度激光的响应

调节 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 激光的入射功率,并进行激光干扰实验。不同功率下,红外焦平面器件的输出图像如图 3 所示(为排除背景信号的干扰,图 3 中所取电平值为器件的响应电平值减去背景响应电平值)。

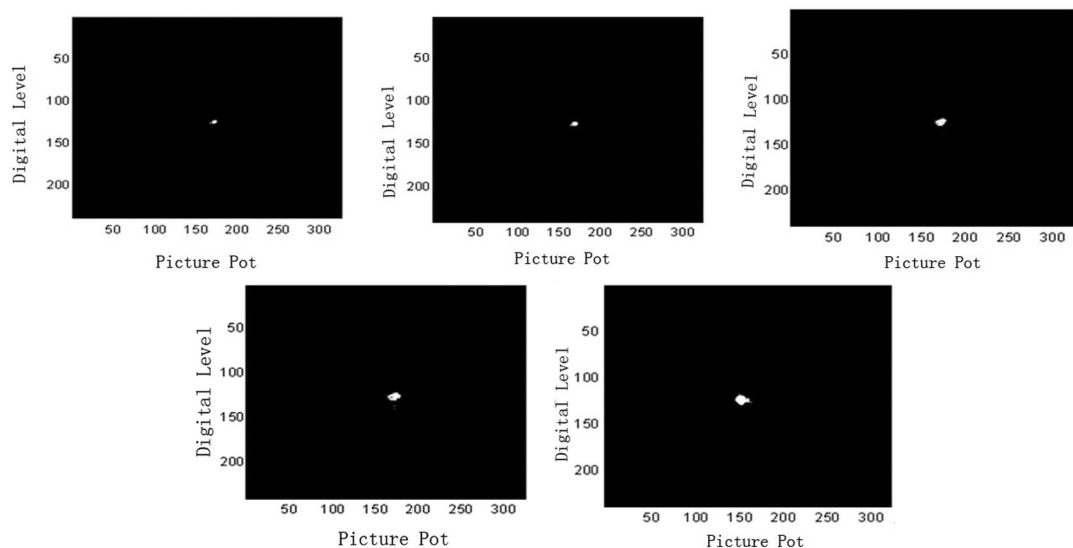


图 3 红外焦平面的输出图像

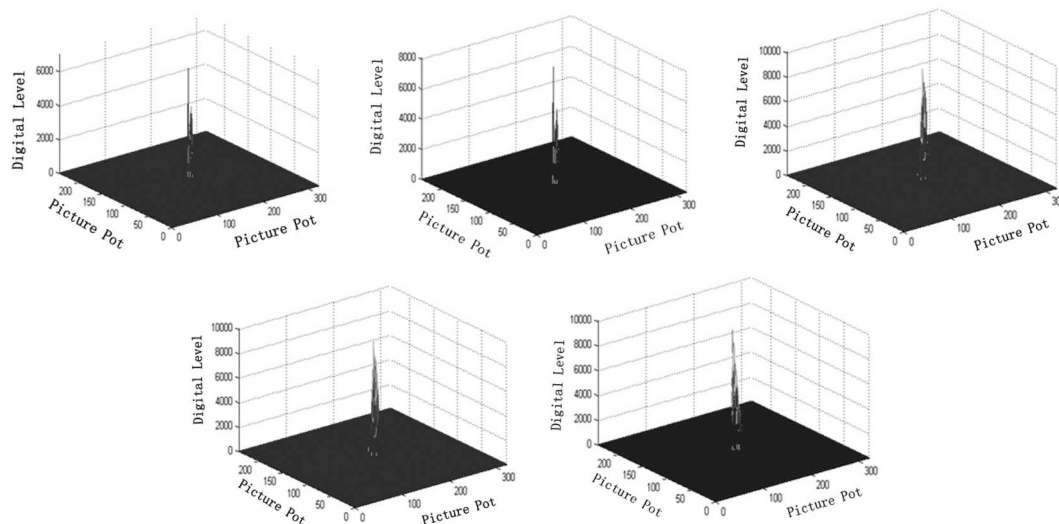


图 4 红外焦平面器件的输出电平值

从图 3 中可以看出, 随着入射激光强度的增大, 器件的响应逐步增强, 响应电平值不断增加, 响应区域也不断扩大。通过分析实验数据, 得出激光强度与器件响应之间的关系如图 4 所示。

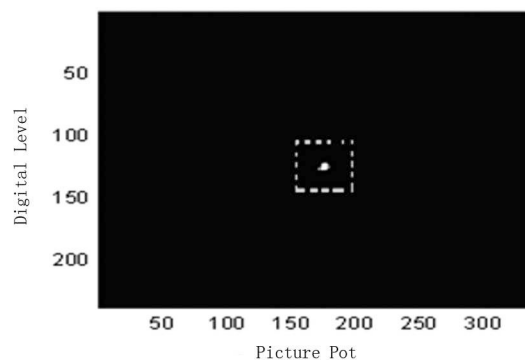


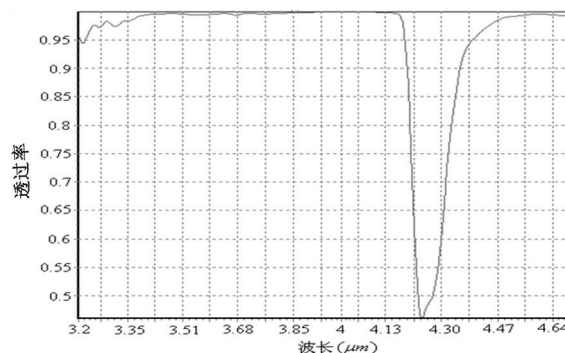
图 5 强光辐照区域红外焦平面的输出电平值

从图 4 中可以看出, 随着激光功率的增强, 响应的像元数随之增多, 像元输出的电平值不断增大。为了研究器件对激光的总响应程度, 选取有激光辐照的区域, 将所有像元输出的电平值相加, 所得电平值的总和即为红外焦平面器件对入射激光的响应程度, 如图 5 中虚线区所示。其中, 为真实反映器件对激光的响应, 所有像元均不能达到饱和状态。

2.1.1 器件对不同波长激光的响应

按照上述研究方法, 变换激光的输出波长, 使其分别输出 $3.5\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}$ 、 $4.15\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}$ 的激光, 然后研究红外焦平面器件对这四种波长激光的响应程度。

实验前首先研究了 $3.2\ \mu\text{m}\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 波段内大气的透过率。当传输距离为 $1\ \text{m}$ 时, 激光的透过率谱如图 6 所示。

图 6 $3.2\ \mu\text{m}\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 大气的透过率

从图 6 中可以看出, 传输距离为 $1\ \text{m}$ 时, 大气对 $3.5\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.15\ \mu\text{m}$ 这三种波长的激光基本不吸收, 其透过率高达 99.5%; 而对 $4.3\ \mu\text{m}$ 的激光, 由于 CO_2 的主要红外吸收区在 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近, 因此透过率较低, 大约为 60%。

探测器镜头对四种不同波长激光的透过率见表 1。

表 1 热像仪镜头对不同波长激光的透过率

波长 (μm)	3.5	3.8	4.15	4.3
透过率	0.86	0.88	0.87	0.79

考虑激光的大气衰减以及镜头的透过率, 调节激光器的输出功率与衰减片组的衰减率, 使入射到器件焦平面上的不同波长的激光能量保持一致。

当激光功率为 $5 \times 10^{-4} \text{ mW}$ 和 $7.5 \times 10^{-4} \text{ mW}$ 时, 器件总的响应值与波长的关系如图 7 所示。

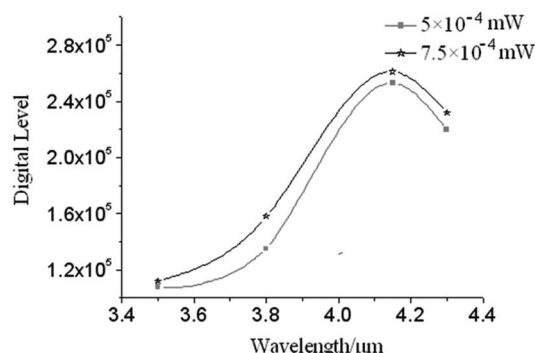


图 7 红外焦平面响应值与强光波长的关系

从图 7 可以看出, 在相同的激光功率下, 红外焦平面器件对不同波长激光的响应程度是不一样的。在波长为 $3.5 \mu\text{m}$ 的激光作用下, 红外焦平面的响应值较低。随着激光波长的变长, 器件响应的电平值变大, 在 $4.15 \mu\text{m}$ 波长时达到顶峰, 随后响应值有所下降。综上, 四种波长激光辐照下的响应值 (Digital Level, DL) 的大小顺序为 $DL_{4.15\mu\text{m}} > DL_{4.3\mu\text{m}} > DL_{3.8\mu\text{m}} > DL_{3.5\mu\text{m}}$ 。

光电探测器的光电转换特性用响应度表示, 光谱响应度是光电探测器对不同入射波长的光辐射的响应能力。用 $R_\nu(\lambda)$ 表示在波长为 λ 的单位功率激光辐照下光电探测器输出的信号电压, 电压光谱响应度 $R_\nu(\lambda)$ 为^[6,7]

$$R_\nu(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)}$$

式中, $P(\lambda)$ 是波长为 λ 时的入射光功率, 是探测器对光辐照的响应电压值。从式 (1) 可看出, $R_\nu(\lambda)$ 值越大, 探测器对此波长的光就越敏感, 光电转换效率也就越高, 器件输出的电平值也

越高。因此, $R_\nu(\lambda)$ 值的大小直接决定着器件对不同波长激光的响应程度。

芯片的制作材料不同, 探测器的光谱响应曲线也不相同。HgCdTe 中波红外焦平面探测器的光谱响应曲线如图 8 所示^[8]。

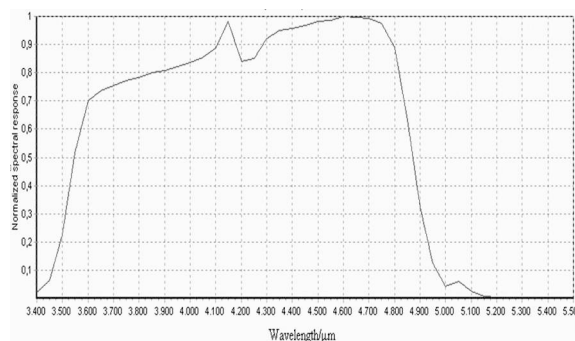


图 8 红外焦平面的光谱响应曲线

从图 8 可以看出, 器件的响应强度与实验所采用的四种激光波长的关系为 $DL_{4.15\mu\text{m}} > DL_{4.3\mu\text{m}} > DL_{3.8\mu\text{m}} > DL_{3.5\mu\text{m}}$ 。此理论分析结果与实验结果基本上保持一致 (由于实验误差以及探测器封装滤光片的影响, 实验结果与理论分析结果有一定的偏差, 这将在今后的工作中进一步修正)。结果表明, $R(\lambda)$ 值越大, 器件的响应效果就越好, 反之, 响应则较差。此结果较好地验证了激光波长与器件光谱响应曲线之间的关系, 能为实际工程应用提供技术支撑。

3 结论

本文开展了不同波长激光对红外焦平面器件辐照的实验, 得到了红外焦平面器件像元饱和所需的激光强度, 获得了不同波长激光对器件的干扰结果, 确定了激光干扰红外焦平面器件所需的最佳激光波长。分析发现, 在不同波长激光的辐照下, 器件响应与光谱响应曲线基本吻合, 从而验证了激光波长与器件光谱响应曲线之间的关系, 为实际工程应用提供了技术支撑。实验中, 由于实验误差以及器件封装滤光片的影响, 实验结果与理论曲线不完全重合, 在今后的实验中将进一步改善。

(下转第 37 页)