

〈材料与器件〉

## 激光损伤非制冷微测辐射热计的实验研究

周冰<sup>1</sup>, 贺宣<sup>2</sup>, 刘贺雄<sup>1</sup>, 李秉璇<sup>1</sup>, 张俊祥<sup>2</sup>

(1. 陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 解放军94019部队, 新疆 和田 848000)

**摘要:** 在市场需求驱动下, 非制冷红外测辐射热计阵列在多个领域正逐步应用, 对其激光干扰的研究也被提上了日程。本文以多晶硅探测器为例, 结合非制冷微测辐射热计阵列的构造和工作原理, 分析了激光辐照作用下的温度响应; 通过 10.6 μm 连续激光的辐照实验, 得到了像元阵列进入不同损伤状态对应的激光功率范围, 分析了激光损伤的热效应机制, 指出干扰面积大于光斑面积是由于热量的“倒灌”; 将战场上激光传输的影响简单等效为斩波调制, 研究了调制频率和占空比对激光干扰效果的影响。经分析得出, 在调制频率 100~500 Hz、占空比 0.1~0.5 的范围内, 连续激光对非制冷微测辐射热计在传输等效调制频率较低、占空比较大的条件下能得到更好的干扰效果。

**关键词:** 非制冷微测辐射热计; 激光损伤; 功率密度; 损伤等级; 多晶硅

中图分类号: TN977 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)01-0001-07

## Experimental Study on Laser-induced Damage to an Uncooled Microbolometer

ZHOU Bing<sup>1</sup>, HE Xuan<sup>2</sup>, LIU Hexiong<sup>1</sup>, LI Bingxuan<sup>1</sup>, ZHANG Junxiang<sup>2</sup>

(1. Department of Opto-Electronics Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2. Unit 94019 PLA, Hotan 848000, China)

**Abstract:** Driven by market demand, uncooled infrared bolometer arrays are gradually becoming popular in several fields, and their laser interference has become a major research topic. In this study, based on the structure and working principles of an uncooled microbolometer array, temperature response under laser irradiation is analyzed. An experiment of 10.6 μm continuous laser irradiation of an uncooled polysilicon detector shows that the pixel array enters different damage states. The laser power range and thermal effect mechanism of laser damage are also analyzed. Previous studies have shown that the interference area is larger than the spot area as a result of “heat inversion” and that the influence of laser transmission on the battlefield is equivalent to chopping modulation. The effects of modulation frequency and duty cycle are also studied. Analytical results show that a continuous laser can achieve a better interference effect on an uncooled microbolometer with a low transmission modulation frequency and large duty ratio.

**Key words:** uncooled microbolometer, laser damage, power density, damage level, polysilicon

## 0 引言

随着红外探测技术不断革新, 基于非制冷红外测辐射热计阵列的红外成像系统已在热成像、夜视(军用、商用)、地雷探测、侦察、监视、消防、医学成像、预测性维护和工业过程控制等领域有所应用。作为电阻型红外探测器, 非制冷红外测辐射热计阵列达

到了以前只有制冷型红外光子探测器才能实现的性能水平<sup>[1]</sup>。鉴于其较高的性能和较低的制造成本, 未来军事装备的研发中也将会得到大范围的普及, 特别是多晶硅探测器, 凭借着其诸多优点而备受青睐。与之相对应的是, 针对敌方侦察、成像系统的激光压制干扰技术研究也被逐步提上日程, 因而激光损伤非制冷微测辐射热计的研究受到人们的广泛关注, 具有重

要意义。

由于非制冷微测辐射热计具有较高的热敏性能，它在激光的辐照作用下极易发生饱和致盲，甚至永久损伤。本文以多晶硅探测器为例，根据器件的成像原理，分析了激光辐照过程中像元阵列产生的一系列微观效应，并进行了实验，得到了使多晶硅探测器进入不同损伤状态的辐照激光功率范围，推断了激光辐照像元阵列的热效应损伤机理；结合实际战场的光电对抗环境，将激光传输过程中受到各种因素的影响等效为斩波调制，通过实验分析得到了调制频率和占空比对探测器成像的影响，对取得更好的激光干扰效果和对应的防护措施给出了建议。

### 1 非制冷微测辐射热计

当前多数非制冷红外探测器的核心元件为由像元组成的红外焦平面阵列，常见的规格有  $800 \times 600$ ， $320 \times 240$  和  $384 \times 288$  等<sup>[2]</sup>，光敏材料以氧化钒( $VO_x$ )和多晶硅为主。它被置于光学系统焦平面的位置，与集成电路相连，用于接收目标区域红外辐射并实现光电转换的功能<sup>[3]</sup>。

#### 1.1 构造

非制冷微测辐射热计的单像元一般为桥式结构，如图 1 所示<sup>[4]</sup>。该器件主要分为两部分，桥面上的光敏材料主要用于接收红外辐射，温度升高后自身电阻值发生变化；桥腿部分用于连接偏置电路，可以实时采集到该像元的信息，此外还兼具支撑、导热等作用<sup>[5]</sup>。衬底表面为一层红外光的反射物质，这样可以与距离  $\lambda/4$  的桥面之间形成谐振腔，增加光敏材料的吸收率。对用于接收  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  长波红外的探测器而言，谐振腔的厚度一般为  $2.5 \mu\text{m}$  左右<sup>[6]</sup>。

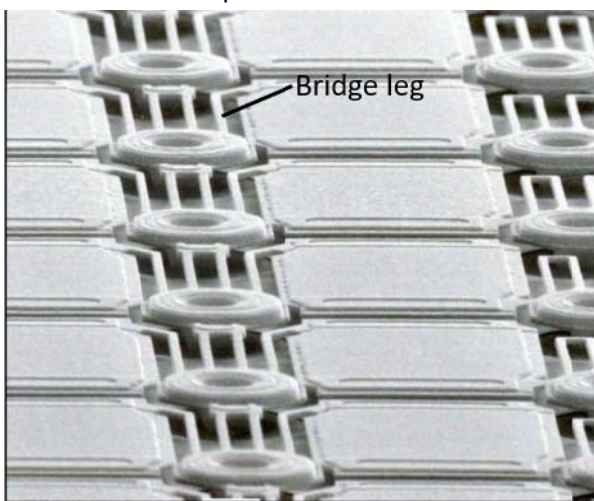


图 1 桥式结构的像元阵列

Fig.1 Cell array of bridge structure

在像元阵列感应目标区域热辐射的同时，信号读

出电路逐行偏置，并串行采集各个点的像素值，经复用、放大最终拼组成实时显示的红外图像。

显然，在一定的温度响应范围内，各像元拥有稳定、相同的基准温度，是焦平面阵列获得良好工作性能的必要条件，因而衬底下方需要集成热电制冷器(thermo-electric cooler, TEC)来维持恒温。非制冷红外焦平面阵列各层分布可用图 2 来描述<sup>[7]</sup>，为保证非制冷微测辐射热计线性工作时衬底的恒温，TEC 最大制冷功率应大于像元点饱和时所需散热。衬底介于像元与 TEC 之间，起到了连接、支撑、导热等作用，并为焦平面阵列上各像元提供参照温度。

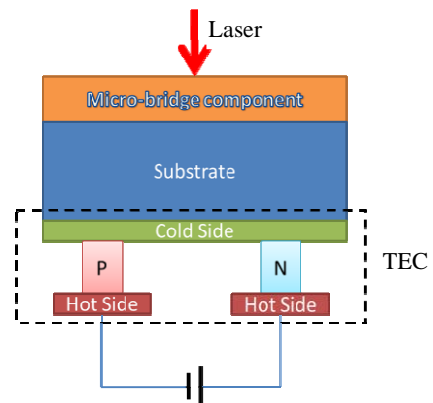


图 2 非制冷微测辐射热计纵向分布

Fig.2 Longitudinal distribution of uncooled microbolometers

红外探测器中的 TEC 置于直流电路中，受到控制电压的偏置作用，该电压为焦平面温度的感应电压与基准电压的差分放大所得。TEC 的工作原理为 Peltier 效应，即电流通过具有热电转换特性的导体时可实现制冷功能。鉴于优良的材料特性，国际上的 TEC 普遍由半导体制成<sup>[8]</sup>。如图 3 为典型的 TEC 结构<sup>[9]</sup>，其冷面与衬底紧密贴合，热面连接散热装置或直接通过空气对流等方式散热，冷、热两个面之间嵌入了一定数量的 PN 结。

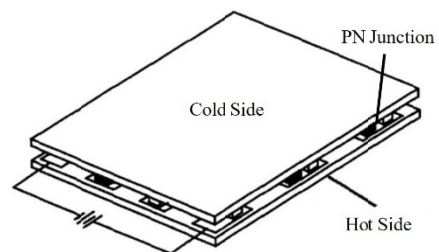


图 3 TEC 结构图

Fig.3 TEC structure diagram

#### 1.2 工作机理及辐照分析

##### 1.2.1 像元

在像素读出的过程中，与像元连接的 MOS 管起到了采集像元信号的关键作用。由于偏置电阻的存在，

使得在恒定大小的总偏置电压的作用下,施加在像元上的分压随着其电阻的变化而变化。该电压信号经MOS管线性放大,转化为电流信号,然后被放大器采集和使用。MOS管的栅源电压被定义为像元两端电压 $U_R$ ,设其开启电压 $U_t$ ,漏源电压 $U_{ds}$ ,跨导系数 $\beta$ ,随着 $U_R$ 的逐渐减小,MOS管的漏源电流可描述为:

$$I_{ds} = \begin{cases} \beta[U_R - U_t]U_{ds} - \frac{U_{ds}^2}{2}; & 0 \leq U_{ds} \leq U_R - U_t & \text{线性区} \\ \frac{\beta(U_R - U_t)^2}{2}; & 0 \leq U_R - U_t \leq U_{ds} & \text{饱和区} \\ 0; & U_R - U_t \leq 0 & \text{截止区} \end{cases} \quad (1)$$

该电流信号就是处理成像素值的原始数据,MOS管的工作状态对应该像元的工作状态。由于制造工艺的限制,各像元的光电性能有所差异,因而需要进行非均匀校正,使得所有像元对目标区域红外辐射的响应性能一致。

在红外辐射的作用下,像元温度升高带来的电阻 $R$ 变化可以描述为:

$$R = R_0 \exp[\alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 是电阻温度系数(temperature coefficient of resistance, TCR),且一般 $\alpha < 0$ 。其中, $R_0$ 为当像元温度 $T$ 处于基准温度 $T_0$ 时的电阻值。

### 1.2.2 阵列

在TEC中,单个PN结的制冷功率可由下式描述<sup>[8]</sup>:

$$W_0 = \Delta\varepsilon T_{Tcold} \cdot I_T \cdot (1/2) I_T^2 \cdot R_T - K_T \cdot (T_{Tcold} - T_{Thot}) \quad (3)$$

式中: $\Delta\varepsilon$ 为温差电动势; $T_{Tcold}$ 和 $T_{Thot}$ 分别表示冷、热两面的温度; $I_T$ 为工作电流; $R_T$ 为电阻; $K_T$ 为导体的热导率。因而具有 $N$ 个PN结的TEC制冷功率为:

$$W = NW_0 \quad (4)$$

表征热电材料制冷性能的优值系数为限定值,因此对给定的TEC和工作条件,表征其制冷能力的主要参数为最大电流和最大电压<sup>[10]</sup>。由此可知,当工作温度 $T_{Tcold}$ 不变时,在可承受的最大电压偏置作用下,TEC中通过最大电流,对应制冷功率达到最大。由式(3)、(4)可知:

$$W_{max} = N \cdot [\Delta\varepsilon T_{Tcold} \cdot I_{Tmax} - (1/2) I_{Tmax}^2 \cdot R_T - K_T \cdot (T_{Tcold} - T_{Thot})] \quad (5)$$

探测器工作正常情况下,电路中产生的焦耳热和高温像元传导的热量经衬底传导至TEC的冷面。在TEC达到最大制冷功率前,衬底温度始终保持恒定;而当辐照至部分像元的激光能量过大,造成温度过

高,TEC的最大制冷功率不足以将热量散去,衬底温度开始上升;随着辐照激光的功率继续增加,像元温度大幅度提高,直到光敏材料熔融,焦平面阵列局部发生不可逆转的硬破坏。

在非制冷微测辐射热计阵列上,以纵向单像元面积大小为基本单位来研究,对于受激光辐照像元正下方的衬底材料,忽略激光和像元热辐射的影响,其瞬态热方程为<sup>[11]</sup>:

$$G \cdot (T_R - T_S) - \frac{1}{p} \cdot W = \rho_s \cdot v_s \cdot c \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t} - k_s \cdot \nabla^2 T_S \quad (6)$$

式中: $G$ 、 $T_S$ 、 $\rho_s$ 、 $v_s$ 、 $c$ 和 $k_s$ 分别表示这部分材料的热导率、温度、质量密度、体积、热熔率和导热系数; $p$ 是焦平面阵列上像元的个数; $k_s \cdot \nabla^2 T_S$ 表示衬底热量的横向传导。

而对于焦平面阵列中光斑周围像元的衬底,有<sup>[11]</sup>:

$$k_s \cdot \nabla^2 T_S - \frac{1}{p} \cdot W = \rho_s \cdot v_s \cdot c \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t} \quad (7)$$

这些像元由于连接衬底温度的上升,热量经桥腿(图1)传导至桥面,形成热量“倒灌”,造成了像元的饱和损伤。

## 2 激光辐照实验

从工作原理可以初步推断,对于工作正常的非制冷微测辐射热计,当辐照的激光能量过大时,微测辐射热计焦平面阵列的局部像元饱和,像素值达到最大;随着激光能量的继续增大,被辐照像元的微桥结构内沉积了过多的热量,由于像元阵列横向传导等作用,会对周围的像元造成影响;当激光能量达到一定程度时,局部像元沉积的大量热能无法及时导出,会造成不可逆转的硬损伤。为进一步研究这一问题,设计了实验系统并进行了研究。

### 2.1 实验系统

在实际战场环境下,由于复杂传输条件的影响,实际作用于目标探测器的干扰激光一般可等效于连续激光受到某种调制的结果。因此,本实验主要包含两部分:连续激光辐照目标探测器的损伤阈值和斩波调制后的激光干扰效果。

实验的激光源采用CO<sub>2</sub>气体激光器,激光波长10.6 μm,输出功率0~30 W,功率不稳定性不大于10%,光束直径2.4 mm,光束发散角不大于0.5 mrad。衰减器由标定好的NDIR系列反射型衰减片组成,透过率从0.0004~0.5不等。受辐照的非制冷微测辐射热计为800×600多晶硅探测器,工作波段8~14 μm,单像元尺寸17 μm×17 μm,光学系统焦距35 mm, $F$ 数1.2,视场角21.2°×16.2°。

实验系统布局如图4所示。在连续激光损伤实验中撤去斩波器，待CO<sub>2</sub>气体起辉后，缓慢增大激光输出功率，直到探测器受到损伤为止。然后利用SR540斩波器调制连续激光，将两个相同的斩波片重叠，通过改变重叠率来控制斩波调制的占空比大小。为实时掌握斩波调制情况，在CO<sub>2</sub>激光器旁并排放置532nm激光器及对应的快速探测器，让斩波器同时调制两个波长的激光，以532nm激光调制后的波形图来描述10.6μm的情况(如图5)。分别改变斩波频率、占空比，对不同参数下的红外图像进行处理得到像素值。图6为实景图。

## 2.2 实验现象

### 2.2.1 连续激光

实施连续激光的辐照实验，时间每次持续1s。随着激光功率的不断增大，得到以下干扰现象：

①当辐照激光功率达到 $1.326 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 时，探测器热成像中心区域的灰度值达到最大(255)，

如图7，探测器出现局部像素值最大，撤去光源后该现象立即消失，即出现了点饱和现象，如图7；

②当辐照激光功率在 $1.326 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2 \sim 2.785 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 范围时，探测器热成像中受干扰的区域变大，如图8，且其面积随着激光功率的增大而增大，撤去光源后该现象立即消失，即出现了中度饱和现象，如图8；

③当辐照激光功率在 $2.785 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \sim 7.074 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 范围时，探测器热成像中受干扰的区域更大，如图9，且其面积随着激光功率的增大而增大，撤去光源后该现象持续存在一段时间后才消失，即出现了重度饱和现象，如图9；

④当辐照激光功率大于 $8.235 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 时，探测器热成像受到干扰区域大幅增加，如图10，撤去光源后大部分像元能够缓慢地恢复正常，但中心少量像元无法恢复，发生了永久损伤，即出现了点损伤现象，如图10。

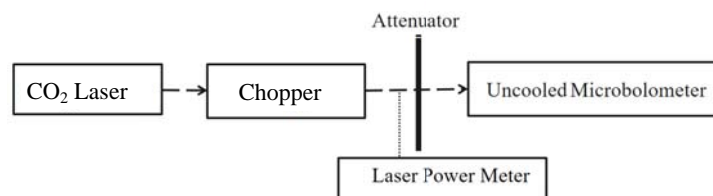


图4 实验系统布局

Fig.4 Experimental system layout

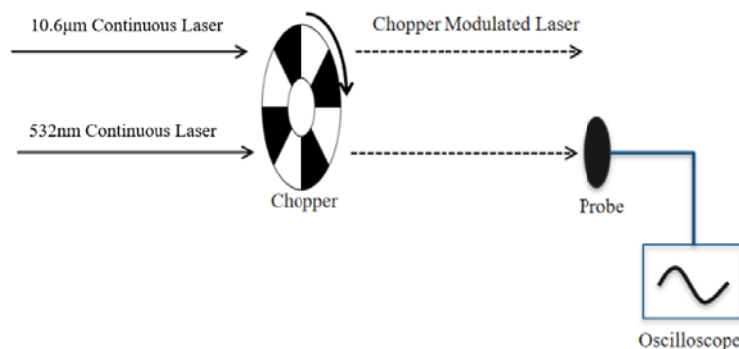


图5 斩波调制检测系统

Fig.5 Chopper modulation and detection system



图6 实验系统实景图

Fig.6 Actual appearance of the experimental platform

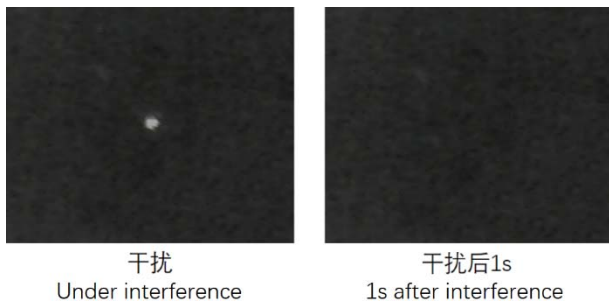


图7 点饱和现象的热成像  
Fig.7 Thermal imaging of point saturation

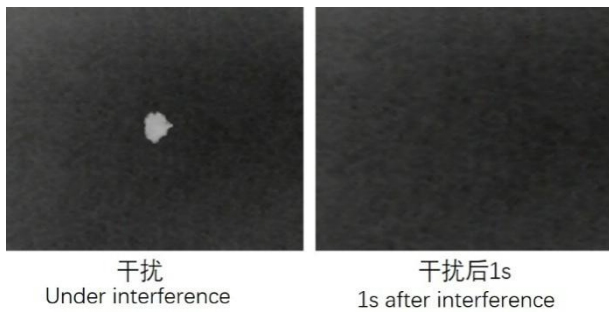


图8 中度干扰现象的热成像  
Fig.8 Thermal imaging of moderate saturation

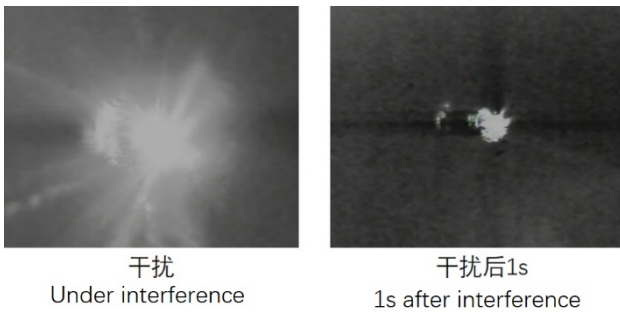


图9 重度饱和现象的热成像  
Fig.9 Thermal imaging of severe saturation

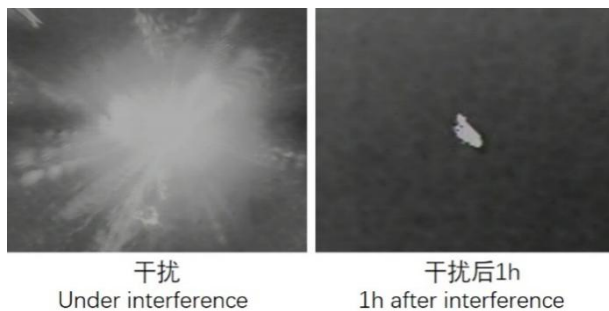


图10 点饱和现象的热成像  
Fig.10 Thermal imaging of point damage

在发生重度饱和和点损伤的现象时还注意到,被干扰区域横向及纵向的其他像素值均发生异常(变小),影响了正常的成像功能。

### 2.2.2 经斩波调制的连续激光

在斩波调制的激光辐照实验中,探测器热成像中心区域的光斑出现闪烁的现象(如图11)。将辐照时长设为每次5s。固定辐照激光功率为  $9.844 \times 10^{-5}$

$\text{W}/\text{cm}^2$ , 占空比为0.1,并将斩波频率依次设定为100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz、500 Hz,探测器热成像中心区域呈现的灰度值随着斩波频率的增加而减小;保持辐照激光功率  $9.844 \times 10^{-5} \text{ W}/\text{cm}^2$  不变,固定斩波频率为100 Hz,并将占空比依次设定约为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,发现探测器热成像中心区域的灰度值随着占空比的增大而增大。

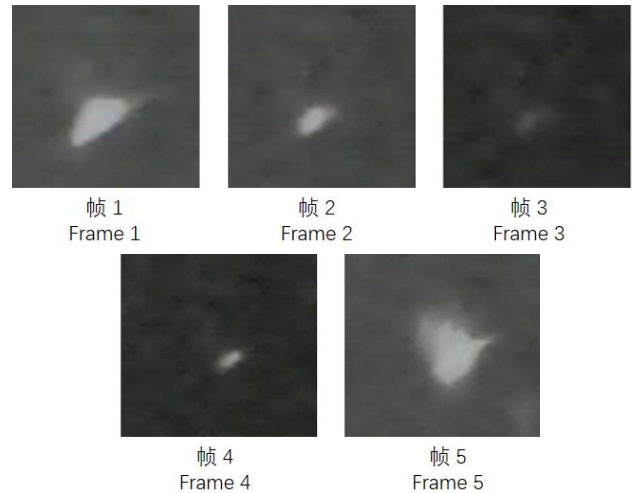


图11 斩波调制激光辐照导致的光斑闪烁现象  
(斩波调制频率100Hz,占空比0.5)

Fig.11 Spot flashing caused by chopping modulated laser irradiation

## 3 实验结果分析

### 3.1 连续激光损伤

根据非制冷微测辐射热计的工作原理,随着辐照激光功率的增加,对实验中发生的现象可以作如下解释:

现象①中,受辐照的像元温度不断升高,电阻减小,两端电压降低,MOS管从线性工作状态进入饱和和工作状态。在像元温度达到这个温度之前可以称为非制冷微测辐射热计工作的“线性工作区”。根据(1)式,像元点饱和时,  $U_R = U_t + U_{ds}$ ,在电路中满足  $U_R = \frac{R}{R + R_L} \cdot U$ ,代入(2)式并整理得到像元在点饱和时的温度  $T_1$ :

$$T_1 = T_0 + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{R_L}{R_0} \cdot \frac{U_R}{U - U_R}\right) = T_0 + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{R_L}{R_0} \cdot \frac{U_t + U_{ds}}{U - U_t - U_{ds}}\right) \quad (8)$$

现象②中,像元温度快速升高,MOS管输出电流信号不再继续增大,像素保持最大(通常为255);传导至衬底的热量增加,为了维持衬底恒温,TEC制冷功率提高并逐渐达到最大,周围像元由于热量“倒灌”也逐渐达到饱和状态。这个过程可以称为非制冷

微测辐射热计工作的“中度饱和区”。若初始状态温度为  $T_0$ ，当 TEC 制冷功率达到最大时，受辐照像元的温度达到中度饱和的最高值，设为  $T_2$ 。当系统的温度场达到稳态时，受辐照的单像元连接衬底的热平衡方程为：

$$G(T_2 - T_0) - \frac{W_{\max}}{p} + k_s \cdot \nabla^2 T_s = 0 \quad (9)$$

因此：

$$T_2 = T_0 + \frac{W_{\max} + p k_s \cdot \nabla^2 T_s}{pG} \quad (10)$$

对于周围衬底及像元，满足  $T_s = T_R \geq T_1$  时，达到饱和状态。

现象③中，像元温升剧烈，TEC 的最大制冷功率不足以散去材料内沉积的热量，像元及衬底温度持续升高。由于衬底横向的热传导效应，周围受到饱和和干扰的像元数量进一步增多，直到受辐照像元温度接近熔点。这个过程可以称为非制冷微测辐射热计工作的“重度饱和区”，设像元温度  $T_3$ ：

$$T_3 = T_{Rmelt} \quad (11)$$

式中： $T_{Rmelt}$  为光敏材料的熔点。

现象④中，像元温度达到光敏材料的熔点，吸收热量发生相变，由于热熔融作用局部区域像元发生不可逆转的硬损伤，周围受热达到点饱和温度的像元数量更多，这可以称为非制冷微测辐射热计工作的“点损伤区”。此时，像元的温度：

$$T_4 > T_{Rmelt} \quad (12)$$

### 3.2 斩波调制激光辐照效果

收集的各组斩波调制参数下的实验结果，对每次实验第 5 s 内的所有图片，取辐照区域光斑中心的像素求平均值，得到该实验中探测器稳态下像素平均值。表 1 为斩波调制频率变化时，探测器热成像光斑灰度闪烁均值。

表 1 激光调制频率变化时的闪烁光斑灰度均值

| Modulation frequency | Duty cycle | Gray mean |
|----------------------|------------|-----------|
| $f/\text{Hz}$        | $\delta$   | spot      |
| 100                  | 0.1        | 28.1      |
| 200                  | 0.1        | 26.0      |
| 300                  | 0.1        | 25.5      |
| 400                  | 0.1        | 25.2      |
| 500                  | 0.1        | 25.0      |

将灰度均值与调制频率作曲线拟合，得到图 12 和对应的关系式：

$$\text{Pixel} = 66.79f^{-0.181} \quad (13)$$

由此可以看出，激光干扰光斑灰度均值随斩波调制频率的增加呈指数降低的趋势。

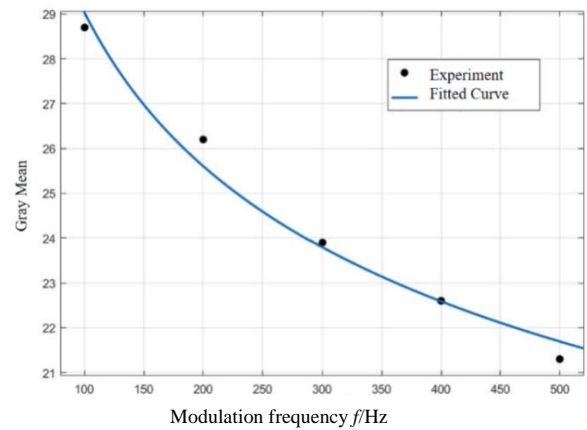


图 12 探测器灰度均值与激光调制频率的曲线拟合

Fig.12 Curve fitting of detector gray mean value and laser modulation frequency

表 2 为占空比变化时，探测器热成像光斑灰度闪烁均值。

表 2 激光调制占空比变化时的光斑灰度闪烁均值

Table 2 Gray mean values of scintillation spots under changing laser modulation duty ratio

| Modulation frequency | Duty cycle | Gray mean |
|----------------------|------------|-----------|
| $f/\text{Hz}$        | $\delta$   | spot      |
| 100                  | 0.1        | 28.3      |
| 100                  | 0.2        | 53.1      |
| 100                  | 0.3        | 72.7      |
| 100                  | 0.4        | 88.6      |
| 100                  | 0.5        | 102.9     |

对表 2 中的光斑灰度均值与占空比进行曲线拟合，得到图 13 和对应关系式：

$$\text{Pixel} = 168.4\delta^{0.7197} \quad (14)$$

由此可以看出，激光干扰光斑灰度均值随斩波调制占空比的增加呈指数增加的趋势。

据此可以推断，战场环境下当连续激光用于干扰对方红外探测器时，在等效大气传输影响的斩波调制作用下，调制频率低，占空比大时会使得目标像元阵列温度快速升高，并进入不同程度的干扰状态。

## 4 结论

本文进行了  $10.6 \mu\text{m}$  连续激光辐照非制冷多晶硅探测器实验，得到了像元阵列进入点饱和、中度饱和、重度饱和、点损伤状态的激光功率范围依次为  $0 \sim 1.326 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 、 $1.326 \times 10^{-4} \sim 2.785 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 、 $2.785 \times 10^{-3} \sim 7.074 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 、 $7.074 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \sim +\infty$ ，分析了不同程度损伤过程

中的热效应机理。从实验结果可以看出,对目标红外探测器进行压制干扰时,使其进入重度饱和状态即可使其在一定时间内丧失侦察能力;受到传输因素影响的连续激光辐照敌方探测器时,在传输等效调制频率低、占空比大的条件下能获得更好的干扰效果。这一方向的后续研究工作,可根据各类非制冷红外探测器的像元构造来研究红外激光对其致盲的方式,并结合实际战场条件探究相应战法。

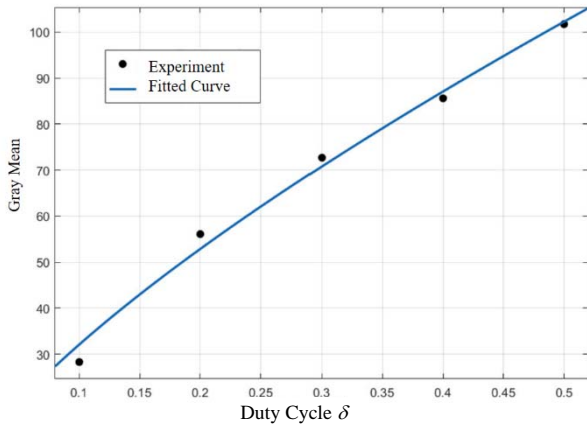


图13 探测器灰度均值与激光调制占空比的曲线拟合

Fig.13 Curve fitting of detector gray mean value and laser modulation duty ratio

从实验结果可以看出,非制冷微测辐射热计在强激光的辐照下极易发生损伤。在实际应用中,为降低红外像元阵列被破坏的可能,可以采用在光路中加入波门选通的方法来进行保护。

### 参考文献:

[1] Wood R A. Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal planes[J]. *Proc. of SPIE on Infrared Technology XIX*, 1993, **202**: 322-329.  
[2] Kruse P. Uncooled thermal imaging, arrays, systems, and applications[J].

*Proc. of SPIE*, 2001, **3238**: 203-211.  
[3] 孔令彬, 易新建, 王典洪, 等. 320×240 长波非制冷微测辐射热计红外热象仪的研制[J]. *光子学报*, 2002, **31**(5): 596-599.  
KONG L B, YI X J, WANG D H, et al. Development of 320×240 long-wave non-cooling microbolometer infrared thermal imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 596-599.  
[4] Kohin M, Butler N R. Performance limits of uncooled VO<sub>x</sub> microbolometer focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2004, **5406**: 447-453.  
[5] 杨风暴. 红外物理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
YANG F B. *Infrared Physics and Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.  
[6] Fieque B, Tissot J L, Trouilleau C, et al. Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, **14**(3): 187-191.  
[7] 孙恋君. 微测辐射热计阵列性能及信号处理电路研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
SUN L J. Research on Performance and Signal Processing Circuit of Microbolometer Array[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.  
[8] 陈振林, 孙中泉. 半导体制冷器原理与应用[J]. *微电子技术*, 1999(5): 63-65.  
CHEN Z L, SUN Z Q. Principle and application of semiconductor refrigerator[J]. *Microelectronic Technology*, 1999(5): 63-65.  
[9] 刘华军, 李来风. 半导体热电制冷材料的研究进展[J]. *低温工程*, 2004(1): 35-41.  
LIU H Y, LI L F. Research progress of semiconductor thermoelectric refrigeration materials[J]. *Low Temperature Engineering*, 2004(1): 35-41.  
[10] ZHANG Y, Ashe J, LUO Y, et al. Semiconductor lasers and applications [C]//*Proc. of SPIE*, 2002, **4913**:177-183.  
[11] 孙承纬, 陆启生, 范正修. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
SUN C W, LU Q S, FAN Z X, et al. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.