

文章编号 1004-924X(2015)01-0022-09

碲镉汞光导探测器在中红外激光测量中的热问题

张检民*, 冯国斌, 杨鹏翎, 张磊, 赵军

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要:为了准确测量中红外高能激光系统的远场功率密度时空分布等参数,分析了室温光导型碲镉汞(HgCdTe)探测器在环境温度变化和光热效应情况下存在的探测器光敏元温升等热问题,并分别给出了应对措施。从 HgCdTe 的电学参数经验公式和光导型探测器工作原理出发,分析了暗电阻和响应率与光敏元工作温度的相关性。建立了计入接触热阻和自然对流效应的光导型 HgCdTe 探测器热分析模型,并对模型进行了实验验证。分析了光敏元与环境温度间的热平衡时间特性,提出了连续激光测量中的环境温度校正模型。讨论了激光辐照下探测器的动态响应特性,给出了激光加热探测器光敏元导致的附加光热信号的修正方法,该方法在典型应用条件下可将测量系统的单通道测量不确定度降低 2% 以上。目前,所述方法均已成功应用于多套远场激光光斑定量测量系统。

关键词:激光参数测量;激光能量测量;中红外激光;HgCdTe 光导探测器;热信号修正

中图分类号:TN216;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0022

Thermal issues of photoconductive HgCdTe detector in mid-infrared laser parameter measurement

ZHANG Jian-min*, FENG Guo-bin, YANG Peng-ling, ZHANG Lei, ZHAO Jun

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangjianmin@nint.ac.cn

Abstract: To measure accurately the spatial and temporal distribution of laser intensity in a far-field for a mid-infrared high energy laser system, two thermal issues existing in laser parameter measurement for an uncooled photoconductive HgCdTe detector were discussed, including environmental temperature variation and the laser induced temperature rise of a sensor chip. Then, two solution schemes were presented respectively. On the basis of empirical formulas for electrical properties of n-type HgCdTe materials and device physics of the photoconductor, the temperature dependences on dark resistance and responsivity were analyzed. A thermal analysis model of the photoconductive HgCdTe detector was established and verified by experimental data. Thermal contact resistance and natural convection were considered in this model. After the time characteristics of thermal equilibrium between sensor chip and environment were investigated, an environmental temperature calibration model for continuous wave laser parameter measurement was presented. Finally, dynamic responses of the HgCdTe detector under fixed and variational laser irradiations were

收稿日期:2014-05-06;修订日期:2014-05-26.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM1103)

analyzed, and a correcting method for the effect of laser heating on sensor chip was presented. The results show that the measurement uncertainty of a single unit in the beam detector array is reduced by 2% or more under a typical implementing condition. The proposed methods have been successfully used in different mid-infrared high energy laser quantificational measurement systems.

Key words: laser parameter measurement; laser energy measurement; mid-infrared laser; HgCdTe photoconductor detector; thermal signal correction

1 引言

在吸收、散射、湍流、热晕及其他非线性过程的作用下,强激光在大气传输中将发生强度衰减,光斑扩散、破碎和漂移等现象,从而大大削弱了投射到目标处的激光能量^[1-2]。这种现象也表明,一定距离处激光光斑参数的测量可描述光束远场的聚焦特性,评价激光器的工作性能,研究大气对激光传输的影响。以多个探测单元组成的探测阵列,如光电探测阵列靶斑仪^[3-4],具有响应快、实时性好、结构轻便、易扩展以及可同时获得光斑时空分辨数据等优点,可用于该项研究中的激光能量测量,而将光电单元与热量探测单元结合组成复合阵列,则可进一步提高能量测量的不确定度指标^[5]。

中红外波段常见的室温光电探测器件有光导型 HgCdTe、PbSe、InSb 等,其中 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 三元合金材料的禁带宽度可随镉元素组分 x 连续变化,是中远红外($3\sim 30\ \mu\text{m}$)探测中最重要的半导体材料之一^[6]。考虑到光电器件的易损特性,诸多学者从辐照效应角度开展了 HgCdTe 探测器在工作波段内外激光作用下的破坏及干扰研究^[7-10],但涉及强激光测量的研究较少。

受半导体材料特性的制约,光导型 HgCdTe 器件的暗电阻和响应率两个关键性能参数均有较强的温度敏感性。虽然可定标两者随温度的变化规律,但难以准确获知光敏元的实际工作温度,因此该器件在强激光测量应用中面临两个基本的热问题:一是环境与光敏元之间导热较慢,不能用环境监测温度替代光敏元的工作温度,而外场测量系统总是工作于非恒温状态。由于阵列靶斑仪的探测单元数以百计,考虑体积、功耗、成本等因素,不宜在探测器内加装温度传感芯片,即使加装了传感芯片,该传感器测得的温度亦不能反映光敏

芯片温度^[11],故需要寻求其他途径来校正环境温度;二是探测器光敏元在较强激光辐照下会升温,使得输出信号中含有“温漂”成分,即光热信号不可忽略,由此增大了系统的测量不确定度。实际上,虽然光电法测量采取了一定的衰减措施来削弱入射到探测器光敏元上的激光强度,但因衰减倍率过大定标仍非常困难,因此通常取折中的衰减倍率,同时优化光敏器件的结构参数以扩大其线性响应范围和饱和阈值。综上所述,开展光电探测器在强激光测量中的热问题研究,消除或降低环境温度变化及激光加热效应对测量结果的影响,对于激光测量设备的研制及半导体器件的应用具有积极意义。

本文从 HgCdTe 材料参数和光导器件工作原理出发,分析了暗电阻与响应率的温度特性,建立了阵列靶斑仪单元探测器的传热模型,分析了光敏元与环境温度之间的传热特性和激光作用下探测器的动态响应特性,建立了一种连续激光测量中的环境温度校正模型,提出了光热效应修正方法,并成功应用于多套远场激光光斑定量测量系统。

2 HgCdTe 光导探测器原理及光电特性

2.1 工作原理

光导型探测器基本结构如图 1 所示,光敏元为规则形状,入射光束垂直电流方向。常采用恒流检测电路,输出电压信号正比于偏置电流和探测器电阻。

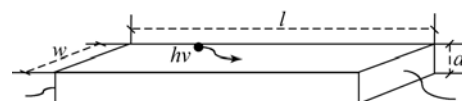


图 1 光导型探测器光敏元示意图

Fig. 1 Schematic of photoconductive detector

室温下忽略表面电导,计入扩展电极影响,探测器的暗电阻表示为:

$$R_D = \alpha R_{\text{bulk}} = \alpha \frac{1}{e_0 (n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)} \cdot \frac{l}{\omega d}, \quad (1)$$

式中: R_{bulk} 为体电阻, α 为电极系数; l, ω, d 分别为光敏元的长、宽、厚; n_0, p_0 分别为热平衡电子、空穴浓度, 施主浓度为 N_d 时 $p_0 = (-N_d + (N_d^2 + 4n_i^2)^{0.5})/2$, $n_0 = (N_d + (N_d^2 + 4n_i^2)^{0.5})/2$, e_0 为电子电荷量, n_i 为本征载流子浓度。HgCdTe 的本征载流子浓度受禁带宽度 E_g 和温度 T 等参数的影响, 其表达式为:

$$n_i = (1 + 3.25 k_b T / E_g) \times 9.56 \times 10^{14} \times E_g^{3/2} T^{3/2} \times [1 + 1.9 E_g^{3/4} \exp(E_g / 2 k_b T)]^{-1}, \quad (2)$$

其中: k_b 为玻尔兹曼常数, T 为开氏温标。当 $0.19 \leq x \leq 0.433$, $4.2 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$ 时, E_g 表示为^[6]:

$$E_g(x, T) = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + 0.35x^4 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T. \quad (3)$$

当 $T \geq 50 \text{ K}$, $0.20 \leq x \leq 0.6$ 时, 电子迁移率近似为^[12]:

$$\mu_n = 9 \times 10^8 (0.2/x)^{7.5} T^{-2(0.2/x)^{0.6}}. \quad (4)$$

空穴迁移率 $\mu_p = m_p^* \mu_n / m_e^*$ 。电子有效质量 $m_e^* \approx 0.07055 E_g m_0$, 其中 m_0 为自由电荷静止质量, E_g 以 eV 为单位。空穴的有效质量常取 $m_p^* = 0.55 m_0$ 。

n 型半导体中空穴浓度远低于电子浓度, 迁移率亦如此, 可不考虑空穴作用, 再忽略表面复合, 则恒流模式下探测器的电压响应率为:

$$R_{V,\lambda} = \frac{\alpha^2 \eta \lambda (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) I_B}{h c e_0 [(n u_n + p u_p) \omega d]^2} \approx \frac{\alpha^2 \eta \lambda \tau_n I_B}{h c e_0 \mu_n (n \omega d)^2}, \quad (5)$$

式中: I_B 表示偏置电流, η 为量子效率, λ 为辐照光波长, τ_n 为电子寿命, h 为普朗克常数, c 为光速, $n = n_0 + \Delta n$ 为电子浓度, Δn 表示光生电子。 Δn 受载流子输运及动力学方程制约, 但在小信号时, $\Delta n \ll n$, 可用 n_0 替代 n 。对于 n 型 HgCdTe 材料, 俄歇复合过程起主导作用, 小信号条件下复合寿命为^[13]:

$$\tau_A = 2 \frac{n_i^2}{n_0^2} \left[8.3 \times 10^{-13} \times E_g^{1/2} \sqrt{\frac{e_0 E_g}{k_b T}} \exp\left(\frac{e_0 E_g}{k_b T}\right) \right]. \quad (6)$$

由此可见, 光导型 HgCdTe 探测器的暗电阻、响应率主要受器件加工工艺和材料电学参数

的影响, 前者包括光敏元几何尺寸、表面处理状况等, 后者包括载流子浓度、寿命、迁移率等。若不考虑电极系数、几何尺寸变化, 且取特定波长下的量子效率为定值, 则前述两个工作参数是组分 x 和温度 T 的函数。组分一定的情况下, 温度的影响就显得尤为重要。

2.2 测量中关键的光电性能参数特性

典型室温下, 中波探测器组分值 x 为 0.27, λ_p 约为 $4.0 \mu\text{m}$ 。调整组分使 λ_p 向长波移动并远离待测波长, 可降低探测器的量子效率, 增大饱和阈值。中红外激光测量应用中取 x 为 0.195, 峰值波长约为 $6.0 \mu\text{m}$ 。

大量实验室数据统计分析显示暗电阻、响应率均随温度显著下降, 且都满足指数拟合公式:

$$Y = y_0 + A_1 \exp(-T/t_1). \quad (7)$$

取 $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$, $\omega = 0.32 \text{ mm}$, $d = 10 \mu\text{m}$, $x = 0.196$, $N_d = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $I_B = 4 \text{ mA}$, 计算可得暗电阻、响应率随温度变化的数据, 归一化修正后数值解与器件实测结果对比如图 2 所示。4 条曲线在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下时几乎重合, 表明在测量系统应用温度 ($-40 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$) 内拟合公式合理。

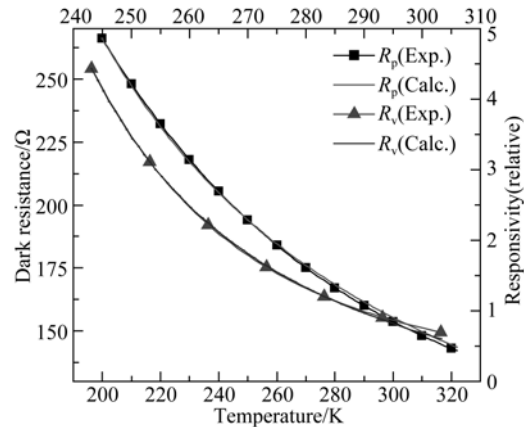


图 2 室温 n 型 HgCdTe 光导探测器性能参数的温度特性
Fig. 2 Temperature dependence on working parameters of uncooled n -type HgCdTe photoconductor

3 探测器热分析模型

3.1 测量中的热分析模型

光电靶斑仪设计中, 室温 HgCdTe 光导探测器压接固定于 LY-12 铝材质热沉板的沉孔中, 整体结构如图 3 所示。光敏芯片以白宝石为衬底, 用环氧胶粘接, 白宝石粘接固定于铜基座之上。

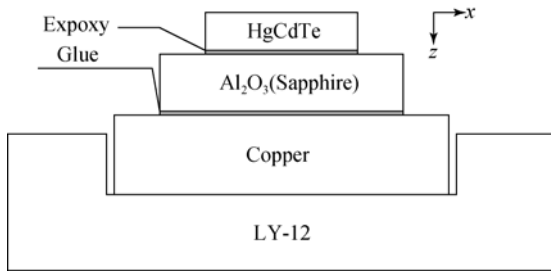


图 3 光导型 HgCdTe 探测器安装示意

Fig. 3 Schematic of photoconductive detector assembly

探测器及热沉的温度场由热传导方程描述:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(t, x, y, z), \quad (8)$$

其中: C_p, ρ, k 分别为材料的定压热容量、密度和热导率, ∇ 是空间梯度算子, Q 是体热源。中红外激光辐照时,因吸收深度很小,体热源项改用边界条件中的面热源表示:

$$k \nabla T|_{\text{HgCdTeUpside}} = q_0 = (1 - R) I_0(t, x, y), \quad (9)$$

其中: I_0 为辐照激光的功率密度, R 为材料反射率。

铜基座与铝热沉之间为非理想热联结,存在接触热阻,上下界面之间的控制方程为:

$$k \nabla T|_{\text{Al-Cu-Interfacial}} = -k_s [(T_u - T_d)/d_s], \quad (10)$$

其中: k_s 为材料热导率,与接触压力相关,此处取接触面材料热导率的均值; d_s 为热阻层的等效厚度,根据加工工艺取为 $100 \mu\text{m}$ 。

初始条件为 $T|_{t=0} = T_0$,其他边界条件包括:

$$k \nabla T|_{\text{HeatSinkUpside}} = h \cdot (T_{\text{ext}} - T), k \nabla T|_{\text{Others}} = 0. \quad (11)$$

式(11)左侧的等式为表面的对流散热边界,其中 T_{ext} 取为初始温度 T_0 ;右侧等式表示其他界面绝热。探测器的几何尺寸及材料参数见表 1, HgCdTe 表面的激光反射率取 0.3。

表 1 探测器各层属性及材料参数

Tab. 1 Parameters of detector materials

Material	Density $/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	Heat capacity $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Heat conductivity $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Size /mm	Thickness / μm
HgCdTe	7 600	150	20	1×1	10
Glue	1 250	1 530	0.2	1×1	3
Al ₂ O ₃	3 980	753	34	Φ	500
Glue	1 250	1 530	0.2	Φ	5
Copper	8 890	385	386	Φ	2 500
LY-12	2 775	865	124	Φ	3 000

3.2 热分析模型的实验验证

选取 D97# 探测器进行激光辐照实验。所用中红外固体激光器的功率稳定度优于 0.3%,出口平均功率为 150 mW,无衰减时工作面处的平均功率密度为 6.1 W/cm^2 。该探测器的暗电阻拟合公式为 $R_D = 150.35 + 114.39 \exp(-T/104.50)$;归一化响应率 $R_V = 0.079 + 2.004 \exp(-T/27.361)$,其中归一化温度 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 处的响应率为 2.18 V/W 。电路放大倍率为 67.7。

以 0.6 W/cm^2 激光辐照探测器 9.84 s,芯片的初始温度约为 $34 \text{ }^\circ\text{C}$,获得动态响应数据。以三维传热模型进行热沉表面对流换热系数的参数扫描计算,将光敏元温升曲线与暗电阻及响应率温度特性的实测数据结合算得动态响应曲线。当 h 为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$,数值解和实验结果对比如图 4 中坐标曲线 V_1 所示,两者在温升阶段和辐照停止时刻的拐点吻合较好。降温段存在偏差,原因包括部分参数取值不精确、大部分热物性参数取定值,未考虑其温度变化特性。

调整辐照激光功率密度为 1.3 W/cm^2 ,辐照时间为 9.74 s,芯片初始温度约为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,获得新的动态响应数据。以相同参数计算此刻动态响应曲线,对比如图 4 中坐标曲线 V_2 所示。可见不同的初始温度和辐照功率情况下计算结果和实验曲线依然吻合良好,从而验证了计算模型与参数的合理性。

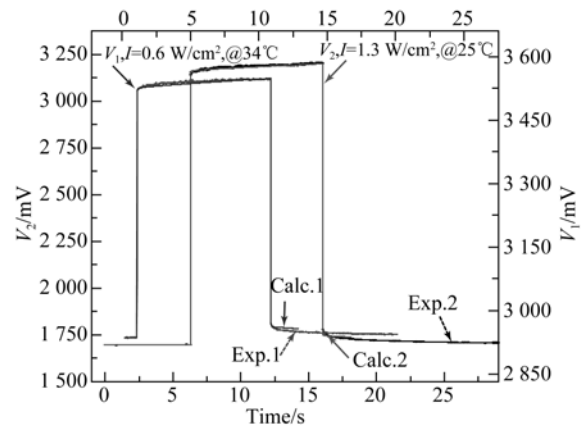


图 4 激光作用下 D97# 探测单元的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of D97# detector under laser irradiation

4 测量中的环境温度校正

HgCdTe 光导探测器的光敏元与基座间经过

多次胶合,基座与热沉间为非理想热接触,传热较慢。使用经过实验验证的热分析模型算得热沉温度改变时的光敏元温度历程及其时间微分曲线,如图 5 所示。由图可见外界到芯片间的平衡传热时间约为 4 s。预热一段时间后,阵列靶斑仪的内部温度仅发生缓变。实测数据显示,8 路均布于 HgCdTe 探测器固定板上的温度传感器 15 s 内在不同通道的监测值的标准差为 0.04~0.07 °C,不同通道间的温度值偏差约为 1.5 °C。

前文理论分析和实验数据显示:在光电靶斑仪的工作温度范围内 HgCdTe 探测器的暗电阻随温度单调变化,无外界光照时可等效为一个热敏电阻,因此,辅以合适的电路设计及数据处理可测得无光照时光敏元的工作温度,进而校正其响应率。校正原理如图 6 所示,无光照时的直流基线输出用于计算工作温度,光照条件下的输出信号减去基线得到有效信号,基于事先定标的响应率-温度曲线和芯片工作温度进行功率密度转换,得到激光强度的测量值。

检测电路采用直流惠氏桥结构,偏置电阻组合 $R_L = R_{11} + R_{12}$ 等于在设定工作温度点下的暗电阻。无光照时直流输出值为:

$$V_D = I_B(R_L - R_D(T)). \quad (12)$$

式(7)和式(12)结合可精确求得光敏元的工作温度 T 。

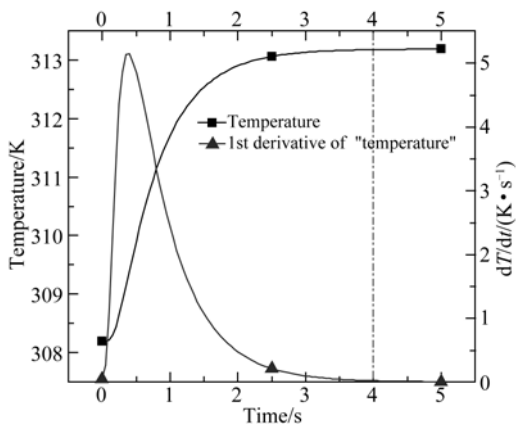


图 5 外界温度变化时 HgCdTe 光敏元热平衡时间的计算分析

Fig. 5 Analysis of thermal balance time of HgCdTe chip as copper substrate temperature changes

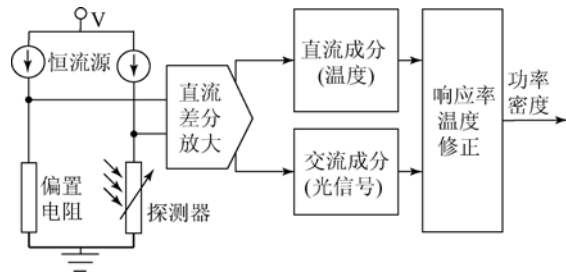


图 6 响应率工作温度的修正模型

Fig. 6 Calibration model of responsivity in operating temperature

5 光热效应信号特征及其修正

5.1 恒定强度激光辐照下的信号特性

测量中探测器光敏元受较强激光辐照时发生明显温升,暗电阻和响应率均对温度敏感,恒定辐照下探测器输出亦随时间变化。实验中用功率密度 $I_0 = 1.3 \text{ W/cm}^2$ 的中红外激光对探测器进行不同时长的照射,减去信号本底基线后得到的动态响应曲线如图 7 所示。由图可见辐照中信号持续上升,不同辐照时长下动态响应曲线重合良好,与物理分析和数值计算一致,且前文已验证了热模型,故后续分析基于计算结果展开。

恒定功率密度 I_0 激光辐照下,不考虑光敏元温升的理想信号、考虑光热效应的实际信号及两者比值的计算结果如图 8 所示,全过程温升速率如图 9 所示。可见,在暗电阻及响应率变化的共同作用下,前 1 s 内输出信号呈非线性变化,之后近似线性上升。辐照停止后,基线因温升漂移而形成热残留信号。辐照过程中,温升所致信号增幅介于 3%~6%,其中线性段为 4%~6%,残留信号幅值约为 4%。

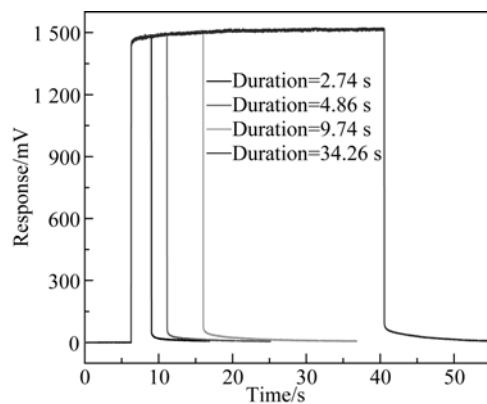


图 7 不同激光辐照时长下 D97 # 探测器的实测输出信号

Fig. 7 Experimental dynamic response of D97 # detector under fixed laser irradiation

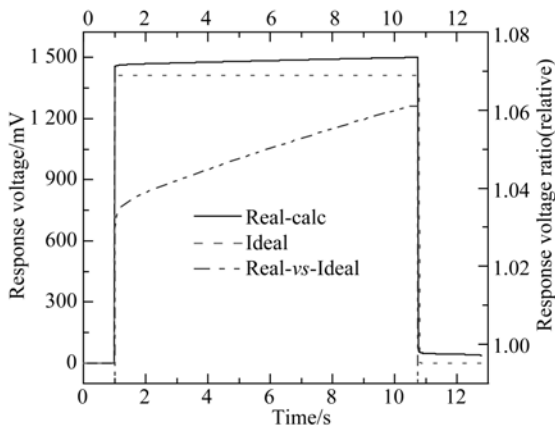


图 8 激光辐照下理想与实际探测器输出信号的对比
Fig. 8 Real and ideal dynamic responses of HgCdTe photoconductive detector under laser irradiation

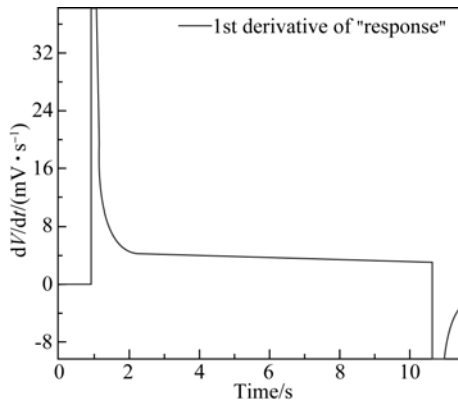


图 9 激光辐照下探测器实际输出信号的变化速率
Fig. 9 First derivative of dynamic response of HgCdTe photoconductive detector under laser irradiation

5.2 变强度激光辐照下的信号特性

调整入射激光幅值,加入正态分布($\sigma=5\%$)的随机扰动,取相同辐照时长算得理想情况下有效信号平均值及其与恒定信号的比值,数据如表 2 所示。由表可见,不同激光强度下,入射激光功率密度波动对输出信号的均值无明显影响。

待随机扰动的不同强度激光辐照停止 0.2 s 后,热残留信号随入射激光强度的变化关系如图 10 所示。两者近似线性,原因在于:光敏元温升幅度与辐照过程所累积的能量成正比,暗电阻在温度小幅波动时近似线性变化,最终使得热残留信号与激光平均强度成正比。同理,响应率在温度小幅波动时亦近似线性变化,故激光辐照过程中光热效应所导致的输出变化与已接收的激光能量呈线性关系。

表 2 不同激光强度作用下的探测器信号

Tab. 2 Response of detector under different laser irradiations

Laser intensity /relative	Irradiation mode	Average ideal response/mV	Rand/const response ratio
1.0×	Const	1 414.0	/
0.2×	Rand	283.6	0.201
0.5×	Rand	708.9	0.501
0.7×	Rand	992.5	0.702
1.0×	Rand	1 417.8	1.003
1.2×	Rand	1 701.4	1.203

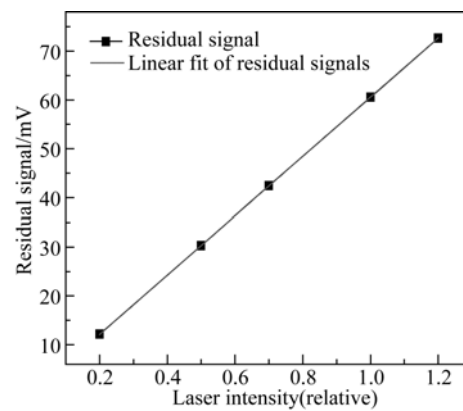


图 10 不同功率激光辐照后热残留信号与强度对比关系
Fig. 10 Thermal residual signal dependence on laser intensity under different laser irradiations

实际信号与理想信号的比值为:

$$Ratio = \frac{R_V(T)}{R_V(T_0)} + \frac{I_B(R_D(T_0) - R_D(T))}{A \cdot I \cdot R_V(T_0)}, \quad (13)$$

其中: $T = T_0 + \Delta T$, T_0 为初始温度, ΔT 为辐照所致温升, A 为光敏元面积, I 为入射激光的功率密度。结合图 2 可知,发生温升时式(3)第一项的比值小于 1,第二项的比值大于 1,且变化幅度均与已接收的激光能量成正比,最终结果与两者作用的相对强弱有关。表 2 参数计算的比值曲线如图 11 所示,曲线自上而下分别对应 $0.2 I_0 \sim 1.2 I_0$ 。该图表明,激光辐照中 D97 # 响应率的改变程度弱于暗电阻。

采样频率为 50 Hz 的光导型 HgCdTe 探测器阵列测得大光斑 5.2 s 长曝光的结果及激光停止后的第一帧热残留斑如图 12 所示。其中某通道所经受辐照激光的相对强度时间历程如图 13 所示。可见在待测激光变化较为剧烈的情况下,

热残留斑与长曝光光斑仍然相似,由此表明在实际测量中依然可以使用热残留信号与激光平均强度成正比的假设。

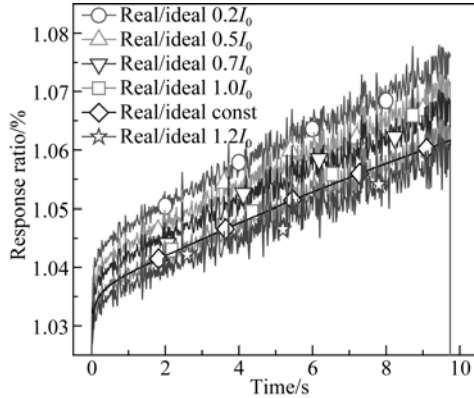
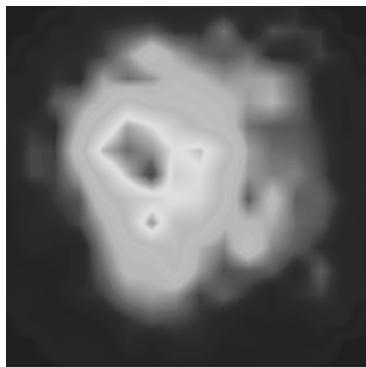


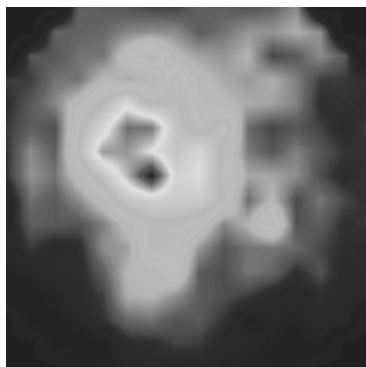
图 11 不同幅值激光辐照下探测器输出信号与理想信号的比值

Fig. 11 Real/ideal dynamic response ratio of HgCdTe photoconductive detector under different laser irradiations



(a) 激光光斑

(a) Laser spot



(b) 热残留斑

(b) Thermal residual signal

图 12 HgCdTe 阵列靶斑仪测得长曝光光斑及热残留斑

Fig. 12 Long time exposure laser spot and thermal residual signal of HgCdTe detector array

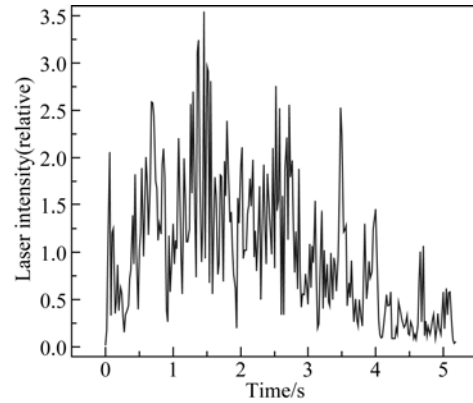


图 13 阵列靶斑仪某通道的辐照激光相对强度

Fig. 13 Relative laser intensity on one channel of detector array

5.3 光热效应修正方法及其应用

已知激光辐照停止后的热残留信号可推算该时刻探测器光敏元的实际温度。热残留信号和光热效应信号均近似正比于此入射到该探测器上的累积能量。若近似认为激光辐照终止时刻的温度及光热效应所导致的基线漂移与激光辐照停止后瞬间相同,则可根据下述方法初步修正光热效应信号带来的影响。

实际系统在时间域进行离散采样。若辐照持续过程中的采样点序号为 $1 \sim N$, 辐照结束后第一个采样点的序号为 $N+1$ 。辐照中第 n 个采样时刻探测器的有效信号输出为:

$$V(n) = R_V(T_n)AI_n + k_2 \sum_{i=0}^n AI_i, \quad (14)$$

式中: T_n , I_n 分别为该时刻的光敏元温度和入射激光的功率密度, k_2 为光热效应信号输出与激光平均功率密度间的比例系数, A 为光敏元面积。

激光辐照终止时刻的输出信号为:

$$V(N) = R_V(T_N)AI_N + V_{\text{res}, N}, \quad (15)$$

式中: $V_{\text{res}, N} = V_{\text{res}}$, $V(N)$ 分别是采样序号为 $N+1$ 和 N 时的实测数据。根据响应率和暗电阻标定数据可得到 $T_N = T_{N+1}$ 和 $R_V(T_N)$ 的确定值, 如此式(15)只剩余一个未知变量 I_N 。

强激光测量中, 热残留信号和光热效应信号均远小于理想光电信号, 可根据激光作用期间的历史信号和加权值将热残留信号分配到不同采样时刻, 故近似取第 n 次采样时刻的热残留信号为:

$$V_{\text{res}, n} = V_{\text{res}} \sum_{i=1}^n V(i) / \sum_{i=1}^N V(i). \quad (16)$$

结合式(14)与式(16)即可逐步求取不同时刻的激光功率密度值 I_n 。

对 D97 # 探测器在 1.3 W/cm^2 恒定激光辐照下的输出信号进行光热效应修正处理,进一步反演求得的功率密度曲线如图 14 所示,其中包含了实验数据和数值分析结果。由图可见,修正曲线趋近水平,更接近实际情况。该条件下,光热效应修正算法将单通道的测量不确定度降低了 2%。若激光功率密度更高或作用时间更长,光热效应修正算法将单通道的测量不确定度降低了 2%。若激光功率密度更高或作用时间更长,光热效应修正算法将单通道的测量不确定度降低了 2%。

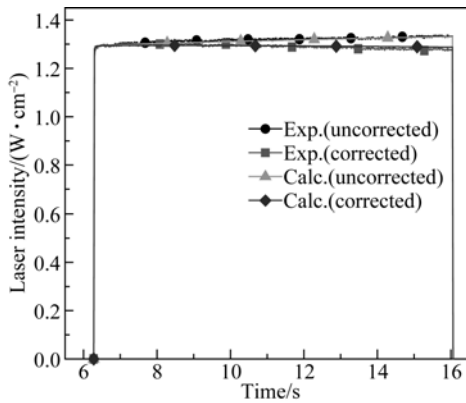
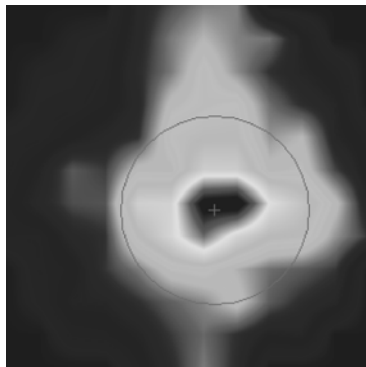


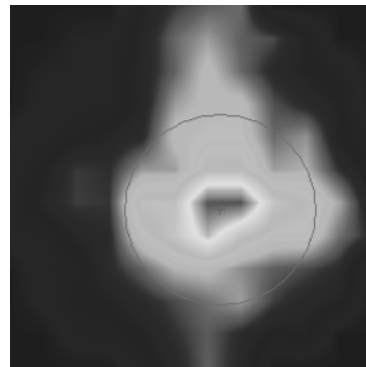
图 14 恒定激光辐照下的光热信号修正结果比较

Fig. 14 Comparison of thermal correcting results under constant laser irradiation

在多套测量系统^[4-5]的数据处理中,应用该修正方法取得了较好的效果。以激光传输试验中的典型实测数据为例,光热效应修正前后的积分光斑对比如图 15 所示(使用相同配色色标),单帧功率随时间的变化曲线如图 16 所示,可见热效应导致的测试结果明显偏大。进一步计算强激光的大气传输效率,修正前后的透过率分别为 96.4% 和 90.2%,该方法在本次应用中的修正效果优于 6%。



(a) 未经修正的结果
(a) Uncorrected spot



(b) 修正后的结果
(b) Corrected result

图 15 修正前后激光光斑对比

Fig. 15 Comparison of laser spots before and after corrections

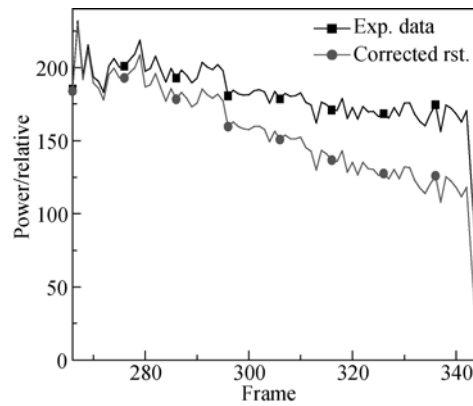


图 16 修正前后单帧功率随时间(采样帧)变化曲线

Fig. 16 Profiles of spot power versus time (or sampling frame) before and after corrections

6 结 论

本文在 HgCdTe 材料电学参数经验公式的基础上,根据半导体材料特性和器件工作原理给出了中红外强激光参数测量中光导型探测器的暗电阻、响应率两个关键光电性能参数随温度的变化规律。建立了阵列靶斑仪单元探测器的传热模型,分析了光敏元与环境温度之间的热平衡时间特性,并在此基础上提出了连续激光测量中的环境温度校正模型。较系统地分析了激光作用过程中光敏元的温升规律和动态响应信号特征,提出了一种由激光光热效应所导致的附加信号的修正方法,在典型应用条件下将单通道的测量不确定度降低了 2% 以上。目前,该方法已成功应用于多套远场激光光斑定量测量系统的数据处理中,实际修正效果优于 6%。

参考文献:

- [1] 饶瑞中. 激光大气传输湍流与热晕综合效应 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2):130-134.
RAO R ZH. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2):130-134. (in Chinese)
- [2] 张鹏飞, 范承玉, 乔春红, 等. 聚焦光束热晕效应相位补偿定标规律研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(2):213002.
ZHANG P F, FAN CH Y, QIAO CH H, *et al.*. Analysis of scaling laws for phase compensation of focused beam under thermal blooming conditions [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2):213002. (in Chinese)
- [3] HIGGS C, GREY P C, MOONEY J G, *et al.*. Dynamic target board for ABL-ACT performance characterization: airborne laser advanced technology II [J]. SPIE, 1999, 3706:216-226.
- [4] 杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪 [J]. 中国激光, 2010, 37(2):521-525.
YANG P L, FENG G B, WANG ZH B, *et al.*. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2):521-525. (in Chinese)
- [5] 杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 中红外激光光斑探测阵列 [J]. 中国激光, 2011, 38(7):702008.
YANG P L, FENG G B, WANG ZH B, *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7):702008. (in Chinese)
- [6] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
CHU J H. *Narrow Bandgap Semiconductor Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [7] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, KRUEER M, *et al.*. Thermal modeling of laser damage in HgCdTe photoconductive and PbSnTe photovoltaic detectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, 46(10):4519-4525.
- [8] 许晓军, 曾交龙, 陆启生, 等. 1.06 μm 激光对 PC 型 HgCdTe 探测器的破坏阈值研究 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4):552-556.
XU X J, ZHENG J L, LU Q SH, *et al.*. Research of damage thresholds of PC type HgCdTe detector under CW YAG Laser [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1998, 10(4):552-556. (in Chinese)
- [9] 王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO₂ 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 CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):798-804. (in Chinese)
- [10] 汤伟, 吉桐柏, 郭劲, 等. 高重频 CO₂ 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 CO₂ laser [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):736-742. (in Chinese)
- [11] 王飞, 程湘爱. HgCdTe 探测器 Pt 电阻测温分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 4(36):461-466.
WANG F, CHENG X A. Analysis of temperature measurement by Pt resistance in HgCdTe detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 4(36):461-466. (in Chinese)
- [12] ROSBECK J P, STARR R E, PRICE S L, *et al.*. Background and temperature dependent current-voltage characteristics of HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(9):6430-6440.
- [13] KINCH M A. Fundamental physics of infrared detector materials [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, 29(6):809-817.

作者简介:



张检民(1982—),男,湖南祁阳人,博士研究生,副研究员,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光辐照效应及强激光参数测试方面的研究。E-mail: zhangjianmin@nint.ac.cn

导师简介:



赵 军(1955—),男,山东济南人,博士研究生,研究员,博士生导师,2000年于北京航空航天大学获得硕士学位,2004年于国防科技大学获得博士学位,主要从事激光及应用方面的研究。E-mail: zhao2k3@sina.com