

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105882

多晶硅红外探测器在工业加热炉上的应用研究*

刘纯红¹ 熊丹枫¹ 余龙宝¹ 吴海滨²

(1.合肥师范学院 物理与材料工程学院 合肥 230601; 2.安徽省光电感测工程技术研究中心 合肥 230601)

摘要: 工业加热炉中,受高温环境的影响一般探测器无法测量工件的真实温度。针对工业加热炉温度检测问题,设计了多晶硅红外探测器实时测温系统。通过黑体炉对探测器的输出与环境温度的关系、以及光电转换性能进行测试;结果为工作环境温度超过 30 °C 时输出急剧减小,且随着目标温度升高,动态范围减小。设计在探测器前端增加衰减片和一种具有夹层结构的防护罩,结果表明该系统有效拓展了多晶硅红外探测器的动态范围,保障探测器的环境温度在 30 °C 范围内,测量精度达到 0.85 °C,满足工业要求,解决了多晶硅红外探测器在工业加热炉上的应用。

关键词: 工业加热炉;多晶硅红外探测器;动态范围;衰减片

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3050

Application of polysilicon infrared detector in industrial heating furnace

Liu Chunhong¹ Xiong Danfeng¹ Yu Longbao¹ Wu Haibin²

(1.School of Physics and Materials Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China;

2.The Research Center of Photoelectric Sensing Engineering Technology of Anhui Province, Hefei 230601, China)

Abstract: In the industrial heating furnace, due to the influence of high temperature environment, the general detector cannot measure the real temperature of the workpiece. Aiming at the temperature detection of industrial heating furnace, a real-time temperature measurement system of polysilicon infrared detector is designed. The relationship between the detector output and the ambient temperature, as well as the photoelectric conversion performance were tested by blackbody furnace, the results show that the output decreases sharply when the working environment temperature exceeds 30 °C, with the increase of target temperature, the dynamic range decreases. The design adds an attenuator in front of the detector and a protective cover with sandwich structure, the results show that the system effectively expands the dynamic range of the polysilicon infrared detector and ensures that the ambient temperature of the detector is within 30 °C, the measurement accuracy reaches 0.85 °C, which meets the industrial requirements, and solves the application of polysilicon infrared detector in industrial heating furnace.

Keywords: the industrial heating furnace; the polysilicon infrared detector; dynamic range; attenuator

0 引言

在冶金、化工等工业生产中,部分加热炉炉膛温度在 500 °C~600 °C 左右,而被加热件的温度在 300 °C 左右;这种情况下,由于被加热工件自身温度远低于加热炉内部环境的温度,受火焰燃烧辐射的影响,工件自身的热辐射信息通常被淹没在高温环境的背景辐射中,以及近红外增强型 CCD 自身响应光谱(一般最长响应波长 1.1 μm)的限制,无法对目标进行辐射量的有效获取,从而给工件的辐射测温带来误差^[1-2]。目前,加热炉内部工件温度进行测量的方法采用热电偶或者非接触式的激光测温仪,但这种方法只能

测量某个很小区域的温度,不能对整个工件的温度进行实时检测。

很多研究学者通过辐射测温技术来解决这个难题,也对非制冷焦平面热像仪的特性做了大量的研究^[3-9]。但目前的应用仅限于低温和人体温度测量(被测目标温度在 80 °C 左右)且热像仪工作环境在常温的情况^[10]。对于在环境恶劣尤其如工业加热炉附近温度过高的场合,暂未得到广泛应用。本文通过黑体炉对多晶硅红外探测器的环境工作温度特性、光电特性进行测试,掌握多晶硅红外探测器受工作环境温度的影响特性,设计一种利用气源冷却方式的夹层结构,将红外热像仪应用到工业加热炉^[11],实现多晶

收稿日期:2021-03-03

* 基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2020A0125)资助

• 54 •

硅红外探测器对加热炉内部低温目标温度的实时连续监测的应用。

1 多晶硅红外探测器的测温原理

多晶硅红外探测器是基于热释电效应工作的器件,由于探测器接受光照导致热电极表面温度变化,表面温度的变化引起表面电荷的变化而产生电量的过程,电量的大小间接表征了光照强度的变化。

若被测炉内工件表面的温度场分布为 $T(r, \theta)$, 由照度与距离平方反比定律, 照度与相对孔径平方成正比定律等关系可得其辐射光通过成像系统在探测器光敏面上的光谱辐射照度为:

$$E(T(r', \theta'), \lambda) = \frac{\varepsilon(T(r, \theta), \lambda) \cdot M(T, \lambda)}{F^2 l^2} \cdot \xi \cdot H \cdot \tau_\lambda \quad (1)$$

式中: (r, θ) 为被测炉内工件表面各点的位置坐标; (r', θ') 为 (r, θ) 在光敏面上图像对应点的坐标; $\varepsilon(T(r, \theta))$ 为炉内工件的比辐射率; $M(T, \lambda)$ 为光谱辐射出射度; F 为透镜的光圈系数; τ_λ 为透镜的光谱透射率; l 为成像距离; ξ 为透镜的杂光系数; H 为渐晕系数。

光谱辐照度 $E(T(r', \theta'), \lambda)$ 通过热释电探测器后转换成灰度图像:

$$N(T(r, \theta), \lambda) = dA\beta \frac{\varepsilon(T(r, \theta), \lambda) \cdot M(T, \lambda)}{F^2 l^2} \cdot \xi \cdot H \cdot \tau_\lambda \cdot \eta_\lambda \quad (2)$$

式中: dA 为像元面积; β 为热电系数; η_λ 为光谱响应率。

热力学温度为 T 的一般物体, 其辐射及分布由 Planck 辐射定律描述:

$$M(T, \lambda) = \varepsilon(\lambda) C_1 / \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

式中: $C_1 = 3.741832 \times 10^{-12} \text{ Wcm}^2$ 为第1辐射常数; $C_2 = 1.438786 \times 10^4 \mu\text{mK}$ 为第2辐射常数。当 $C_2/\lambda T \gg 1$ 时, 普朗克公式可由维恩公式代替, 可简化为:

$$M(T, \lambda) = \varepsilon(\lambda) C_1 / \lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (4)$$

从式(4)可得出在一定的波长范围内的能量为:

$$M(T, \lambda) = \varepsilon(\lambda) C_1 \int \frac{d\lambda}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} = \varepsilon(\lambda) C_1 T \cdot \frac{e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} (6T^3 \lambda^3 + 6C_2 T^2 \lambda^2 + 3C_2^2 T \lambda + C_2^3)}{C_2^4 \lambda^3} \quad (5)$$

考虑到多晶硅红外探测器的响应波长在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$, 只要将 $\lambda_1 = 8 \mu\text{m}$ 与 $\lambda_2 = 14 \mu\text{m}$ 代入上式就可以得出一定波段的物体辐射量。将式(5)代入式(2)即可得出被测目标的温度 T 与探测器输出灰度值 $N(T(r, \theta), \lambda)$ 之间的对应关系。

2 多晶硅红外探测器的特性测试

2.1 环境温度特性测试

由于多晶硅红外探测器随着环境温度的变化将会产生严重的温度漂移现象^[12-14], 影响红外探测器的响应特性, 从而导致输出信号降低。所以在应用多晶硅红外探测器前必须对其工作的环境温度范围进行测试, 正常使用时保证其工作环境的温度在其响应的线性区域。针对该因素, 将黑体炉的温度稳定在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 对多晶硅红外探测器从 $19 \text{ }^\circ\text{C} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境工作温度下输出灰度值(输出灰度值为8位)进行测试, 测试数据如表1所示。

表1 多晶硅红外探测器在不同环境工作温度下输出的灰度值

热源温度恒定在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$											
环境温度/ $^\circ\text{C}$	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
输出灰度值	65	65	63	65	63	65	65	66	68	66	66
环境温度/ $^\circ\text{C}$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
输出灰度值	66	65	61	58	51	46	41	38	28	22	19

从表1的测试数据可得出该多晶硅红外探测器的输出与工作环境温度的变化关系, 如图1所示。很显然, 该探测器的工作环境温度超过 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 以后, 在恒定的热辐射下, 其输出成显著的下陷趋势。所以要使该探测器工作在良好的线性区域, 必须保证其工作的环境温度在常温环境下。

2.2 探测器的光电特性测试

多晶硅红外探测器作为一种温度测量的光电传感器, 由于光电探测器均为非线性探测器, 即在热辐射能量较低时受噪声的影响, 信噪比小, 当热辐射能量过大时呈现饱和现象。作为测量仪器希望其具有一定的测量范围, 且在该范围内探测器的工作尽量成线性关系, 所以必须对其光

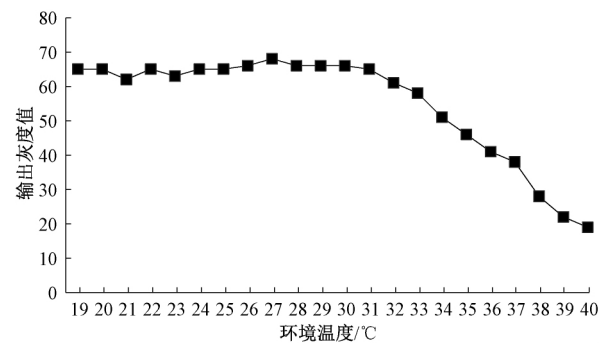


图1 红外探测器的输出与工作环境温度的关系

电特性进行测试。利用标准黑体炉作为稳恒热辐射源,当前测试环境温度为 22 ℃,热辐射源温度分别从 100 ℃~

290 ℃、250 ℃~400 ℃、370 ℃~500 ℃,通过设置探测器的
工作模式进行分段采集,测试数据如表 2~4 所示。

表 2 100 ℃~290 ℃ 红外探测器的光电特性测试数据

热源温度在 100 ℃~290 ℃										
热源温度/℃	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
输出灰度值	34	49	58	68	85	96	107	129	139	149
热源温度/℃	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
输出灰度值	165	174	185	198	208	216	228	238	247	255

表 3 250 ℃~400 ℃ 红外探测器的光电特性测试数据

热源温度在 250 ℃~400 ℃									
热源温度/℃	250	260	270	280	290	300	310	320	
输出灰度值	20	32	45	65	80	101	114	127	
热源温度/℃	330	340	350	360	370	380	390	400	
输出灰度值	143	158	174	190	205	222	238	255	

表 4 370 ℃~500 ℃ 红外探测器的光电特性测试数据

热源温度在 370 ℃~500 ℃							
热源温度/℃	370	380	390	400	410	420	430
输出灰度值	29	45	65	84	99	118	132
热源温度/℃	440	450	460	470	480	490	500
输出灰度值	151	164	182	202	215	236	255

根据测试结果可知,该多晶硅红外探测器在 100 ℃~290 ℃ 测量模式下,280 ℃ 基本达到饱和状态;在 250 ℃~400 ℃ 测量模式下,400 ℃ 达到饱和;在 370 ℃~500 ℃ 测量模式下,500 ℃ 达到饱和;3 种模式下的测量温度范围分别在 180 ℃、140 ℃ 和 120 ℃。通过 3 种模式下的光电特性如图 2~4 所示,在温度测量范围内温度与输出灰度基本成线性关系,温度测量精度达到 0.85 ℃。随着热源的温度升高,温度分辨率提高,但红外探测器的测量范围越小,这是因为温度越高,热源向外辐射的 8~14 μm 的能量越强,探测器越易达到饱和状态,与热辐射定律和探测器的特性相符合。

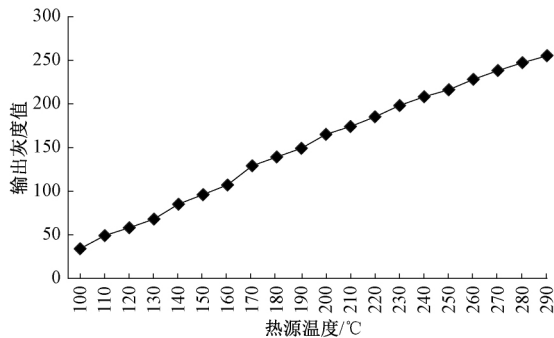


图 2 100 ℃~290 ℃ 红外探测器的光电特性

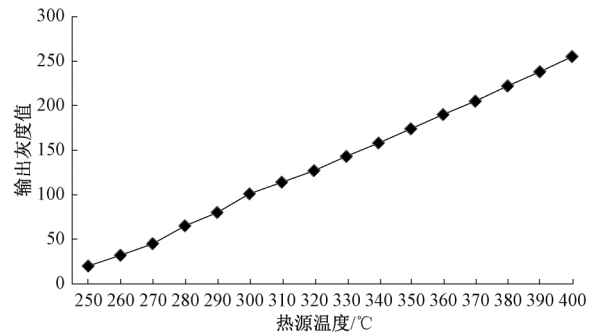


图 3 250 ℃~400 ℃ 红外探测器的光电特性

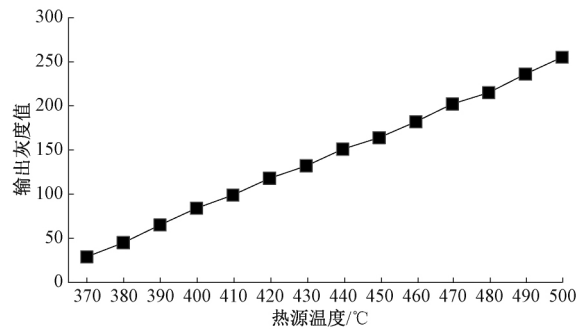


图 4 370 ℃~500 ℃ 红外探测器的光电特性

3 高温下测温范围的拓展

根据对多晶硅红外探测器的光电特性测试结果可知,随着测量目标温度的升高,探测器响应的温度范围越小。对于高温目标且具有一定温度范围分布的情况

下,显然直接运用不能满足测量要求。通过在多晶硅红外探测器前端增加衰减片的方法来拓展其温度检测范围^[15]。热源温度在480℃~610℃范围,在多晶硅红外探测器前端增加一个衰减片进行测试对比,如表5所示。

表5 480℃~610℃红外探测器前端有无衰减片下的光电特性测试数据

热源温度在 480℃~610℃							
热源温度/℃	480	490	500	510	520	530	540
无衰减片输出灰度值	138	153	171	187	206	224	240
有衰减片输出灰度值	32	49	65	80	101	118	131
热源温度/℃	550	560	570	580	590	600	610
无衰减片输出灰度值	255						
有衰减片输出灰度值	152	167	185	194	214	226	255

通过测试数据可知,在多晶硅红外探测器前端无衰减片的情况下,在550℃已经达到饱和;在增加衰减片的情况下,在610℃时达到饱和,温度检测范围达到120℃,测量精度达到0.58℃,从而达到拓展测温范围的目的。

4 工业加热炉上应用的防护设计

通过对多晶硅红外探测器的工作环境温度测试可知,要达到长期稳定地在工业加热炉上运行,保证其工作环境温度十分重要。由于工业加热炉炉温很高,且多晶硅红外探测器在工作时自身也会发热,导致它的工作环境温度通常都存在高出稳定工作的环境温度,所以主要考虑工作环境温度高于正常温度的因素,因此在实践中需要进行降温处理。

设计一种具有夹层结构的防护罩,前端视窗采用远红外锗玻璃(7~14 μm高透),如图5所示,通过冷却仪表气进行风冷保护。由于工业仪表气温度有可能超过30℃,为了提高对多晶硅红外探测器的冷却效率,在进气口增加一个涡旋制冷器来调节进入防护罩夹层仪表气的温度,确保防护罩内部环境温度在25℃左右。应用时在防护罩内部安装一个温度传感器,实时监测内部环境温度值,方便调节涡旋制冷器的大小。该装置已在石化行业加热炉上得到应用,能够保证防护罩内部器件的工作环境温度在常温下,效果达到预期目标。

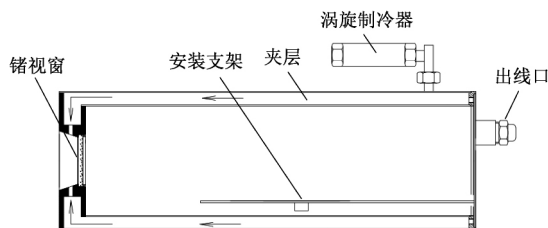


图5 防护罩

5 结 论

本文利用黑体辐射源作为标准热源,针对多晶硅红外探测器的工作环境温度,分别从19℃~40℃下的输出值进行了测试,得出该器件在低于30℃的环境下具有稳定的输出。关于探测器的光电特性,从100℃~500℃通过分档的方式通过实验进行测试,并通过函数拟合得出其在动态范围内温度与输出灰度值的线性关系好。为了能够对宽动态范围的高温目标的检测应用,得出在前端增加衰减片的方法可以有效提高检测的动态范围。通过对多晶硅红外探测器的特性进行实验测试,掌握多晶硅红外探测器的性能特点,并设计出有效的防护装置,对非制冷型红外探测器在不同温度目标检测的实际应用具有很大的指导意义。多晶硅探测器的灵敏度通常在50~60 mK,多晶硅的残余固定图形噪声大,具体表现为图像有蒙纱感,红外图像感官不够通透,在图像显示方面还有待继续研究。

参考文献

- [1] 常松涛,孙志远,张尧禹,等.制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法[J].物理学报,2015,64(5):103-110.
- [2] 王鑫,李伟,曾子铭,等.热像仪-RGB相机-IMU传感器的空间联合标定方法[J].仪器仪表学报,2020,41(11):216-225.
- [3] 田棋杰,常松涛,何锋赞,等.根据环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射[J].光学学报,2017,37(7):152-159.
- [4] 张志强,王萍,于旭东,等.高精度红外热成像测温技术研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):10-18.
- [5] 刘子骥,赵晟晨,赵征庭,等.非制冷红外焦平面阵列器件的热时间常数测试方法[J].红外与激光工程,2019,48(12):2321-2326.
- [6] 石东平,吴超,李孜军,等.基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析[J].红外与激光工程,

- 2015, 44(8): 2321-2326.
- [7] 李宁, 杨词银, 曹立华, 等. $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [8] 王洪亮, 赵雨梦, 刘志坚, 等. 一种无人机搭载的红外成像高压架空线路探伤系统[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15): 29-35.
- [9] 徐坤, 赵麟, 袁圆, 等. 医用红外测温仪测量误差分析及补偿试验研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 104-108.
- [10] 姚婷, 梁成文, 李凯扬. 探测器温度对非制冷红外热像仪人体体温的影响与修正[J]. 红外技术, 2016, 38(11): 984-989.
- [11] 刘泽元, 尚永红, 林博颖, 等. 红外测温设备的空间环境影响及防护研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 165-171.
- [12] 王小力, 黄潇. 非制冷红外热像仪稳定性验证方法研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 565-570.
- [13] 余毅, 王旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 42-47.
- [14] 张艳超, 高策, 刘建卓, 等. 非制冷热像仪内部温升对测温精度的影响修正[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 669-676.
- [15] 刘纯红, 吴海滨, 王鹏, 等. 非制冷焦平面红外热像仪测温范围拓展研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(5): 398-402.

作者简介

刘纯红, 硕士, 主要研究方向为光电检测理论和图像处理。

E-mail: 657840633@qq.com