光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250731001

基于热电制冷的小尺寸PbSe光电导探测器温度控制系统

高　旭[1,2,3]，陈柯润[1,2,3]，杨　冬[2,3]，申　玟[1,2,3]，申　钧[2,3]*

（1. 重庆邮电大学 电子科学与工程学院，重庆 400065；2. 中国科学院大学重庆学院，重庆 400714；
3. 中国科学院 重庆绿色智能技术研究院，重庆 400714）

摘　要： 文章提出一种基于FPGA的红外光电导探测器温度控制系统，旨在解决小尺寸PbSe器件因表面态占比大、边缘效应突出而导致的光电流波动问题。系统采用半导体热电制冷器（TEC）作为核心执行元件，结合负温度系数热敏电阻和模数转换器实现温度实时采集与反馈，并通过FPGA平台实现自整定模糊比例、积分和微分（Proportion-Integral-Differential，PID）控制算法。系统通过占空比信号调制，动态调节TEC的电流极性与功率，实现红外探测器环境温度的精确控制。实验结果表明，当设定温度为268 K（－5℃）时，模糊PID算法较传统PID算法提前91 s达到±0.2 K的温度稳定性。进一步测试显示，当工作温度从300 K降至260 K时，探测器的I_{ph}/I_{dark}提升约10%，噪声下降98.4%，显著提高了探测器的工作性能。对比测试表明，TEC系统与液氮制冷低温探针台的温度区间吻合，在相同温度下性能偏差小于5%。该系统通过集成化设计与智能控制策略，为小尺寸红外探测器的温度稳定性与性能优化提供了高效解决方案，具有广泛的应用前景。

关键词： 红外探测器；温度控制；FPGA；TEC；模糊PID；光电导

中图分类号： TN36　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1025－09

Temperature Control System for Miniature PbSe Photoconductive Detectors Based on a Thermoelectric Cooler

GAO Xu[1,2,3], CHEN Kerun[1,2,3], YANG Dong[2,3], SHEN Wen[1,2,3], SHEN Jun[2,3]

(1. School of Electronic Science and Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN; 2. Chongqing Institute of University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, CHN; 3. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, CHN)

Abstract: This paper presents a temperature control system for infrared photoconductive detectors based on a field-programmable gate array (FPGA), designed to address photocurrent fluctuations caused by the high proportion of surface states and prominent edge effects in small-sized PbSe devices. The system uses a semiconductor thermoelectric cooler (TEC) as the core actuator and combines a negative temperature coefficient thermistor with an analog-to-digital converter to achieve real-time temperature acquisition and feedback, implementing self-tuning fuzzy proportional-integral-differential (PID) control through the FPGA platform. Using the PID control algorithm, the system achieves precise control of the ambient temperature of the infrared detector by modulating the duty cycle signal and dynamically adjusting the current polarity and power of the TEC. Experimental

收稿日期：2025－07－31.

*通信作者：申钧

results show that when the set temperature is 268 K (−5℃), the fuzzy PID algorithm achieves temperature stability within ± 0.2 K 91 s faster than the conventional PID algorithm. Further tests show that when the operating temperature drops from 300 K to 260 K, the Iph/Idark ratio of the detector increases by approximately 10%, and the noise decreases by 98.4%, significantly improving detector performance. Comparative tests demonstrate that the temperature range of the TEC system is consistent with that of the liquid nitrogen-cooled low-temperature probe station, with a performance deviation of less than 5% at the same temperature. Through integrated design and intelligent control strategies, this system provides an efficient solution for temperature stability and performance optimization of small-sized infrared detectors and has broad application prospects.

Key words: infrared detector; temperature control; FPGA, TEC; fuzzy PID; photoconductive

0 引言

红外焦平面探测器通过多探测单元阵列设计，实现了多点同步探测功能，显著提升了空间分辨率。同时红外焦平面探测器还具有尺寸小、重量轻、分辨率高、灵敏度高等特点，目前已经广泛应用于汽车、国防和智能制造等领域[1-3]。铅盐半导体作为典型的Ⅳ-Ⅵ族窄禁带宽度半导体材料，禁带宽度约为0.27 eV，可有效覆盖近红外到中红外范围(1～5 μm)的光谱响应。与HgCdTe、多晶硅和二维红外光电材料相比，其核心优势在于重空穴能带缺失引起的低俄歇复合系数[4-7]等，近年来成为非制冷中红外探测器研究的主要途径之一。然而，面向阵列红外探测器应用的小尺寸铅盐半导体红外探测器，由于表面态占比大、边缘效应等因素，光电流与暗电流之比(I_{ph}/I_{dark})相较于常规探测器要小得多，因此需要对温度进行控制以增大I_{ph}/I_{dark}，并保证与读出电路协同工作的稳定性。

不同于传统的商用制冷型红外探测器所使用的液氮制冷[8]和斯特林制冷[9-13]，半导体热电制冷器(TEC)体积小、低功耗、响应时间快且结构简单[14]，广泛应用于光电、机电、医疗、汽车和通信等高精度温场发生领域[15-17]。本研究通过集成FPGA智能控制与TEC制冷技术，成功构建了适用于小尺寸PbSe光电导探测器的温度控制系统。该系统解决了小尺寸器件因表面态占比大、边缘效应突出导致的光电流波动问题，实现了与低温探针台相当的器件制冷效果。实验结果表明，该系统能够将探测器工作温度稳定在268 K附近，使I_{ph}/I_{dark}提升约10%，噪声下降98.4%。相较于传统制冷方式，该系统在保持高性能的同时显著降低了系统复杂度和功耗，为高分辨率、低功耗、低成本红外成像系统的开发提供了切实可行的技术路径，具有广阔的应用前景。

1 温度对小尺寸PbSe光电探测器的性能影响及其原理

对于普通尺寸的铅盐光电探测器，随着温度升高，铅盐材料的带隙和有效质量增大、折射率下降，同时自由载流子的吸收增加，导致光电响应度降低、温度升高，进而使器件的整体性能衰减。为了克服传统毫米级器件在高分辨率、低功耗和低成本应用中的局限，当前铅盐红外技术的主流发展方式是“微缩”，即将像元尺寸缩减至100 μm以下[18]。在此背景下，国外研究者已采用化学浴沉积法或真空气相沉积工艺成功制备出30～50 μm像元间距的128×128至320×240元非制冷PbSe焦平面阵列(FPA)[19]。然而，尽管小尺寸的像元在提升分辨率、降低功耗和成本方面具有显著优势，但也带来了一系列问题。由于铅盐材料本身存在的表面态和晶界缺陷，当像元尺寸缩小到10 μm时，表面积-体积比显著增大，表面复合电流和漏电通道对总电流的贡献比例上升，暗电流密度增加，器件噪声升高。因此，需要针对小尺寸PbSe探测器进行特殊的制冷系统设计。

2 温度控制系统的构成及其工作原理

基于FPGA的小尺寸红外探测器温度控制系统示意图如图1所示，系统主要由FPGA控制器、光耦合电路、H桥驱动电路、温度采集电路以及A/D转换

电路组成。在该系统中，采用负温度系数的热敏电阻（Negative Temperature Coefficient，NTC）作为传感器，以感知探测器所处的环境温度。测量热敏电阻的电压值将环境温度转换为电信号，通过 A/D 转换电路将其输入至主控制器 FPGA 利用自整定比例、积分和微分（Proportion Integral Differential，PID）算法进行计算从而得到脉冲调制（Pulse Width Modulation，PWM）控制信号。以 PWM 控制信号为指令调整 TEC 的制冷功率大小以及热传导方向，通过光耦合模块将弱点信号与强电信号进行隔离。当探测器温度高于设定温度时，利用 TEC 进行制冷；当探测器温度低于设定温度时，利用 TEC 进行加热。

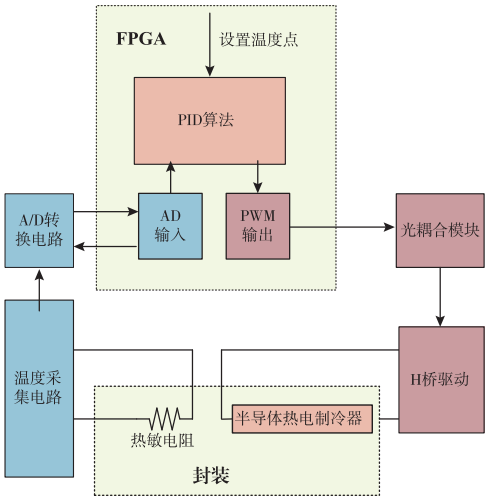


图 1　系统设计示意图

2.1　温度采集原理

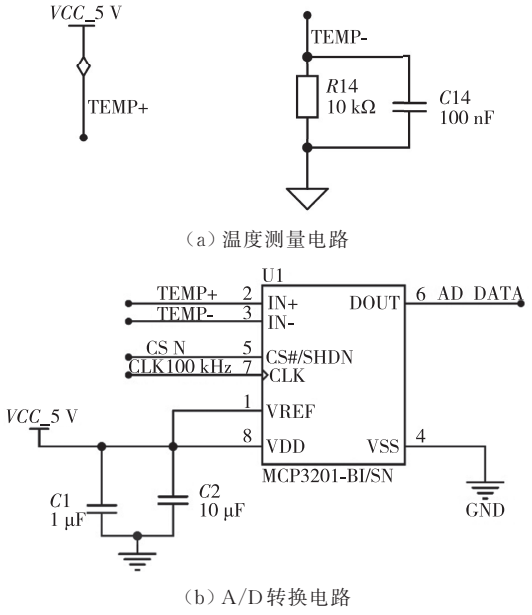
将热敏电阻、TEC 和 PbSe 单元探测器通过银胶进行集成，并置于惰性气体的环境中。当来自外界的扰动导致探测器环境温度发生变化时，这种变化会被热敏电阻 NTC[20] 感知，热敏电阻的阻值随温度升高呈现指数降低，其非线性关系[21] 为：

$$R_t = R_0 \exp\left[B\left(\frac{1}{T_1'} - \frac{1}{T_2'}\right)\right] \tag{1}$$

式中，T_1' 和 T_2' 是开尔文温度，R_t 为热敏电阻在温度为 T_1' 的阻值，R_0 是热敏电阻为 T_2'（通常为常温 298 K）时的标称阻值，B 是热敏电阻的材料常数。

热敏电阻阻值与温度值之间存在对应关系。因此，可以通过测量热敏电阻两端的电压值，将温度信号转换为电信号，从而获得红外探测器所处的环境温度值。所采用的热敏电阻型号为 NCP18XH103F03RB，查看数据手册可以得知温度映射的响应电阻值。

为测量热敏电阻的电阻值，采用结构简单但非线性型高的分压测电阻法，如图 2（a）所示。在本系统中，所获得的电压信号直接与 FPGA 设定温度的电压值进行比较，因此其非线性特性在本系统中的影响较小，重要性相对较低。采用的 ADC 芯片型号为 MCP3201，该芯片为微芯半导体公司所生产的逐次逼近型（SAR）模数转换器，具有单通道差分输入，采样精度位 12 bit，最高采样频率为 100 kHz，其电路图如图 2（b）所示。



（a）温度测量电路

（b）A/D 转换电路

图 2　信号采集电路

MCP3201 模数转换芯片的驱动电压 V_{DD} 范围为 2.7～5.5 V，参考电压范围为 0～V_{DD}，输入电压范围为 0～V_{REF}。最终测量得到的电压为：

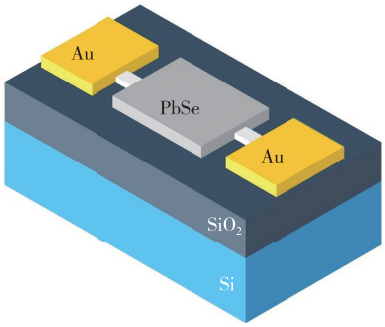
$$U_0 = \left(\frac{R_t}{R_t + R_{14}}\right) V_{CC} \tag{2}$$

2.2　温度控制原理

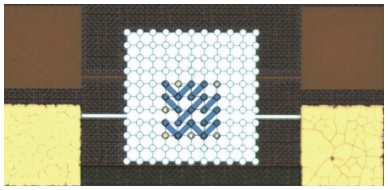
所使用的 PbSe 探测器的结构示意图和光学图片如图 3（a）和（b）所示。器件采用与阵列探测器同一芯片加工的工艺控制器件，其结构与阵列探测器像元完全一致。为避免光刻和刻蚀工艺图形化密度的影响，测试的器件周围设计了 Dummy 图形，器件两个电极之间的有效感光尺寸为 9 μm×17 μm。

温度控制的执行元件为与红外探测器、热敏电阻封装到一起的 TEC，如图 3（c）所示，将 TEC、热敏电阻、探测器的引脚依次引线并焊接到管壳的外接导线柱上，如图 3（d）所示。TEC 是利用半导体的

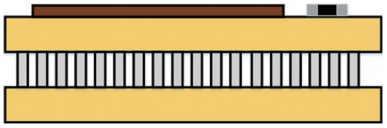
热电效应制取冷量的器件，其工作原理为帕尔贴效应和塞贝克效应，根据载流子在不同材料中的逸出功不同，当电流从不同的方向通过焊接两种金属的接头时，会分别产生吸热和放热现象。



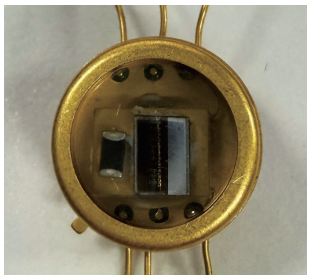
（a）PbSe单元探测器结构图



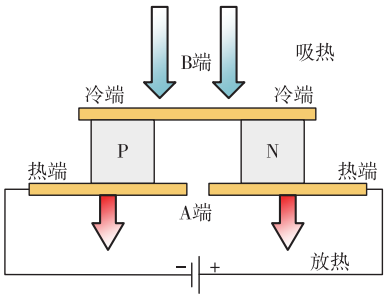
（b）单元PbSe光学照片



（c）封装示意图



（d）封装后器件



（e）帕尔贴效应示意图

图3 器件及封装结构

半导体制冷原理如图3(e)所示。将P型半导体与N型半导体连接形成PN结，当向PN结通正向电流时，P型半导体的a端与N型半导体的b端会吸收能量，导致环境温度降低；P型半导体的d端和N型半导体的c端则会释放能量，使环境温度升高。当向PN结通入反向电流时，上述过程则相反。吸收和放出的热量大小Q_1和Q_2[22]分别为：

$$Q_1 = \pi I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_c - T_h) \tag{3}$$

$$Q_2 = \pi I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_c - T_h) \tag{4}$$

式中，π为帕尔贴系数，I为流入半导体制冷器的电流大小，R为半导体制冷器的阻值，K为制冷器的导热率，T_h和T_c分别为半导体制冷器热端和冷端的温度值。上式表明输入半导体制冷器的电流值的不同，吸收和放出的热量也会不同。因此，可通过PWM的方式改变输入半导体制冷器电流的大小，从而实现红外探测器的环境温度控制。

3 温度控制方案设计

3.1 FPGA逻辑设计

小尺寸红外探测器温度控制方案是基于Vivado平台通过Verilog HDL硬件描述语言实现，其工作流程如图4所示。该控制过程主要分为模数转换器驱动模块、定时触发模块、时钟生成模块、PID计算模块、PWM生成模块。定时触发模块作用是为ADC驱动模块提供使能信号以定时对温度信号进行采样。

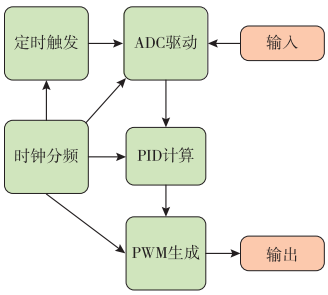


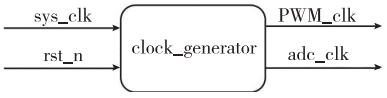
图4 FPGA逻辑图

ADC驱动模块接口如图5所示，adc_clk为ADC驱动时钟；adc_update是ADC驱动模块的使能信号，由定时触发模块控制；adc_d_i为MCP3201采集到的电压串行信号，adc_read_data为每次采集到的12位ADC电压值。

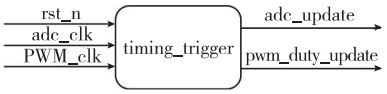


图5 ADC驱动模块示意图

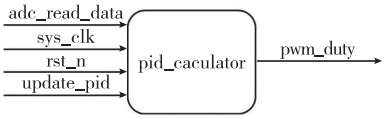
时钟分频器的接口如图6(a)所示，sys_clk为系统时钟，将其分频为PWM计数器时钟与ADC驱动时钟，频率分别为4.1 MHz与1 MHz。



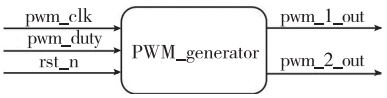
(a) 时钟分频模块图



(b) 定时触发模块图



(c) PID算法模块图



(d) PWM生成模块图

图6　模块图形化

图6(b)为定时触发器的模块图形化，用于定时采集并更新采集到的温度数据和更新PWM信号的占空比。其中温度数据每1 ms更新一次，根据MCP3201驱动时序图可知，即每0.1 s拉低一次adc_update，持续时间为16个adc_clk时钟周期。PWM更新信号约每100 ms拉高一个PWM时钟周期，用以更新PWM占空比。

模糊PID算法是在传统PID逻辑加入了模糊控制器，通过实时计算温度误差、积分项和微分项，并结合模糊推理动态调整PID参数，以优化控制精度和系统稳定性。算法不断接收当前温度值作为输入，以设定温度为目标值，通过误差计算(目标温度与实际温度的差值)驱动控制逻辑，每当接收到更新信号时，模块会更新误差、积分和微分三项，并将误差及微分值模糊化为五级语言变量(负大、负小、零、正小、正大)。模糊推理根据规则表输出调整策略，动态调整Kp和Ki的值，同时进行上下限约束。最终的温度控制信号通过比例、积分、微分项的加权和计算得出，并将结果限制在PWM占空比的最大正值(最大制冷功率)和最小负值(最大加热功率)。具体模块图与算法示意图分别如图6(c)和图7所示。

最终，得到每0.1 s更新的PWM占空比信号。当占空比信号为正时，pwm_1_out按照占空比信号对应的占空比输出PWM波形，pwm_2_out拉低为零，驱动TEC正向制冷。当占空比信号为负时，pwm_2_out按照占空比信号对应的占空比输出PWM波形，pwm_1_out拉低为零，驱动TEC反向制热，如图6(d)所示。

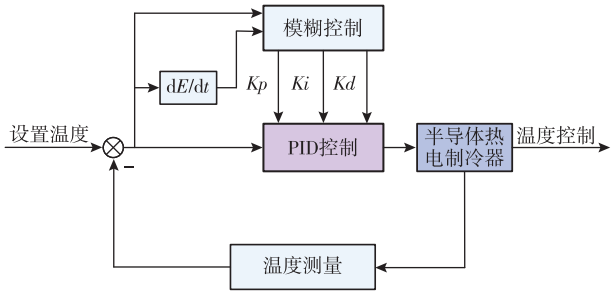


图7　PID算法框图

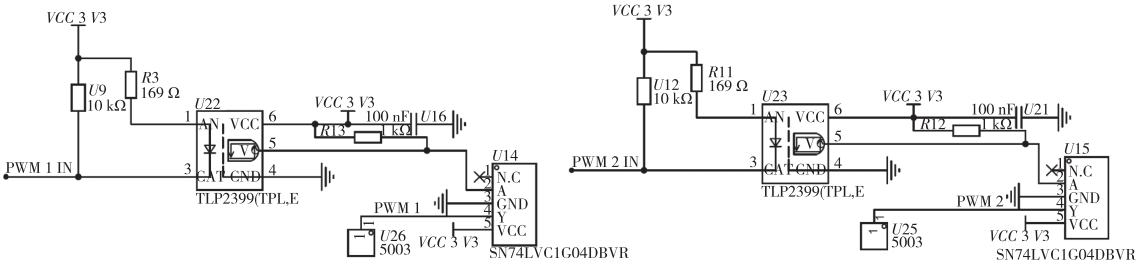
温度控制的实现以FPGA为核心控制器，比较采集的红外探测器内部温度值与设定值，根据二者的差值实时切换状态机，控制PWM的输出波形占空比以及数模转换模块输出值。通过改变输入半导体制冷器的电流大小和方向，实现红外探测器的温度控制。相关设计指标参数如表1所示。

表1　设计指标参数

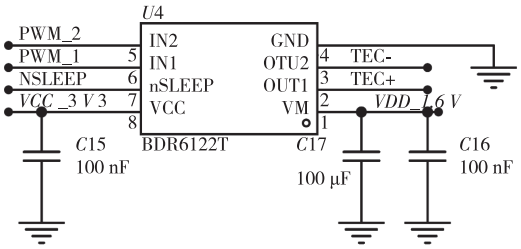
参数	数值
温度阈值/K	0.2
占空比/%	0～100
脉冲频率/kHz	＞1
D/A输出电压/V	0～3.3
A/D输入电压/V	0～5

3.2　硬件电路设计

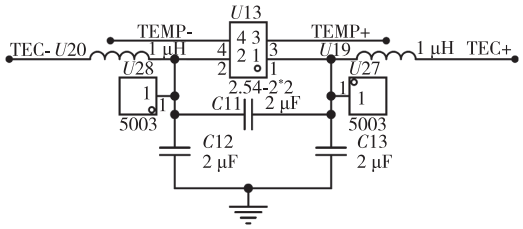
从电路结构框图可知，除FPGA作为控制芯片和用于温度采集的A/D转换模块外，本系统还存在光耦合隔离模块和H桥驱动模块，如图8(a)和(b)所示。光耦模块主要用于实现信号的隔离传输和处理，接收两路PWM输入信号，通过光耦合器进行电气隔离，然后利用反相器对信号进行反相和驱动增强处理，最后输出两路处理后的PWM信号(PWM_1和PWM_2)以有效防止高电压、高功率电路对控制电路的干扰。H桥驱动模块接收PWM1，PWM2和NSLEEP信号，通过芯片U4的内部电路逻辑处理，控制OUT1和OUT2引脚输出相应的高低电平信号，从而驱动外部TEC，如图8(c)所示。通过控制NSLEEP信号，可以实现芯片的睡眠和唤醒，以降低系统功耗。在该系统中，TEC始终处于工作状态，不需要进入休眠模式，因此该引脚被拉高以维持芯片持续运行。此外，系统还包括电源模块、精准电压模块用于提供驱动各芯片的稳定电压。



（a）光耦合模块原理图



（b）H桥驱动模块原理图

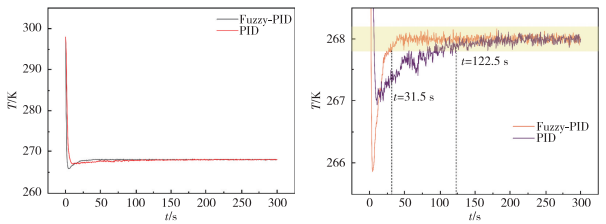


（c）TEC和NTC接口模块原理图

图8 PWM输出电路原理图

4 实验结果与分析

根据上述原理与设计方案，搭建了基于FPGA的小尺寸红外探测器温度控制系统。编写Verilog语言控制系统每隔0.1 s测量电阻值，测量时间为5 min，通过公式(1)计算得到温度值在电阻值的映射，得到传统PID和模糊PID温度曲线如图9所示。从图9(a)～(b)可以看出，在本系统中，当初始系数相同且温度设定为268 K(－5℃)时，以±0.2 K为标准温度区间，模糊PID相较于PID达标时间提前了91 s，较原来的达标时间缩短约2.9倍。



（a）PID和模糊PID控制温度曲线

（b）PID与模糊PID控制下到达指定温度范围的时间对比

图9 温控性能表征

在未安装温度控制系统的情况下，设定PbSe红外探测器的初始工作温度为300 K，并通过逐步增加工作电压(从1～10 V)测试其在1 550 nm波长下的光响应特性。随着电压升高，探测器的光电流呈现明显的非线性增长趋势，这主要与PbSe材料在室温下的载流子迁移率特性及热激发效应相关。值得注意的是，在300 K下，暗电流(无光照条件下的基线电流)随电压增加而指数上升，这一现象可归因于肖特基势垒高度的降低导致隧穿电流的增强。

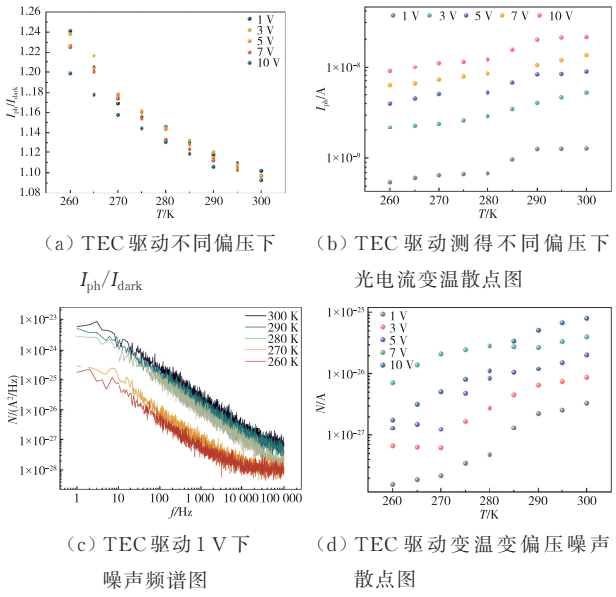
在进一步的实验中，固定工作电压为1 V的条件下，将探测器温度分别设置为290 K，280 K，270 K和260 K，测试其在1 550 nm波长净光电流响应曲线。实验结果显示，随着温度降低，光电流呈单调递减趋势。这一现象可归因于两方面因素：一是PbSe材料的带隙随温度下降而增大，导致1 550 nm波长(对应约0.8 eV能量)的光子能量相对不足，吸收效率降低；二是低温下热激发载流子减少，使得背景噪声降低，从而提高了信噪比。然而，当温度低于290 K时，光电流的下降速率显著加快，表明材料在低温区的光吸收特性可能受到

晶格振动(声子散射)或表面态密度变化的影响。

由于管壳封装的结构限制,探测器的热端无法通过被动散热达到理想冷却效果,因此管壳内温度无法稳定持续在 260 K 以下。在安装热电冷却器(TEC)驱动后,探测器在相同偏压下的性能发生了显著变化。如图 10 所示,响应光电流(图 10(b))表现出随温度降低而逐渐减小的趋势。值得注意的是,暗电流的降低幅度显著高于光电流的降低幅度。这种现象体现在器件的 I_{ph}/I_{dark}(图 10(a)),这种差异主要源于暗电流的主导机制——热激发载流子在低温下的指数衰减(遵循肖克利-里德-霍尔模型),而光电流的衰减则更多受材料带隙展宽和光子吸收深度变化的线性影响。此外,TEC 的主动控温能力使得探测器工作温度稳定性显著提升,避免了传统被动散热方式(如自然对流或辐射)因环境波动导致的温度漂移问题。从噪声频谱图和平均噪声数据来看,TEC 将温度从 300 K 降低到 260 K,使得噪声降低了 98.4%(图 10(d))。

进一步将上述 TEC 制冷器件测量实验结果与利用低温探针台探针测试得到的相同尺寸器件数据进行对比。如图 11 所示,在相同的温度下,两种器件的 I_{ph}/I_{dark}、光电流、噪声数据保持基本一致的变化规律。如表 2 所示,两种制冷环境下的测试结果偏差范围小于 5%,说明本文基于模糊 PID 方式设计的 TEC 制冷系统具备与液氮制冷低温探针台基本一致的制冷效果。

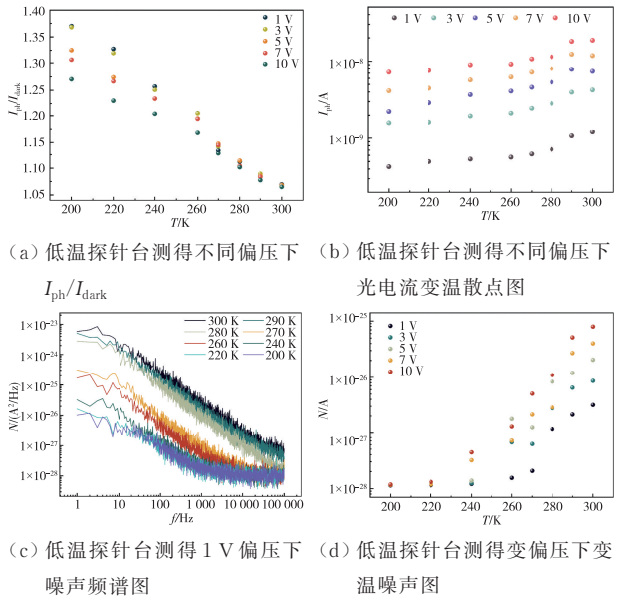
基于上述单点探测器 TEC 制冷系统良好的温度一致性,该设计方法未来可进一步拓展到亚 20 μm 像素尺寸级别的 PbSe 焦平面阵列 TEC 制冷系统。具体而言,可以基于当前 FPGA 平台设计多通道并行温度采集与控制架构,利用 FPGA 的高并行处理能力,实现对多个热敏电阻信号的同步采样与实时处理。同时,引入空间-时间域联合的模糊 PID 优化算法,考虑相邻探测单元之间的热传导模型,动态调整各 TEC 模块的驱动参数,实现阵列整体温度场的均匀化控制。此外,为进一步提升系统集成度与功耗效率,未来可探索将温度传感、TEC 驱动电路与 FPGA 控制模块共同集成于微型封装内的片上温控系统,实现“探测-传感-制冷-控制”一



(a) TEC 驱动不同偏压下 I_{ph}/I_{dark}　(b) TEC 驱动测得不同偏压下光电流变温散点图

(c) TEC 驱动 1 V 下噪声频谱图　(d) TEC 驱动变温变偏压噪声散点图

图 10　TEC 驱动的探测器性能表征



(a) 低温探针台测得不同偏压下 I_{ph}/I_{dark}　(b) 低温探针台测得不同偏压下光电流变温散点图

(c) 低温探针台测得 1 V 偏压下噪声频谱图　(d) 低温探针台测得变偏压下变温噪声图

图 11　低温探针台驱动的探测器性能表征

表 2　5 V 下不同制冷方式变温光电流与噪声及误差对照表

温度/K	260	270	280	290	300
温控系统光电流/nA	3.99	5.06	5.24	8.18	8.79
低温探针台光电流/nA	4.1	4.85	5.35	8	9
光电流偏差/%	−2.7	4.1	−2.1	2.2	−2.4
温控系统噪声/(A^2/Hz)	1.72×10^{-27}	1.20×10^{-27}	8.08×10^{-27}	1.15×10^{-26}	2.10×10^{-26}
低温探针台噪声/(A^2/Hz)	1.78×10^{-27}	1.24×10^{-27}	8.34×10^{-27}	1.20×10^{-26}	2.05×10^{-26}
噪声偏差/%	−3.5	−3.3	−3.2	−4.4	2.4

体化设计。这不仅有助于减小系统体积,降低外部干扰,还能够提高长期运行的可靠性。

5 结论

针对现有小尺寸PbSe红外光电导探测器因表面态占比大、边缘效应突出而导致的光电流波动问题,本文提出一种基于FPGA的小尺寸红外光电导探测器的温度实时控制方法。该方法以FPGA为主控制器,通过测量热敏电阻的分压电压值,实现光电探测器所处的环境温度信息的实时采集。在FPGA中完成电压信号向温度值的映射转换,并通过模糊PID算法得到驱动信号用以控制TEC电流的方向和大小,实现对红外探测器所处环境的温度控制。基于亚20 μm PbSe探测器的测试结果表明,模糊PID比传统PID控制算法达到指定温度的速度提升2.9倍,PbSe探测器的I_{ph}/I_{dark}提升约10%,噪声下降98.4%,显著提高了探测器的工作性能。此外,TEC系统与液氮制冷低温探针台温度区间吻合,相同温度下性能偏差小于5%。所提出的TEC制冷系统设计,有望为高性能、低功耗、高集成度红外探测系统的工程化实现提供技术支撑,具有较好的工程化实现潜力。

参考文献:

[1] 王 欣. 红外焦平面阵列探测器的研究进展[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(9): 157-161.
Wang Xin. Research progress of infrared focal plane array detector [J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40 (9): 157-161.

[2] 袁 媛, 于 艳, 李敬国. 智能化红外焦平面应用前景与发展现状[J]. 激光与红外, 2024, 54(1): 3-9.
Yuan Yuan, Yu Yan, Li Jingguo. Application prospects and development status of intelligent infrared focal plane[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(1): 3-9.

[3] 张伟婷, 陈 星, 叶振华. 大面阵红外探测器的发展现状与趋势[C]//2019年红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛论文集. 2019: 72-77.

[4] Shen Q, Katayama K, Sawada T, et al. Ultrafast carrier dynamics in PbS quantum dots[J]. Chemical Physics Letters, 2012, 542: 89-93.

[5] Di Bartolomeo A, Kumar A, Durante O, et al. Temperature-dependent photoconductivity in two-dimensional MoS_2 transistors[J]. Materials Today Nano, 2023, 24: 100382.

[6] Hines M A, Scholes G D. Colloidal PbS nanocrystals with size-tunable near-infrared emission: observation of post-synthesis self-narrowing of the particle size distribution [J]. Advanced Materials, 2003, 15(21): 1844-1849.

[7] Zhang J, Zhang S, Zhang Y, et al. Colloidal quantum dots: synthesis, composition, structure, and emerging optoelectronic applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(3): 2200551.

[8] 刘振奇. 高精度大口径低温红外目标源系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Liu Zhenqi. Research on Key Technologies of High-Precision Large-Aperture Low-temperature Infrared Target Source System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[9] Sako T, Sekiguchi T, Sasaki M, et al. MOA-cam3: a wide-field mosaic CCD camera for a gravitational microlensing survey in New Zealand[J]. Experimental Astronomy, 2008, 22(1): 51-66.

[10] Komiyama Y, Obuchi Y, Nakaya H, et al. Hyper suprime-cam: camera dewar design [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2018, 70(SP1): S2.

[11] Atwood B, O'Brien T P, Colarosa C, et al. Design of the KMTNet large format CCD camera[J]. Proc. of SPIE, 2012, 8446: 84466G.

[12] Iwert O, Baade D, Balestra A, et al. The OmegaCAM 16K × 16K CCD detector system for the ESO VLT survey telescope (VST)[C]//Scientific Detectors for Astronomy 2005, 2006: 345-352.

[13] Bowden G B, Langton B J, Little W A, et al. The LSST camera 500-watt-130℃ mixed refrigerant cooling system[J]. Proc. of SPIE, 2014, 9151: 91513D.

[14] 丁 露, 徐 建, 陈明祥. 热电制冷器的过冷特性及其性能的优化综述[J]. 低温与超导, 2021, 49(4): 42-50.
Ding Lu, Xu Jian, Chen Mingxiang. Review on supercooling performance and its optimization for thermoelectric coolers [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(4): 42-50.

[15] 丛 山, 张大宇, 常明超, 等. 基于半导体制冷的星载CCD测试用低温环境装置设计[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(1): 95-102.
Cong Shan, Zhang Dayu, Chang Mingchao, et al. Design of a low-temperature equipment for spaceborne CCD test based on semiconductor refrigeration [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(1): 95-102.

[16] 徐健义. 高精度热电制冷器温控系统设计与实现[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
Xu Jianyi. Design and implementation of the high-precision temperature control system based on thermoelectric cooler [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2017.

[17] 胡 伟, 周本军, 黄雨新. 半导体激光器自动温度控制技术研究[J]. 信息通信, 2020, 33(9): 13-16.
Hu Wei, Zhou Benjun, Huang Yuxin. Research on automatic temperature control technology for semiconductor laser [J]. Information & Communications, 2020, 33(9): 13-16.

[18] 杨 冬, 申 钧, 高恺聪, 等. 化学水浴法合成硫化铅探测器的红外响应研究[J]. 红外技术, 2023, 45(6): 559-566.

Yang Dong, Shen Jun, Gao Kaicong, et al. Infrared response of lead sulfide detector synthesized from chemical bath deposition[J]. Infrared Technology, 2023, 45(6): 559-566.

[19] 张国栋，朱庆帅，薛奔驰，等. 非制冷PbSe中红外光导探测器的研究现状与发展趋势[J]. 红外，2024，45(5)：1-17.
Zhang Guodong, Zhu Qingshuai, Xue Benchi, et al. Research status and development trend of uncooled PbSe mid-infrared photo-conductive detectors[J]. Infrared, 2024, 45(5): 1-17.

[20] Ippolito S, Kelly A G, Furlan de Oliveira R, et al. Covalently interconnected transition metal dichalcogenide networks *via* defect engineering for high-performance electronic devices[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(5): 592-598.

[21] Altenburg H, Mrooz O, Plewa J, et al. Semiconductor ceramics for NTC thermistors: the reliability aspects[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(10/11): 1787-1791.

[22] 沙占友，王彦朋，杜之涛. NTC热敏电阻的线性化及其应用[J]. 自动化仪表，2004，25(9)：28-30.
Sha Zhanyou, Wang Yanpeng, Du Zhitao. Linearization and application of NTC thermistor[J]. Process Automation Instrumentation, 2004, 25(9): 28-30.

作者简介：

高　旭(2000—)，男，山东省泰安市人，硕士研究生，主要研究方向为红外光电导探测器；

申　钧(1984—)，男，重庆市人，博士，研究员，主要研究方向为焦平面红外探测器件及成像系统。