

液氮温区集成式数字温度传感器设计

张昌锋, 毛文彪, 张济清, 郭强, 钟昇佑, 姚立斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 温度传感器是制冷型红外焦平面探测器的重要组成部分, 它用于测量探测器工作温度, 其输出用于制冷机控制, 从而控制探测器温度。探测器的工作温度将直接影响探测器的性能, 如信噪比、探测率和盲元率等。针对传统 PN 结温度传感器需要模拟信号处理电路及易受电磁干扰的弊端, 设计了一种基于 CMOS 工艺的集成式数字温度传感器, 可以集成到红外焦平面探测器读出电路中, 直接通过 SPI 接口输出数字测温值。设计的集成式数字温度传感器采用 0.35 μm CMOS 工艺流片, 芯片面积为 380 μm \times 500 μm (不包含 PAD), 在电源电压 2.5 V 和采样频率 6.1 次/s 条件下, 功耗为 300 μW , 分辨率 0.061 6 K。在 77 K 温度下输出的 RMS 噪声为 0.148 K。测试结果表明, 集成式数字温度传感器可以应用于制冷型红外焦平面探测器温度测量。

关键词: 集成式温度传感器; 制冷型红外探测器; 液氮温区; Sigma-Delta ADC

中图分类号: TN492 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0422003

Design of integrated digital temperature sensor for liquid nitrogen temperature

Zhang Changfeng, Mao Wenbiao, Zhang Jiqing, Guo Qiang, Zhong Shengyou, Yao Libin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The temperature sensor is one of the most important components of the cooled infrared detector assembly which measures and controls the operating temperature of the detector. Its working temperature directly affects the performance of the detector, such as SNR, detectivity and blind pixel rate. Considering that traditional PN junction temperature sensor requires complex analog signal processing and is easily affected by electromagnetic interference, a CMOS integrated digital temperature sensor was proposed. Fabricated in a 0.35 μm CMOS process, the chip area of the sensor is 380 μm \times 500 μm (without PAD), the proposed sensor reached the conversion speed of 6.1 times/s and consumed 300 μW when the working voltage is 2.5 V. The resolution of the sensor was 0.061 6 K and RMS noise is 0.148 K@77 K. The measurement results prove that the proposed integrated digital temperature sensor is suitable for cooled infrared detector temperature measurement.

Key words: integrated temperature sensor; cooled infrared detector; liquid nitrogen temperature; Sigma-Delta ADC

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2017-12-03

作者简介: 张昌锋(1991-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事混合信号集成电路设计方面的研究。Email: zcf_0526@163.com

通讯作者: 姚立斌(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事混合信号集成电路设计方面的研究。Email: libin.yao@gmail.com

0 引言

温度传感器是连接制冷机与红外焦平面探测器的桥梁,制冷型红外焦平面探测器的最终工作温度将直接影响该探测器的性能,如信噪比、响应率、探测率和盲元率等^[1]。提高温度传感器的精度和稳定性可以提高红外探测器控温的精度。因此,提高温度传感器的性能是提高制冷型红外焦平面探测器性能的一个有效途径。

当前制冷型红外焦平面探测器中采用的是 PN 结温度传感器,通过恒流源给 PN 结提供电流偏置,测量 PN 结正向压降作为电压与温度的关系式,外接模拟信号处理电路及模数转换器(ADC)进行模数转换,达到测温目的。然而,制冷机附近的电磁干扰对模拟信号处理电路的影响比较严重,而且存在温漂问题。同时,PN 结温度传感器与焦平面阵列并未集成为一体,其安装位置与焦平面阵列存在温度差,不能准确测量焦平面的温度,这些因素都会影响测温精度。

随着 CMOS 工艺以及集成电路技术的发展,使得将 ADC 与温度传感器集成在一起并最终集成在数字化读出电路^[2]中成为可能,集成式数字温度传感器应用日渐广泛。目前通常的集成式数字温度传感器测温范围大多为 300 K 附近,应用于液氮温度范围的 CMOS 集成式温度传感器研究基本处于空白^[3]。因此,文中的研究具有一定的前沿性,是有意义的前期探索。

文中研究的液氮温区集成式数字温度传感器在参考文献[4]基础上优化设计,并应用于制冷型红外焦平面探测器中,具有以下优势:与 ADC 集成在一起输出数字信号,抗电磁干扰能力强,测温稳定性好;芯片面积小,与数字化读出电路集成在一起真实测量焦平面阵列的温度;省去温度传感器单独安装,一体化设计便捷性高。

文中从制冷型红外焦平面探测器组件对片上测温的需求出发,完成了液氮温区 CMOS 工艺集成式数字温度传感器的系统设计、电路设计、仿真验证和流片,最后对该系统进行测试并对测试结果进行分析。

1 集成式数字温度传感器系统设计

根据当前各种制冷型红外探测器对应的工作温

度^[5],文中温度传感器的测温范围定为 60~200 K,要求在该温度范围内测温稳定性好、重复性高。同时,针对文中特殊的应用需求,尽管该温度传感器的测温范围是 60~200 K,但在常温下也需要维持正常工作,只是精度的要求不高,保证制冷机在常温可以正常工作,并将红外探测器稳定工作在所需的温度值上。然后,结合制冷机对测温系统的要求,文中温度传感器输出值每秒更新 5 次,即 ADC 转换一次为 200 ms,尽可能实现制冷机温控系统的实时反馈。文中温度传感器的主要设计指标如表 1 所示。

表 1 温度传感器主要指标

Tab.1 Main indexes of temperature sensor

Indexes	Value
Process	0.35 μm standard CMOS process
Source supply/V	2.5
Temperature range/K	60~200
Resolution/K	0.1
Precision/K	±0.1
Conversion rate/times·s ⁻¹	5
Power/μW	<500

文中所设计的液氮温区集成式数字温度传感器系统框图如图 1 所示。其中标准 CMOS 工艺双极型晶体管电压随温度变化的特性涵盖绝对零度以上,适用于文中液氮温区的测温范围。

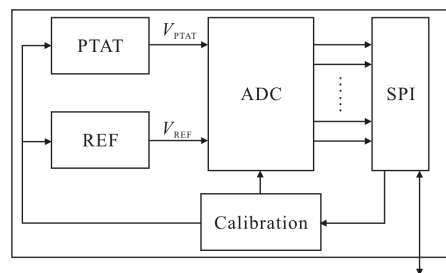


图 1 温度传感器系统框图

Fig.1 Block diagram of temperature sensor system

该系统主要由 3 部分组成:温度传感电路、ADC 和 SPI 数据传输电路。温度传感电路产生与温度有一定关系的模拟电压,进而 ADC 将该模拟电压转换为数字信号,通过 SPI 数据传输电路输出数字温度值。同时,利用 SPI 双向传输特性在芯片外部通过

SPI 完成温度传感器的校准。

2 集成式数字温度传感器电路设计

2.1 温度传感电路

温度传感电路用于产生与温度成正比的电压 V_{PTAT} 和基准电压 V_{REF} ，文中基于双极型晶体管产生负温度系数电压 V_{BE} 和正温度系数电压 ΔV_{BE} 间接产生 V_{PTAT} 和 V_{REF} 。

CMOS 工艺下双极型晶体管的集电极电流 I_C 与射-基结电压 V_{BE} 和温度 T 的关系表示为：

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \quad (1)$$

式中： q 为电荷； k 为波尔兹曼常数； T 为绝对温度； I_S 为反向饱和电流。理论上， V_{BE} 在室温下的温度系数为 -1.5 mV/K 。文中对 V_{BE} 采取电流修调技术提高负温度系数电压的线性度。

同时，如果两个相同的 PNP 管的偏置电流之比为 $p:1$ ，那么二者的基-射结电压之差为：

$$\Delta V_{BE} = V_{BE2} - V_{BE1} = \frac{kT}{q} \ln p \quad (2)$$

理论上， ΔV_{BE} 在室温下的温度系数为 0.14 mV/K 。文中对 ΔV_{BE} 采取动态匹配技术提高正温度系数电压的线性度。同时，对 ΔV_{BE} 选取合适的增益因子 α 得到电压 V_{PTAT} ，并和 V_{BE} 相加得到基准电压 V_{REF} 。电压关系如图 2 所示^[6]。

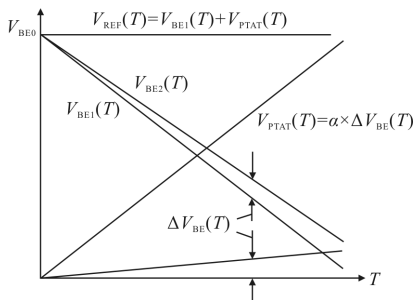


图 2 温度传感器电压关系图

Fig.2 Temperature dependency of key voltages in the sensor

可以看出，温度传感电路的精度主要取决于 V_{BE} 、 ΔV_{BE} 和 α 。为了实现文中温度传感器精度的要求，需严格控制各部分电路的误差。推导计算得到温度 D_{out} 对 V_{BE} 、 ΔV_{BE} 和 α 的分辨率为：

$$S_{V_{BE}}^{D_{out}}(T) = \frac{\partial D_{out}}{\partial V_{BE}} = A \frac{\partial \mu}{\partial V_{BE}} \approx -\frac{T}{V_{REF}} \quad (3)$$

$$S_{\Delta V_{BE}}^{D_{out}}(T) = \frac{\partial D_{out}}{\partial(\Delta V_{BE})} = A \frac{\partial \mu}{\partial(\Delta V_{BE})} \approx \frac{A-T}{V_{REF}} \alpha \quad (4)$$

$$S_{\alpha}^{D_{out}}(T) = \frac{\partial D_{out}}{\partial \alpha} = A \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} \approx \frac{T}{\alpha} \left(1 - \frac{T}{A}\right) \quad (5)$$

理论上，取 $V_{REF}=1.2 \text{ V}$ ， $A=600 \text{ K}$ ，由表 1 知文中温度传感器的测温范围为 $60\sim 200 \text{ K}$ ，精密为 $\pm 0.1 \text{ K}$ ，因此可以计算出文中对 V_{BE} 、 ΔV_{BE} 和 α 所允许的最大误差为：

$$|V_{BE} - V_{BE,ideal}| < (20 \text{ mV/K}) \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$|\Delta V_{BE} - \Delta V_{BE,ideal}| < \frac{3 \text{ mV/K}}{\alpha} \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$\frac{\alpha - \alpha_{ideal}}{\alpha_{ideal}} < \left(\frac{3}{4} \% / \text{K}\right) \cdot \Delta T \quad (8)$$

因此，文中从减小误差的角度对 V_{BE} 和 ΔV_{BE} 的产生电路进行详细设计。

假设饱和电流 I_S 有一个偏差 ΔI_S ，根据公式(1)， V_{BE} 可以表示为：

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{I_S + \Delta I_S}\right) \approx V_{BE}|_{\Delta I_S=0} - \frac{kT}{q} \frac{\Delta I_S}{I_S} \quad (9)$$

文中采用 CMOS 工艺中纵向的衬底寄生双极型晶体管对应力不敏感，因此 $\Delta I_S/I_S$ 随温度的变化可以忽略不计，保证了单点校准的可行性。

因此，负温度系数电压 V_{BE} 产生电路如图 3 所示。电路中采用电流修调技术减小饱和电流的工艺偏差给 V_{BE} 带来的 PTAT 误差，即通过控制译码器 C 和数字过采样调制器 F 调整电流 $I_{trimmed}$ ，最终实现 V_{BE} 的单点校准。

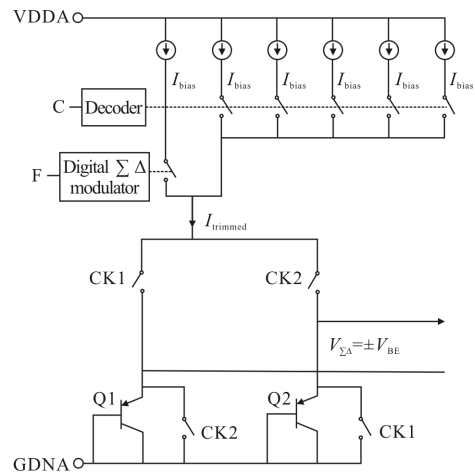


图 3 负温度系数电压产生电路

Fig.3 Circuit for generating negative temperature coefficient voltage

根据公式(2)，电流镜的失配会影响电流 $p:1$ 的

准确度,进而影响 ΔV_{BE} 的精度,而这些失配可以通过周期性的交换电流镜来减小 ΔV_{BE} 的误差,也就是动态匹配技术^[7](DEM)。

图 4 所示为动态匹配技术原理图。 $p+1$ 路电流中的某一路通过其中的一个晶体管,其余的 p 路电

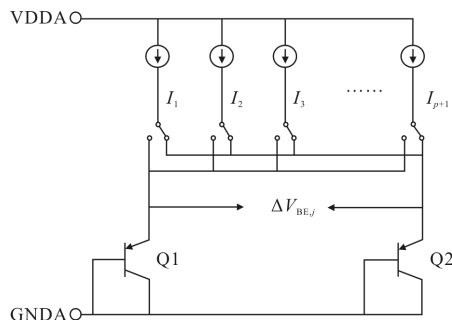


图 4 动态匹配技术原理图

Fig.4 Schematic diagram of the DEM technology

流通过另外一个晶体管,假设电流 $I_j(1 \leq j \leq p+1)$ 通过 Q1,那么该时刻其余的 p 路电流全部通过 Q2,此时 ΔV_{BE} 为:

$$\Delta V_{BE,j} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\sum_{i \neq j} I_i / I_j}{1} \right) = \frac{kT}{q} \ln(p + \Delta p_j) \quad (10)$$

式中: $\Delta p_j/p$ 是电流 I_j 与其余 p 路电流的平均值之间的失配,经过 $p+1$ 个时间后,得到 $p+1$ 个 ΔV_{BE} ,这 $p+1$ 个 ΔV_{BE} 的平均值为:

$$\Delta V_{BE,avg} = \frac{1}{p+1} \sum_{j=1}^{p+1} \Delta V_{BE,j} \quad (11)$$

相比于没有失配的理想情况,此时的误差为:

$$|\Delta V_{BE,avg} - \Delta V_{BE}|_{\Delta p=0} < \frac{kT}{2q} \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 \quad (12)$$

带有动态匹配技术的正温度系数电压 ΔV_{BE} 产生电路如图 5 所示。电路中通过电流镜产生 6 路相

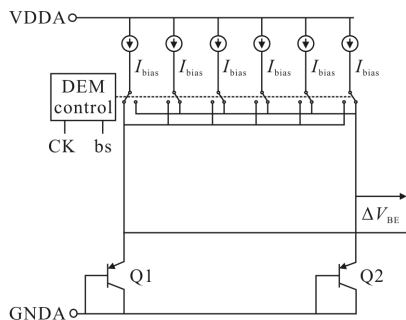


图 5 正温度系数电压产生电路

Fig.5 Circuit for generating positive temperature coefficient voltage

同的电流 I_{bias} 。采用 DEM 技术后,根据公式(12),假如 $\Delta p/p=1\%$,当 $T=77\text{ K}$ 时,由于电流镜失配引起的温度传感器误差减小为 0.0012 K 。

2.2 模数转换电路

温度传感器需在低转换速度下实现高精度,符合 Sigma-Delta ADC 的特点。从精度要求、转换速度、系统复杂性等因素综合考虑,文中设计一阶 14 位的 Sigma-Delta ADC 作为液氮温区集成式数字温度传感器的模数转换电路。

图 6 为 1 阶 Sigma-Delta ADC 调制器电路图。电路采用自归零结构,减小运算放大器失调电压和 $1/f$ 噪声的同时提高温度传感器的精度。其中 V_{BE} 和 ΔV_{BE} 作为 ADC 的输入, α 通过改变采样电容的大小实现,采用 DEM 技术减小采样电容的失配,最终实现模数转换,关系式为:

$$\mu = \frac{V_{PTAT}}{V_{REF}} = \frac{\alpha \cdot \Delta V_{BE}}{V_{BE} + \alpha \cdot V_{BE}} \quad (13)$$

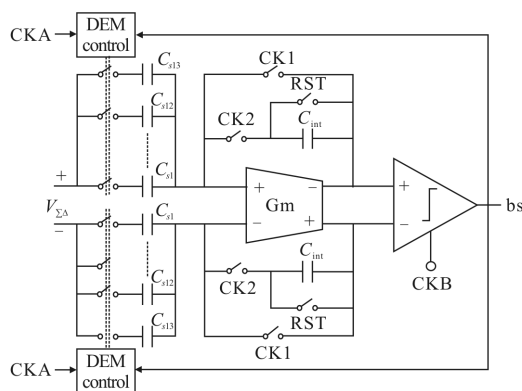


图 6 1 阶 Sigma-Delta ADC 调制器电路图

Fig.6 Circuit diagram of 1-order Sigma-Delta ADC modulator

文中在 ADC 电路设计过程中充分考虑了 KTC 噪声对温度传感器的影响,综合考虑版图面积,最终采样电容采用 150 fF ,积分电容采用 1500 fF 。此时,当 $T=77\text{ K}$ 时,理论上 KTC 噪声引起的温度传感器误差为 0.043 K 。

通过对比几种结构的运算放大器^[8],文中选用全差分共源共栅电流镜运算放大器,并采用开关电容结构实现共模反馈。

文中采用 SPI 数据传输方式将芯片内部数字信号串行传输到片外,通过 FPGA 开发平台完成数据发送和接收。

3 芯片测试结果与分析

文中设计的液氮温区集成式数字温度传感器首先在 Cadence 平台上完成了仿真验证^[9],然后采用 0.35 μm CMOS 工艺进行流片,版图面积 380 μm×500 μm(不包含 PAD)。其中待测芯片封装在 PCB 上的示意图如图 7(a)所示,封装在液氮杜瓦瓶中的示意图如图 7(b)所示。

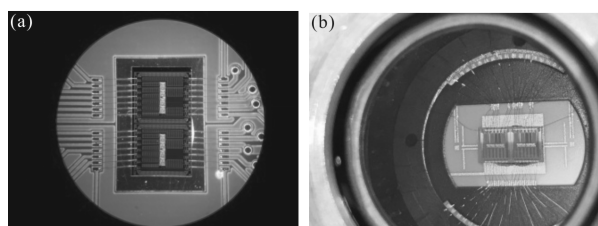


图 7 芯片封装在 PCB 和杜瓦中的示意图

Fig.7 Pictures of the chip packaged on PCB and dewar

此次芯片测试条件为:电源电压 2.5 V、采样频率 6.1 次/s,此时芯片功耗为 300 μW。

给封装有芯片的杜瓦瓶灌满液氮后保持 2~3 h,保证芯片的环境温度为 77 K,采集 1 200 个输出数据,直方图如图 8 所示。可以看出,芯片环境温度在 77 K 下输出数据的分布呈现正态分布,符合理论规律。计算图中 1 200 个数据的平均值为 1 882.1 LSB,RMS 噪声为 2.4LSB,即该芯片在 77 K 下的噪声为 0.148 K。

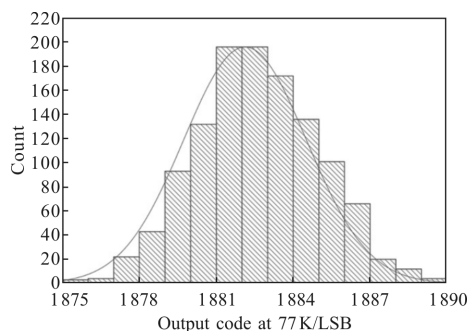


图 8 芯片输出数据直方图

Fig.8 Histogram of the chip output code

然后将芯片置于高低温箱中,图 9 所示芯片环境温度为 213 K(-60℃)时采集的 100 个数据;图 10 所示环境温度为 313 K(40℃)时采集的 100 个数据。

可以看出,在固定温度的情况下,输出呈现为在一定范围内的抖动,这种抖动是由电路噪声导致的,对图 9 和图 10 分别计算 100 个数据的标准

差,显示 213 K(-60℃)时芯片的 RMS 噪声为 0.7680 LSB,即 0.047 K;313 K(40℃)时芯片的 RMS 噪声为 1.3067 LSB,即 0.081 K。

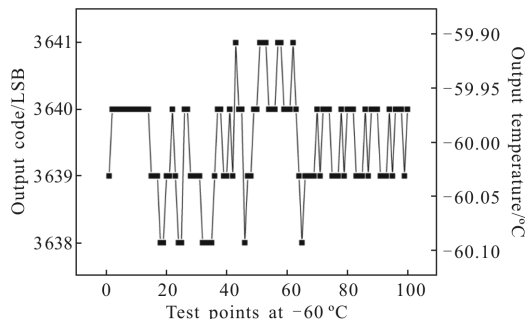


图 9 213 K(-60℃)时芯片测试的 100 个输出数据
Fig.9 100 output codes of the chip at 213 K(-60℃)

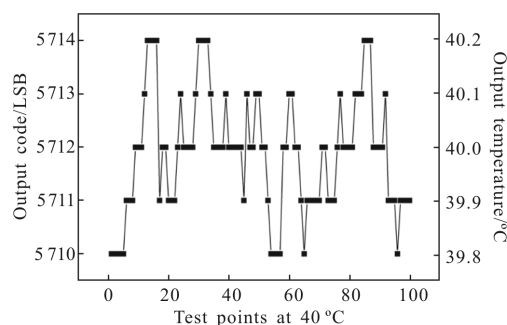


图 10 313 K(40℃)时芯片测试的 100 个输出数据
Fig.10 100 output codes of the chip at 313 K(40℃)

同时表 2 给出了同批次的 3 个不同芯片在 3 个不同温度下噪声测试结果,并转换为 K。

表 2 3 个典型温度下 3 个不同芯片测试的噪声
Tab.2 Noise of three chips at three typical temperature

Temperature	RMS noise/K		
	A_1	A_2	A_3
77 K	0.148	0.173	0.13
213 K(-60℃)	0.047	0.053	0.06
313 K(40℃)	0.081	0.074	0.071

可以看出,在 213 K 和 313 K 下芯片的 RMS 噪声比较小,此时热噪声占主要因素,而在 77 K 下 RMS 噪声偏大,原因可能与 MOS 管阈值电压上升及器件失配增加相关。同时,同批次的 3 个不同芯片噪声测试结果具有一定的离散性,即工艺偏差也会对芯片带来影响。

将芯片置于高低温箱中,在 213~313 K 温度范

围内每间隔 5 K 采集 50 个数据, 并对这 50 个数据计算平均值作为该温度下芯片的输出值, 同时, 由于测试条件限制无法对 77~213 K 温度范围进行准确的变温控制, 因此只有通过液氮保持芯片在 77 K 下测试输出, 最终通过 77 K 和 213~313 K 的测试点拟合出传感器的输出特性曲线, 如图 11 所示。

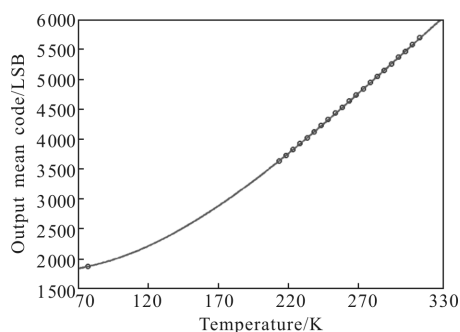


图 11 芯片输出特性拟合曲线

Fig.11 Fitted curve of the chip output characteristic

测试结果显示芯片在 77~313 K 范围内随温度呈现单调变化的趋势, 论证了文中集成式数字温度传感器应用于制冷型红外探测器的可行性。在 77~313 K 温度范围内芯片输出值从 1 882.1 升到 5 712, 粗略计算每 K 变化 16.23 LSB, 分辨率为 0.061 6 K。

最后, 在图 8 测试方法的基础上待杜瓦瓶回温至常温后继续给杜瓦瓶灌满液氮后保持 2~3 h 后再采集 1 200 个数据。如此反复回温降温操作 10 次, 并对每次采集的 1 200 个数据计算平均值, 结果如图 12 所示。

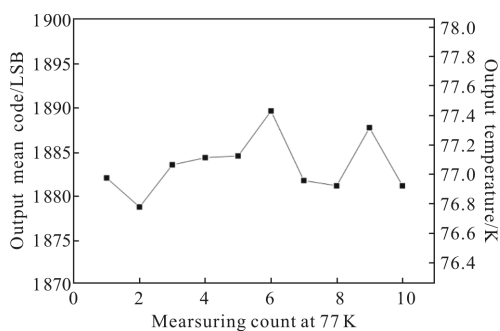


图 12 重复降温 10 次芯片在 77 K 的测试结果

Fig.12 Output code of the chip cooled at 77 K repeating 10 times

可以看出, 77 K 液氮温度下集成式数字温度传感器的测温重复精度约为 0.8 K, 性能还有待继续提升。

4 结 论

文中设计了一种基于 CMOS 工艺的液氮温区集

成式数字温度传感器。芯片测试结果表明:

(1) 集成式数字温度传感器芯片在 77~313 K 温度范围内工作正常, 输出随温度单调变化。在 150~313 K 温度范围内, 传感器的线性较好, 在 77~150 K 温度范围内线性变差。原因与在低温条件下 CMOS 器件的模型参数不准有关。

(2) 集成式数字温度传感器芯片在 77~313 K 温度范围内噪声均小于 0.2 K。在 77 K 时重复性小于 1 K。尚不能满足红外焦平面探测器温度控制精度要求。

文中的设计及测试结果验证了集成式数字温度传感器应用于制冷型红外探测器温度控制电路的可行性。设计的液氮温区集成式数字温度传感器在 77 K 液氮温度下噪声偏大, 重复测温精度不高, 后续还有进一步探索和优化的空间。

参考文献:

- [1] Michael A Kinch. Fundamentals of infrared detector materials [C]//SPIE, 2007, TT76: 13-15.
- [2] Bai Piji, Zhao Jun, Han Fuzhong, et al. Review of digital mid wave infrared focal plane array detector assembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102003. (in Chinese)
- [3] Deng C, Sheng Y, Wang S, et al. A CMOS smart temperature sensor with single-point calibration method for clinical use [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2016, 63(2): 136-140.
- [4] Aita A L, Pertijs M A P, Makinwa K A A, et al. Low power CMOS smart temperature sensor with a batch calibrated inaccuracy of $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}(\pm 3\sigma)$ from $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(3): 1840-1848.
- [5] Rogalski A. Infrared Detector[M]. 2nd edition. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [6] Pertijs M A P, Makinwa K A A, Huijsing J H. A CMOS smart temperature sensor with a 3σ inaccuracy of $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ from $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2005, 40(12): 2805-2815.
- [7] Van der Plassche R J. Dynamic element matching for high accuracy monolithic D/A converters [J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1976, 11(6): 795-800.
- [8] Libin Yao, Michiel S J Steyaert, Willy Sansen. A 1-V 140 μW 88-dB audio sigma-delta modulator in 90 nm CMOS [J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2004, 39(11): 1809-1818.
- [9] Zhang Changfeng, Chen Nan, Yao Libin. A low-power CMOS smart temperature sensor from 60 K to 200 K [C]//IEEE Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2016: 1390-1394.