光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024020201

碲镉汞红外探测器前置放大电路低温稳定性研究

韩俊丽[1,2]，刘福浩[2*]，杨晓阳[2]，马　丁[2]，余双洋[1,2]，李向阳[2]

（1. 上海大学 微电子学院，上海 201899；2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083）

摘　要： 在航天工程应用过程中，发现室温下 HgCdTe 红外探测器前置放大电路输出正常，但是当温度降低至－55℃时，输出有振荡现象，对探测器施加红外辐照后振荡现象加剧。文章首次对该现象进行系统研究，提出了 HgCdTe 红外探测器电路在低温下光照后的等效电路模型，从相位裕度与增益裕度角度分析前置放大电路在低温下产生振荡的机理，并在此基础上，提出了抑制低温光照后前置放大电路振荡的解决方法，实验结果验证了该方法的有效性。

关键词： 等效模型；电路低温光致振荡现象；产生机制；抑制方法

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0654－05

Low-Temperature Stability of Preamplifier Circuits for HgCdTe Infrared Detectors

HAN Junli[1,2], LIU Fuhao[2], YANG Xiaoyang[2], MA Ding[2], YU Shuangyang[1,2], LI Xiangyang[2]

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, CHN;
2. Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: In aerospace applications, a HgCdTe infrared detector preamplifier circuit yields the normal output at room temperature; however, it exhibits oscillations when the temperature is reduced to －55 ℃, and these oscillations intensify when infrared light is irradiated to the detector. In this study, this phenomenon is systematically investigated for the first time, and an equivalent circuit model of a HgCdTe infrared detector circuit after low-temperature irradiation is presented. The mechanism of the oscillation of the preamplifier circuit at low temperature is analyzed in terms of phase and gain margins. Based on the analysis, a solution is proposed to inhibit the oscillation of the preamplifier circuit after illumination at low temperatures. The validity of the method is confirmed experimentally.

Key words: equivalent modeling; circuit low-temperature phototropic oscillatory phenomena; generation mechanisms; suppression methods

0　引言

红外探测器在遥感航天、军事侦查、森林防火和工业控制等领域应用广泛[1-3]。为扩大波长探测范围，扩展应用领域，已研究出多种红外探测器，按材料体系划分可包括 InSb 红外探测器、InGaAs 红外探测器、HgCdTe 红外探测器、量子阱红外探测器和超晶格红外探测器等[4]。而 HgCdTe 光生伏特型红外探测器因禁带宽度可调、灵敏度高、噪声低和响应速度快等优点[5-7]，经常被作为红外探测系统的核心器件。

HgCdTe 红外探测系统前端一般由两部分构成：探测器芯片和前置放大电路。探测器芯片吸收红外辐射，产生光电流，光电流信号经过前置放大器

收稿日期：2024－02－02.
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFF0721800).
* **通信作者：**刘福浩

转换成电压信号，被后端信号处理系统采集[8-9]。为降低 HgCdTe 探测器的暗电流与提高灵敏度，通常将探测器及放大电路置于低温环境下工作[10]。在航天工程任务研究中发现，室温下前置放大器输出正常，然而当温度降低到－55 ℃时，施加红外辐照，输出有轻微振荡现象，并且当红外辐照光强增加时，振荡频率和幅度也随之增大，这严重影响了探测器的正常使用。

虽然已有大量关于电路振荡现象以及红外探测器低温放大电路的研究和讨论，但未发现 HgCdTe 红外探测器低温下光照产生振荡现象的报道。本文首次对该现象进行系统性研究，重点探索探测器在低温下光照后的物理模型，并分析前置放大电路反馈环路增益与相位的变化特性。在此基础之上，建立完善的等效电路模型，并提出有效抑制振荡产生的方法，预期将在工程任务中得到应用和推广。

1 HgCdTe 红外探测器前置放大电路

探测器与前置放大电路互联后的等效电路如图 1 所示，其中运算放大器采用德州仪器（Texas Instruments，TI）的 OPA2333P，该运算放大器具有极低的失调电压，典型值为 2 μV，非常适用于等效电阻比较小的 HgCdTe 探测器。

前置放大电路是典型的跨阻放大器（RTIA）结构，反馈电阻 R_f 为 200 kΩ，反馈电容 C_f 为 100 pF。反馈电阻 R_f 用于将 HgCdTe 光电二极管的电流信号转换成电压信号，其阻值需要根据光生电流大小、信号输出需求、运算放大器失调电压、失调电流以及噪声、带宽等多方面进行综合考虑。电容 C_f 跨接在反馈电阻两端，用来调节反馈回路的相位，以避免回路振荡的发生。C_f 同时具有限制放大器带宽，减小输出总噪声的作用。运放输出端接采样电容 C_L，用来将放大后的电压信号采集并保持，进而提供给后端进行信号处理。

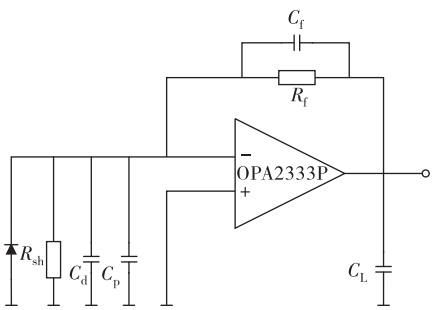
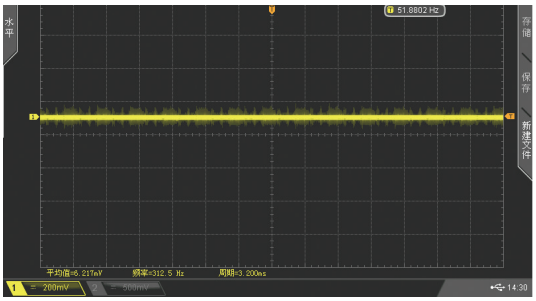


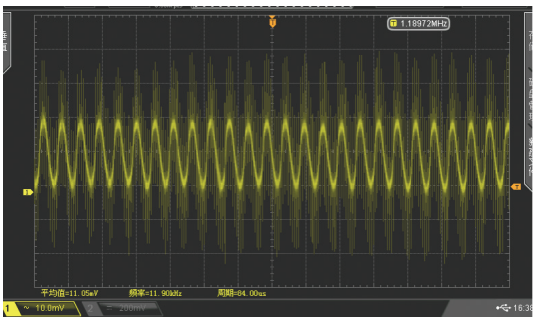
图 1 探测器与前置放大电路互联后的等效电路

2 低温振荡现象

为前置放大电路提供 3.3 V 直流电压，使用示波器观察电路的输出波形。室温下运算放大器工作正常，输出波形为直线，如图 2(a)所示，当用红外光源照射碲镉汞探测器时，输出直线波形整体上移。当工作温度降低到－55 ℃时，此时施加一定光强的红外辐照，电路出现振荡现象，波形近似正弦波，振荡频率约为 50 kHz，如图 2(b)所示。



(a) 在室温下，器件输出波形



(b) 在－55 ℃下，施加红外辐照，器件输出波形

图 2 电路的输出波形

3 低温光照导致振荡现象产生的机制分析

负反馈放大电路产生振荡的基本原理是：由于在某一频率下，输入信号 $\dot{X}_i$ 与反馈信号 $\dot{X}_f$ 由同相变为反相，即 $\varphi_a+\varphi_f=(2n+1)\times180^\circ$（$\varphi_a$，$\varphi_f$ 分别是开环增益、反馈系数的相角），使得放大电路的净输入信号由减小变为增大，引入的负反馈变成了正反馈。因此根据振荡现象产生原理，可以从相位裕度和增益裕度两方面来分析电路的稳定性。稳定的负反馈电路要求，相位裕度 $\varphi_m\geqslant45^\circ$ 或 $G_m\leqslant-10$ dB[11]。

根据模拟电路经典理论，电路中整个回路的增益为 $\dot{A}=\dfrac{\dot{A}_{uo}}{1+\dot{A}_{uo}F}$，因此分析振荡时，需要通过开环增益 $\dot{A}_{uo}$ 与反馈系数 $\dot{F}$ 来分析。

3.1　OPA2333P 开环增益 $\dot{A}_{uo}$

从 OPA2333P 的数据手册中可以获得开环增益与相位特性波特图。低温下前置放大电路振荡的频率为 50 kHz 时，开环增益对应的相位裕度为 85°。

3.2　反馈系数

整个反馈网络的反馈系数 $\dot{F}$ 可表示为：

$$\dot{F}=\frac{R_{sh}\ /\!/\ \dfrac{1}{s(C_d+C_p)}}{R_{sh}\ /\!/\ \dfrac{1}{s(C_d+C_p)}+R_f\ /\!/\ \dfrac{1}{sC_f}} \tag{1}$$

其中，运算放大器共模输入电容为 4 pF，差模输入电容为 2 pF，探测器电容为 10 pF，总的输入电容 C_T 近似为 15 pF。探测器的并联电阻在室温下约为 1 kΩ。反馈回路电阻为 200 kΩ，反馈电容为 100 pF。低温下（−55 ℃）并联电阻为 25 kΩ，电容近似不变。绘制室温下的探测器与前置放大电路互联的等效模型如图 3 所示。室温下电路的反馈系数幅频、相频曲线如图 4(a)所示。结合开环增益在 50 kHz 时对应的相位裕度，可以分析得出，在室温下 50 kHz 时电路相位裕度 $\varphi=85°+78.4°=163.4°$。低温下电路的反馈系数幅频、相频曲线如图 4(b)所示，50 kHz 时相位裕度 $\varphi=85°+47.4°=132.4°$。低温下碲镉汞探测器电阻急剧变大，导致放大电路相位裕度减小，是产生振荡现象的重要原因。然而如果仅由开环增益 $\dot{A}_{uo}$ 与反馈系数 $\dot{F}$ 来分析，则该电路在低温与室温下仍然是稳定的，不符合产生振荡的条件。因此，电路在低温下振荡的产生原因必须考虑采样电容 C_L 的贡献。

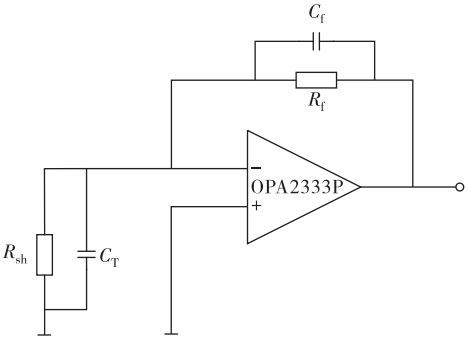
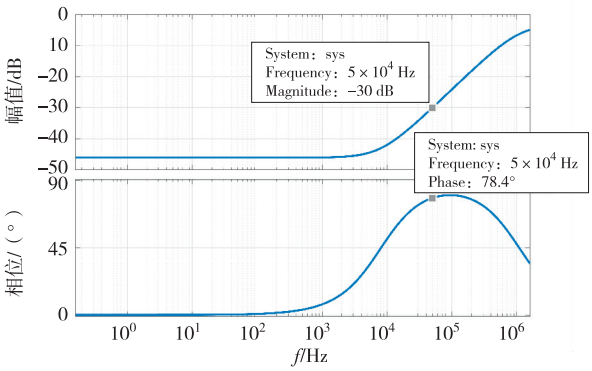
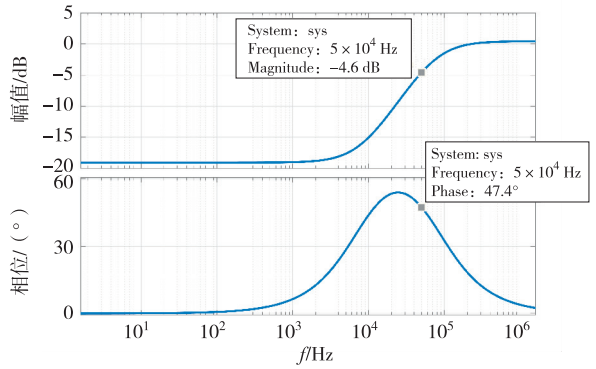


图 3　室温下探测器与前置放大电路互联等效模型



（a）室温



（b）低温−55 ℃

图 4　电路的波特图

3.3　采样电容 C_L 波特图分析

3.3.1　相位裕度分析

电容 C_L 是系统的采样电容，用于将放大后的探测器信号采样保持，供给后端 AD 进行处理。连接采样电容 C_L 后的电路如图 5 所示。

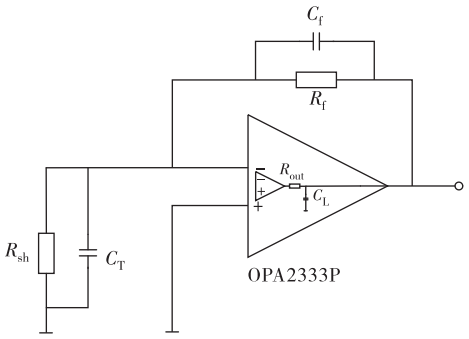


图 5　连接采样电容 C_L 后的电路等效模型

OPA2333P 的输出电阻 R_{out} 为 2 kΩ，采样电容 C_L 为 100 nF。输出电阻与采样电容构成一个低通滤波器，因此整个电路的 AF 可以写成 $\dot{X}\dot{A}_{uo}\dot{F}$，其中 $\dot{X}=\dfrac{1/sC_L}{R_{out}+1/sC_L}$。

从图 6 中可以读出，在低温 −55 ℃ 下，频率为 50 kHz 时，$\dot{X}$ 产生的相移为 −89.1°，所以此时总的相移为 $\varphi=85°+47.4°-89.1°=43.3°$，小于电路稳定所需要的 45°的相位裕度，满足振荡需要的相位条件，前置放大电路有可能在低温下产生振荡，下面分析电路的增益裕度。

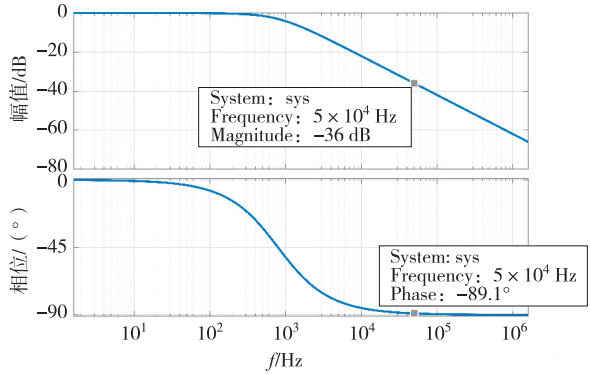


图 6 在低温−55 ℃下,电路的波特图

3.3.2 增益裕度分析

在 50 kHz 时,$\dot{F}$ 的增益为−4.6 dB,手册中给出的开环增益 $\dot{A}_{uo}$ 典型值为 130 dB,按照手册中的 130 dB 在半对数坐标下直线下降趋势,计算出 50 kHz 时增益为 56 dB,因此总的增益 $Gain$ = −4.6 dB+56 dB−36 dB=15.4 dB,满足振荡发生的增益条件,前置放大电路在低温下产生振荡。

4 抑制措施

4.1 输出与采样电容之间串联电阻 R_p 分析

运放输出端与采样电容之间串联一电阻 R_p,此时电路等效模型如图 7 所示。串联电阻 R_p 与采样电容 C_L 组成低通电路,将减缓相位下降的速率,这有助于抑制电路振荡的产生。此时的 $\dot{X}=\dfrac{1/sC_L+R_p}{R_{out}+1/sC_L+R_p}$,波特图如图 8 所示,从图中可以看出,增加了 1 kΩ 的电阻 R_p 后,在 50 kHz 时 $\dot{X}$ 产生的相移为−1.21°,所以低温下 50 kHz 时总的相移为 φ=85°+47.4°−1.21°=131.19°,远大于电路稳定所需要的 45°的相位裕度。电路是稳定的,所以能有效抑制振荡的发生。对此时的电路使用示波器进行低温测试,可发现,输出波形为直线,低温光照下无振荡发生,具体波形如图 9 所示。

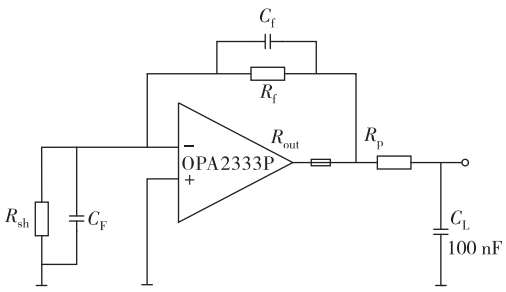


图 7 电路等效模型

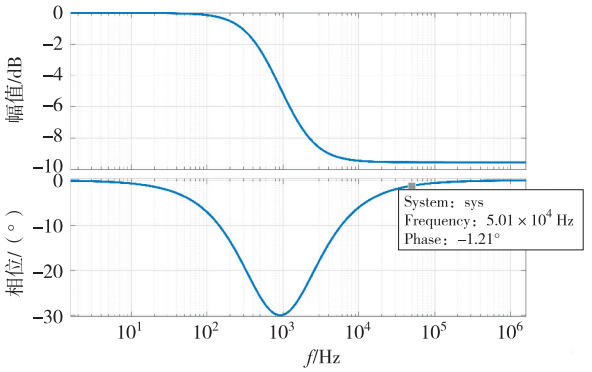


图 8 电路的波特图

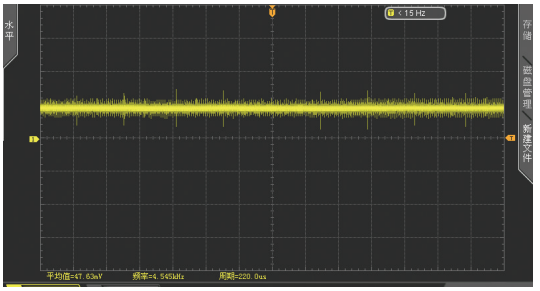


图 9 电路输出波形图

4.2 1 nF 采样电容分析

将采样电容的电容值改为 1 nF 后,电路等效模型如图 10 所示。当采样电容为 1 nF,50 kHz 时 $\dot{X}$ 带来的相移为−32.2°,总的相移为 φ=85°+47.4°−32.2°=100.2°,波特图如图 11 所示。因此电路是稳定的,不会发生振荡。对此时的电路使用示波器进行低温测试,输出波形为直线,波形如图 12 所示,从波形中可以看出,通过将采样电容改为 1 nF,抑制了振荡现象。然而,考虑到电路中开关引起的电荷注入效应,采样电容值不能太小,否则在开关打开和闭合时在采样电容上的注入电荷将明显影响真正光电信号的获取[12]。因此,抑制低温下前置放大电路振荡的首选方案是串联电阻以延缓相位下降速率,其次是在不影响采样电压的前提下适当减小采样电容。

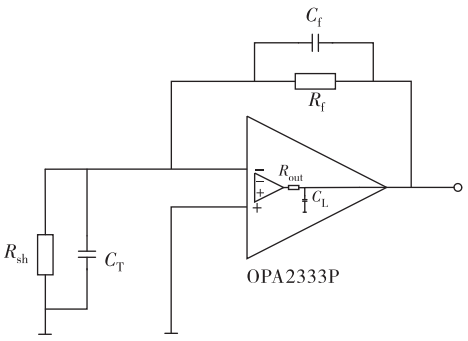


图 10 电路等效模型

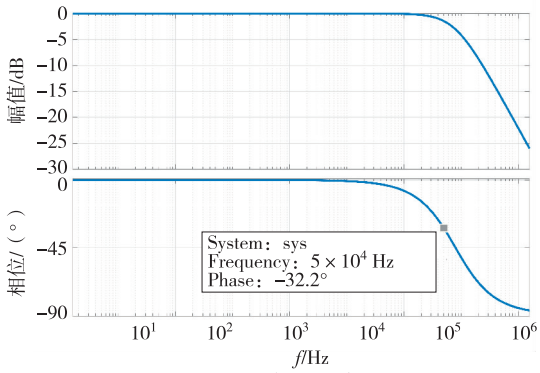


图 11　电路的波特图

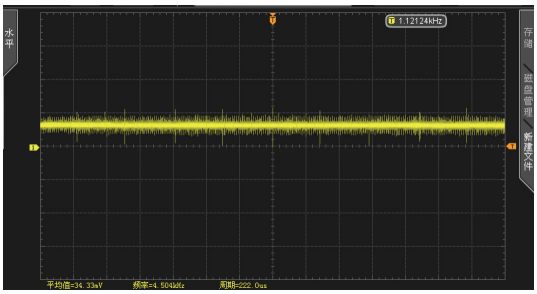


图 12　输出波形

5　结论

在航天工程应用中发现，HgCdTe 红外探测器电路在－55 ℃工作时，输出有振荡现象，施加红外辐照，振荡现象加剧，这严重影响了探测器的正常使用。本文提出了探测器电路在低温下光照后的等效电路模型，并从增益裕度与相位裕度两个角度分析了 HgCdTe 红外探测器电路在低温下发生振荡的机理。在此基础上提出了抑制前置放大电路振荡的方法，并通过实验验证了该研究结果的正确性，这不仅有助于深化理解光电探测器与前置放大电路的耦合模型，也将可能在提升光电放大电路稳定性及可靠性方面发挥积极作用。

参考文献：

[1] 赵毅强，孙淑云，周航宇，等. 红外探测器专用前置放大电路低温特性的研究[J]. 红外与激光工程，2007，36(4)：439-442.
Zhao Yiqiang，Sun Shuyun，Zhou Hangyu，et al. Cryogenic characteristics of the infrared detector specific pre-amplifier[J]. Infrared and Laser Engineering，2007，36(4)：439-442.

[2] 李春来，刘成玉，金　健，等. 红外高光谱遥感成像的技术发展与气体探测应用(特邀)[J]. 红外与激光工程，2022，51(7)：20210866.
Li Chunlai，Liu Chengyu，Jin Jian，et al. Development of infrared hyperspectral remote sensing imaging and application of gas detection (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51(7)：20210866.

[3] 张　敏，韩　芳，康　键，等. 红外热成像技术在民用领域的应用[J]. 红外，2019，40(6)：35-43.
Zhang Min，Han Fang，Kang Jian，et al. Civilian application of infrared thermal imaging technology[J]. Infrared，2019，40(6)：35-43.

[4] 陈伯良，李向阳. 航天红外成像探测器[M]. 北京：科学出版社，2016：5-7.
Chen Boliang，Li Xiangyang. Intrared Imaging Detectors for Space Applications[M]. Beijing：Science Press，2016：5-7.

[5] 冯阿丽. 碲镉汞光伏型探测器的激光束诱导电流谱研究[D]. 安徽：安徽大学，2014.
Feng Ali. The research on laser beam induced current spectra of HgCdTe photovoltaic detectors[D]. Anhui：Anhui University，2014.

[6] 蔡　毅. 碲镉汞探测器的回顾与展望(特邀)[J]. 红外与激光工程，2022，51(1)：20210988.
Cai Yi. Review and prospect of HgCdTe detectors (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51(1)：20210988.

[7] Xin C，Yong C，Dong L W，et al. Status and progress of research on HgCdTe photovoltaic infrared detectors[C]// Proc. of the 7th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications，2022：191-206.

[8] 江　婷，李　胜，高闽光，等. 红外探测器的低噪声前置放大电路设计[J]. 激光与红外，2018，48(7)：913-918.
Jiang Ting，Li Sheng，Gao Minguang，et al. Design of low noise preamplifier circuit for infrared detector[J]. Laser & Infrared，2018，48(7)：913-918.

[9] Eppeldauer G P，Martin R J. Photocurrent measurement of PC and PV HgCdTe detectors[J]. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.，2001，106(3)：577-587.

[10] Wang F，Ji X，Guo A，et al. Design and implementation of multi-channel readout circuits for low-temperature environments[J]. Electronics，2023，12(9)：2089.

[11] 康华光，陈大钦，张　林. 电子技术基础-模拟部分(第 6 版)[M]. 北京：高等教育出版社，2013：378-380.
Kang Huaguang，Chen Daqin，Zhang Lin. Fundamentals of Electronic Technology-Simulation Section (6th Edition)[M]. Beijing：Higher Education Press，2013：378-380.

[12] 毕查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿，程军，张瑞智，等译. 西安：西安交通大学出版社，2005：493-497.

作者简介：

韩俊丽(1998－)，女，甘肃省人，硕士研究生，主要从事 CMOS 低温电路方面的研究；

刘福浩(1987－)，男，山东省临清市人，博士，副研究员，研究方向为 AlGaN 基紫外光电探测器与 HgCdTe 红外光电探测器的制备与信号读出。