光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240203001

低背景和高背景下长波碲镉汞红外探测器的性能比较

魏佳欣[1,2]，林　春[2*]，王　溪[2]，林加木[2]，周松敏[2]，李　珣[2]

（1. 上海大学 微电子学院，上海 201800；2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083）

摘　要： p-on-n型长波碲镉汞红外探测器相比n-on-p型有更低的暗电流，这使其在低背景中具有较高的探测能力。针对器件响应测试在常温黑体背景下，探测率受积分时间较短的影响而无法有效提高的问题，采用将低温黑体辐射源置于杜瓦腔体内的方法，对器件在低温背景下的探测率D^*与器件工作温度、黑体辐射源温度的变化关系进行测试与分析。研究结果表明，长波p-on-n型器件在低背景条件下性能优良，在80 K工作温度下截止波长为12.3 μm，高背景条件下器件探测率D^*为2.7×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$/W，而低背景条件下，D^*数值达到了1.0×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$/W。

关键词： 长波；p-on-n；碲镉汞；探测率

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0867－05

Detectivity Study of Long-Wave HgCdTe Infrared Detector at Low/Room Temperature Blackbody

WEI Jiaxin[1,2], LIN Chun[2], WANG Xi[2], LIN Jiamu[2], ZHOU Songmin[2], LI Xun[2]

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: A p-on-n type long-wave HgCdTe infrared detector has a lower dark current than the n-on-p type. This smaller dark current gives the detector a greater ability to detect a low radiation flux. Since the short integration time in the context of a blackbody at room temperature prevented the effective improvement of the detectivity of the device response test, the relationship between the detectivity, D^*, of the device in a low-temperature background and the working temperature of the device, as well as the temperature of the blackbody radiation source, was tested and analyzed by placing the low-temperature blackbody radiation source in a Dewar cavity. The results suggest that long-wave p-on-n type device has reached good performance under low background conditions, with a cut-off wavelength of 12.3 μm at 80 K, the D^* of the device was 2.7×10^{11} cm•Hz$^{1/2}$/W at room temperature blackbody, however, the D^* was 1.0×10^{12} cm•Hz$^{1/2}$/W at low temperature blackbody.

Key words: long-wavelength; p-on-n; HgCdTe; detectivity

0　引言

碲镉汞材料是目前长波、甚长波光伏型红外探测器的应用材料之一，其组分可调的特点使其可以覆盖三个辐射大气窗口。器件结构类型主要有p-on-n型与n-on-p型。由于p-on-n型长波碲镉汞红外探测器的吸收层中载流子为电子且少数载流子

收稿日期：2025－02－03.

*通信作者：林 春

寿命更长，这使得其相比n-on-p型有着更低的暗电流，进而提高了其在低背景探测中的性能，因此被广泛应用于各类红外天文、气象卫星的探测中[1-2]。

器件探测率D^*受读出电路积分时间、黑体辐射源温度、器件工作温度与噪声的影响。其中，D^*大小与积分时间平方根成正比。在长波到甚长波波段（10～16 μm）中，背景辐射通量显著增大，导致探测器的动态范围减小。当积分时间过长时，像元可能达到饱和状态，限制了探测率的提升。在常温黑体背景辐射下，受限于读出电路较短的积分时间，使探测器的探测率难以有较大的提高。而在低温背景条件下，由于背景辐射的降低，增加积分时间能够有效提高探测率。

器件工作温度变化对长波碲镉汞探测器的暗电流大小的影响更为显著。较大的暗电流不仅限制了探测器的有效动态范围，还影响了读出电路的积分时间长短。对于截止波长更长的碲镉汞红外探测器，暗电流的大小决定了器件性能。近年来，随着对p-on-n器件结构暗电流机制的研究与分析，通过结构与组分上的不断改进，器件暗电流得到有效降低[3]。为提高探测率，除了减小探测器接收到的辐射通量以外，还要求降低器件工作时的暗电流大小，以提高输出信号的动态范围并增加读出电路的积分时间。此外，对于器件结构为p-on-n的碲镉汞红外探测器，还需考虑偏置电压大小对探测器D^*的测试数值影响。

本文首先对器件在不同温度下的暗电流大小进行测试，根据探测器所探测目标的谱段，选择在合适的器件工作温度对器件探测性能进行测试。探究了工作温度变化、积分时间大小等测试参数在低温背景下对器件性能参数D^*的影响，并分别给出了器件在常温黑体与低温黑体背景下D^*数值大小。

1 器件信息

工艺中利用液相外延法（Liquid Phase Epitaxy，LPE）进行器件n型吸收层的制备。长波线列碲镉汞器件单元结构为p-on-n平面结，结构示意如图1所示。其像元中心距为56 μm，规格为320元，像元面积为56 μm×56 μm。此外，通过红外光谱仪与液氮杜瓦测试了器件在80 K下的光谱响应曲线如图2所示，器件截止波长为12.3 μm@80 K。

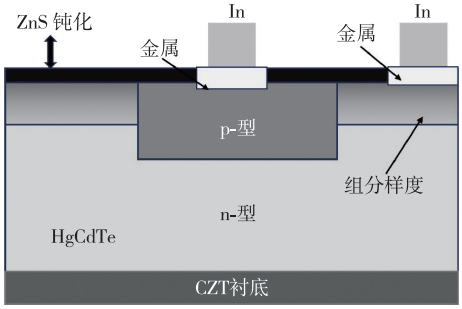


图1 p-on-n型长波碲镉汞器件单元结构示意图

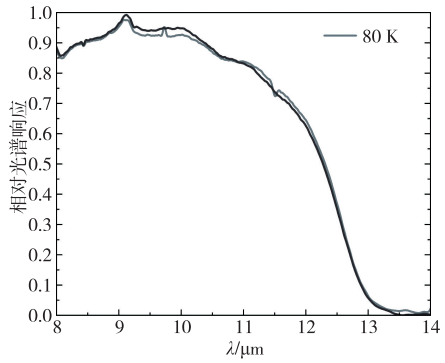


图2 80 K下p-on-n型长波碲镉汞探测器相对光谱响应曲线

2 器件暗电流

暗电流作为探测器的基本参数之一，直接影响探测器的性能，特别是对积分时间的限制。较窄的长波红外光谱通道且微弱的辐射能量导致较大暗电流产生的背景电平占据了较大的探测器动态范围，从而降低了探测器的性能。因此，通过使红外探测器焦平面阵列工作在较低的温度下，以抑制器件的暗电流。在暗电流测试中，采用盲冷屏与防辐射屏相结合的方式，减弱周围辐射对暗电流测试结果的影响。

p-on-n型碲镉汞红外探测器在40～97 K工作温度下的暗电流I_{dark}随偏压V_{RB}的变化关系如图3所示。

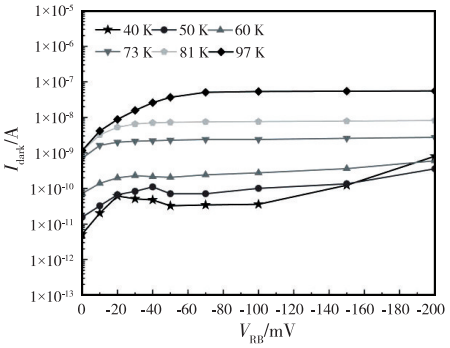


图3 40～97 K下偏压变化对暗电流的影响

从图中可以看出，在工作温度73～97 K范围内，当偏压小于－70 mV后，*I-V*曲线呈平带线性。此时，扩散电流作为器件暗电流的主要成分。由于扩散电流和器件工作温度存在正向温度系数关系，暗电流会随着温度的升高而不断增加。

随着工作温度降低，当工作温度为40～60 K时，暗电流大小随偏压的增加而增大。此时，产生-复合电流、隧穿电流和表面漏电流成为暗电流的主导机制[3]。同时，可以看出同一温度下，暗电流大小在不同偏置电压下差异较大。因此，暗电流与偏置电压的关系曲线可以作为器件在低温黑体背景下性能测试中器件工作条件选择的参考。

3　结果与讨论

3.1　高背景测试

在液氮温度下，对该器件在常温黑体背景下的探测率进行不同偏压条件下的测试。设探测器偏压分别为－80 mV，－150 mV，－200 mV，冷屏*F*数为3.3，滤光片谱段为10.2～11.8 μm，积分电容为2 pF，面源黑体温度分别为293 K和308 K[4-5]。测试结果表明，在常温黑体背景下，探测器的积分时间为60 μs。

如表1所示，受常温黑体辐射通量与液氮温度下器件暗电流较大的影响，读出电路的积分时间被限制在60 μs。在此积分时间下，探测器的偏压对探测率的影响较小，其中当偏压为－150 mV时，D^*达到最大值2.66×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。而在较小偏压和较大偏压下D^*仍可达到2.39×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}以上。

表1　77 K下探测率与器件偏置电压变化关系

V_{RB}/mV	D^*/(cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1})
80	2.39×10^{11}
150	2.66×10^{11}
200	2.50×10^{11}

因此，对于该p-on-n型碲镉汞红外探测器，在积分时间60 μs下器件探测率达2.7×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，偏置电压为－150 mV是器件工作时最优的电压偏置条件。

3.2　低背景测试

低背景测试与高背景测试的主要区别在于，低背景测试中黑体温度低于室温，为了减少辐射光通量，黑体需要置于真空腔体内，并通过制冷机对其进行制冷。同时，结合冷屏、滤光片、防辐射屏等装置实现实验所需的低背景测试条件。高性能的长波红外探测器需要降低工作温度，以保持较低的暗电流水平。因此，结合不同工作温度下器件暗电流水平，进行低背景下对碲镉汞红外探测器探测率的测试。当器件工作温度分别为47.5 K，58 K，80 K时，获得了D^*在不同工作温度下与读出电路的积分时间的关系。通过对不同器件工作温度下的探测率进行对比，最终获得了器件探测率最优值的工作条件参数。

在冷屏*F*数为2的滤光片支架上加装工作谱段为10.2～11.8 μm的带通滤光片以给探测器提供稳定的红外辐射。为减少低温面源黑体的辐射通量以外的影响，采用两级冷屏的结构达到减少其他背景辐射的目的[6]。

从器件在不同温度下暗电流随偏压的结果可以看出当工作温度为40 K，50 K，60 K时，暗电流大小在不同偏压大小下存在差异。偏压大小需考虑探测器的工作温度、辐射通量、像元一致性、盲元数量、读出电路积分时间。在低背景下，偏压的不同，暗电流的大小对器件性能影响更为明显。对于长波红外探测器，在低背景下选择偏压大小为－30 mV，可避免较大的偏压会使像元在较长积分时间下快速饱和，从而防止探测器的响应盲元数量迅速增加。

在测试过程中，低温黑体辐射源温度低于300 K，此时探测器接受的辐射通量较低。此外，为使输出信号有足够的信噪比，还需确保探测器在工作温度下的光电流远大于暗电流。同时，受器件的工作温度对暗电流大小的影响，较大的暗电流限制探测器输出信号的动态范围，导致读出电路的积分时间减小[7]。

通过测试与计算得到探测率随器件工作温度的变化，数据如表2所示。由表2知，当温度降低至47.5 K时，积分时间增加到660 μs；当温度为58 K时，积分时间为500 μs；而当工作温度提高至80 K时，积分时间减小到100 μs。

表2　探测率随工作温度的变化

工作温度/K	积分时间/μs	D^*/(cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1})
47.5	660	1.0×10^{12}
58	500	6.0×10^{11}
80	100	2.82×10^{11}

当器件工作温度47.5 K时，黑体温度分别为155 K和185 K。图4为47.5 K时探测率在不同积

分时间下的统计直方图。从图中可得，该长波p-on-n型碲镉汞红外探测器的探测率可达1.0×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。由于测试采集系统的噪声较大与测试平台制冷振动带来的影响，探测器噪声值并未有效降低，造成在较长积分时间下，D^*不再随积分时间的增加而提高。从探测率分布图可得，在500和660 μs积分时间下，探测率的分布具有较好的正态分布特征；而在短积分时间下，由于部分像元未达到半阱状态，探测率的分布较为集中且正态特性较好。

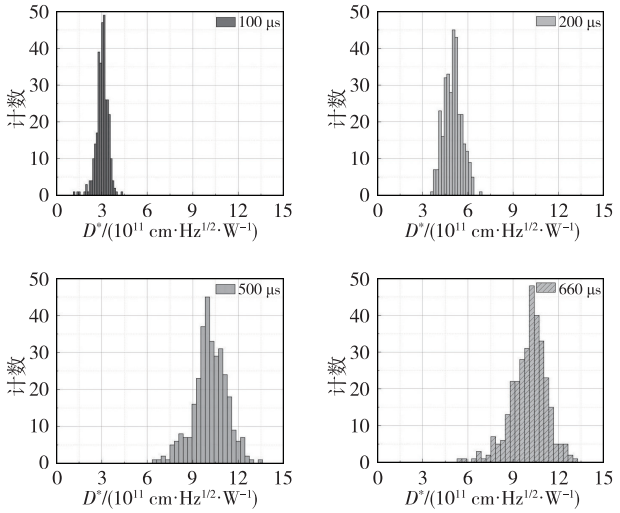


图4 47.5 K下长波红外焦平面探测率直方图

当器件工作温度58 K时，黑体温度分别为173 K和193 K。由图5可知，当温度为58 K时，积分时间由47.5 K时的660 μs减小至500 μs，但此时D^*仅为6.0×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，这是源于工作温度的升高导致器件的暗电流增加与截止波长变小[8-9]。

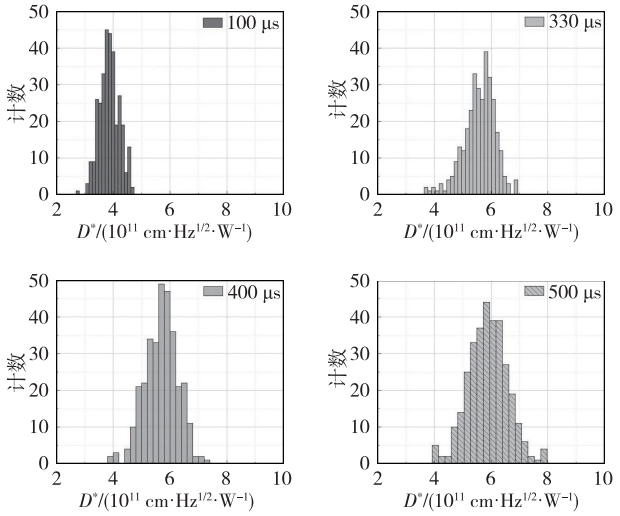


图5 58 K下长波红外焦平面探测率直方图

通过对比探测器分别在47.5 K和58 K的探测率统计分布直方图可得，当工作温度降低至47.5 K时，器件暗电流随工作温度减小而减小，且减小幅度较小。尽管探测器的积分时间增加至660 μs，但探测率仍为1.0×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，此时探测器性能达到峰值。

当器件工作温度为80 K时，黑体温度分别为183 K和193 K。由图6可知，在器件工作温度为80 K时，低背景下器件探测率相比高背景下有所增大。此时受器件暗电流较大的影响，与高背景下探测率数值相比，器件的探测性能并未得到提升。当器件工作温度为80 K时，低背景下探测率约为3.0×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，与表1中反向偏压为150 mV，D^*约为2.66×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}相比，探测率数值有所增加。探测率相比，探测性能未有实质性提高。因此，降低器件工作温度以抑制暗电流，并减少背景辐射通量以增加探测器的积分时间，探测器的探测性能将得到提高。

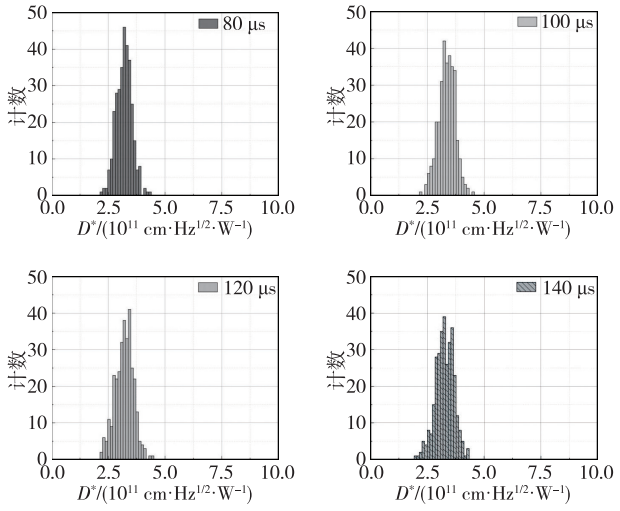


图6 80 K下长波红外焦平面探测率直方图

从器件测试结果可得，当工作温度约为47.5 K时，积分时间660 μs，此时探测器的探测率D^*在低背景条件下能够达到1.0×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}；而在高背景下，工作温度约为80 K，积分时间60 μs，探测率量级约1.0×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。因此，在低背景下与高背景相比，探测器的D^*提高约10倍。

4 结论

为评估p-on-n型碲镉汞红外探测器的性能参数，本文通过研究在高背景、液氮温度与低背景、极低温度下的性能指标探测率与积分时间的关系。

在不同工作温度下的测试结果表明，p-on-n型器件的暗电流处于一个较低的水平。在低背景下，随着工作温度升高，探测率有所降低，但器件仍具有较好的探测性能。当工作温度为47.5 K时，器件D^*值相比常温黑体背景下的1.0×10^{11} cm•Hz$^{1/2}$•W^{-1}提高了约1个数量级，这表明在低背景条件下探测器具有较好的探测性能，体现了p-on-n长波碲镉汞红外探测器在低背景下工作性能的优异性。

参考文献：

[1] 甄　政，王英瑞，欧　文，等. 一种新型红外多波段低背景探测技术[J]. 红外与激光工程，2020，49(5)：20190361.
Zhen Zheng，Wang Yingrui，Ou Wen，et al. A novel technology on infrared multi-band low-background detection [J]. Infrared and Laser Engineering，2020，49(5)：20190361.

[2] 丁瑞军，杨建荣，何　力，等. 碲镉汞红外焦平面器件技术进展[J]. 红外与激光工程，2020，49(1)：93-99.
Ding Ruijun，Yang Jianrong，He Li，et al. Development of technologies for HgCdTe IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering，2020，49(1)：93-99.

[3] Li X，Wang X，Lin C，et al. Analysis of temperature dependent dark current mechanisms for long-wavelength infrared p-on-n HgCdTe detectors[J]. Semiconductor Science Technology，2021，36(5)：055022.

[4] 刘　冰，王　杰，董建婷. 512×6TDI长波红外探测器成像系统参数测试研究[J]. 半导体光电，2016，37(3)：430-435.
Liu Bing，Wang Jie，Dong Jianting. Parameters test of long wave infrared imaging system based on 512 × 6 TDI detector [J]. Semiconductor Optoelectronics，2016，37(3)：430-435.

[5] 张淏洋，陈洪雷，丁瑞军. 一种改进型天文应用低噪声红外探测器读出电路结构设计[J]. 半导体光电，2019，40(3)：328-332.
Zhang Haoyang，Chen Honglei，Ding Ruijun. An improved design of ROIC for ultralow noise infrared detector [J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(3)：328-332.

[6] 石学虎，武晓阳，王英瑞. 国外低背景红外冷舱测试系统综述[J]. 电光与控制，2013，20(3)：53-56.
Shi Xuehu，Wu Xiaoyang，Wang Yingrui. Summarization of testing systems for low-background infrared cryogenic chamber [J]. Electronics Optics & Control，2013，20(3)：53-56.

[7] 曾戈虹. p-on-n HgCdTe红外探测器机理分析与性能计算[J]. 红外技术，2013，35(5)：249-258.
Zeng Gehong. Fundamentals of p-on-n HgCdTe infrared detectors and their detectivity calculations [J]. Infrared Technology，2013，35(5)：249-258.

[8] 熊伯俊，邹　雷，杨超伟，等. 长波p-on-n碲镉汞红外焦平面器件高温工作性能[J]. 红外与毫米波学报，2022，41(4)：672-677.
Xiong Bojun，Zou Lei，Yang Chaowei，et al. High temperature performance of long-wave p-on-n HgCdTe infrared focal plane detector [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves，2022，41(4)：672-677.

[9] 余　菲，任栖锋，李素钧，等. 低温背景下红外焦平面阵列的噪声分析[J]. 红外与激光工程，2017，46(3)：67-72.
Yu Fei，Ren Qifeng，Li Sujun，et al. Analysis of noise for infrared focal plane array in low temperature background [J]. Infrared and Laser Engineering，2017，46(3)：67-72.

作者简介：

魏佳欣(1999—)，男，陕西省咸阳市人，硕士研究生，研究方向为长波碲镉汞红外探测器在低背景下的测试与分析；

林　春(1973—)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事碲镉汞p-on-n红外焦平面、高温工作红外焦平面、探测器低频噪声、天文红外焦平面的制备与表征等方面的研究。