

文章编号: 1672-8785(2019)11-0023-06

红外焦平面探测器的暗电流测试 分析及性能研究

王晓龙 李冬冰 张兴胜

(中国电子科技集团第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 针对碲镉汞红外焦平面探测器, 研究了两种暗电流测试方法。降低暗电流直接关系到探测器的信噪比。对所研制的碲镉汞光伏探测器在工作条件下的暗电流大小进行了测试分析。通过对比多组测试结果发现, 工作温度及工艺对暗电流具有不同程度的影响。该研究为以后改进工艺和提高探测器性能及筛选效率提供了理论依据。

关键词: 红外探测器; 焦平面阵列; 暗电流; 碲镉汞

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.11.005

Study on Dark Current Test and Device Performance of Infrared Focal Plane Detector

WANG Xiao-long, LI Dong-bing, ZHANG Xing-sheng

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Two dark-current test methods for the mercury cadmium telluride (HgCdTe) infrared focal plane detector are studied. Reducing the dark current is directly related to the signal-to-noise ratio of the detector. The dark current of the developed HgCdTe photovoltaic detector under working conditions is tested and analyzed. By comparing multiple test results, it is found that the operating temperature and process have different degrees of influence on the dark current. This study provides a theoretical basis for improving the process, detector performance and screening efficiency in the future.

Key words: infrared detector; focal plane array; dark current; HgCdTe

0 引言

红外焦平面探测器的发展速度日益加快, 各种特性参数都已成为评判探测器性能的指标。其中, 暗电流是红外探测器的固有因素^[1]。通过减小暗电流可以有效提高器件性

能。由于红外焦平面探测器产生的光电流信号都是经读出电路转换成电压输出信号的, 直接测量器件每个探测元的暗电流显得比较复杂^[2]。目前, 我们一般采用盲冷屏测量红外探测器的暗电流。由于周期较长, 无法进行批量

收稿日期: 2019-08-29

作者简介: 王晓龙(1996-), 男, 北京人, 学士, 主要研究方向为红外探测器的性能评价与测试。

E-mail: 570184919@qq.com

测试。本文从测试的角度来分析暗电流对器件性能的影响,并通过对比国外器件水平对工艺和结构提出要求。

1 暗电流

1.1 暗电流机制

暗电流主要由直接隧穿电流、扩散电流、产生-复合电流、陷阱辅助隧穿电流和表面漏电流叠加而成^[3]。探测器的工作环境温度是暗电流的主要影响因素。其中,温度对暗电流信号和涨落噪声的影响起主要决定作用。暗电流随温度的升高而增大,所以减小暗电流噪声的有效方案是使器件保持在稳定的低温环境中工作^[4]。

1.2 暗电流测试方法

本文通过盲冷屏测试(无背景辐射)和数据计算(有背景辐射)两种方式得到了被测器件的暗电流。

1.2.1 盲冷屏测试(无背景辐射)

通过在芯片前加装盲冷屏,使后者与探测器达到一样的工作温度(≤ 90 K)。该温度下,辐射产生的信号比暗电流信号小数个量级。我们把这种情况下的暗电流称为无背景辐射暗电流^[5]。

按照图 1 连接测试系统。由控制模块调好偏置电压与工作脉冲,使探测器正常工作。在同一背景(盲冷屏)下,分别测出不同积分时间的输出电平。根据式(1)算出暗电流:

$$I_a = |V_{S1} - V_{S2}| \cdot C / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中, I_a 为探测器的暗电流(nA/pixel/s); t_1 和 t_2 均为积分时间(s); V_{S1} 为 t_1 下的输出电平(V); V_{S2} 为 t_2 下的输出电平(V); C 为积分电容(F)。

1.2.2 数据计算方法(有背景辐射)

在正常的积分时间下,通过测试数据计算出背景辐射产生的信号,并将剩余的信号作为暗电流产生的信号。

按照图 1 连接测试系统。由控制模块调好偏置电压与工作脉冲,使探测器正常工作。在同一积分时间下,分别测出不同黑体辐射温度下的输出电平。然后将偏置电压调为零,测得电路本底电压,并根据式(2)和式(3)计算出暗电流:

$$W(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/2\lambda T} - 1)} \quad (2)$$

$$N(\lambda, T) = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda \cdot F \times A_d \cdot t \cdot \lambda / (hc) \quad (3)$$

式中, N 为光子数(ph); $W(\lambda, T)$ 为黑体辐射功率密度($W \cdot cm^{-3} \cdot sr^{-1}$); λ 为波长(cm); λ_1 为探测器的前截止波长(cm); λ_2 为探测器的后截止波长(cm); T 为黑体温度(K); $\Delta\lambda$ 为探测器的响应波长步长(cm); F 为探测器像元的立体视场角(sr); A_d 为探测器单个像元的有效光敏面积(cm^2); t 为探测器的积分时间(s); h 为普朗克常数($6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$); c 为光速($3 \times 10^{10} cm/s$); K 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$)。

在面源黑体辐照下,探测器的背景温度 T 上升时,其输出信号电压 $V(T)$ 为

$$V(T) = V_b(T) + V_a(T) + V_d \quad (4)$$

正常测试中会采集低高温下的 $V(T_1)$ 和 $V(T_2)$ 。假设从 T_1 升至 T_2 时,量子效率不发生改变,则

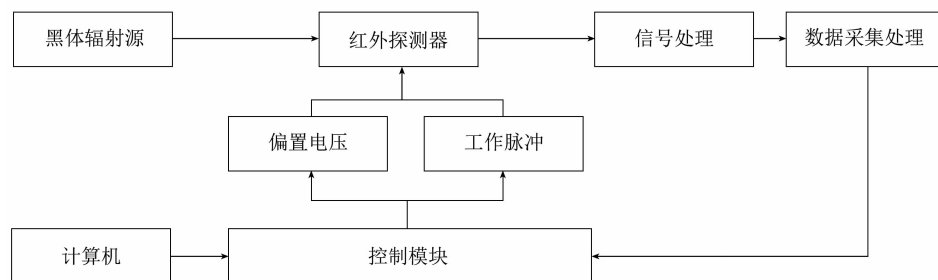


图 1 测试系统框图

$$\frac{V_b(T_1)}{V_b(T_2)} = \frac{N(\lambda, T_1)}{N(\lambda, T_2)} \quad (5)$$

从 T_1 升至 T_2 时, 暗电流产生的微小变化可以忽略不计, 则

$$V_b(T_1) = \frac{V(T_2) - V(T_1)}{\frac{N(\lambda, T_1)}{N(\lambda, T_2)} - 1} \quad (6)$$

$$V_a = V(T_1) - \frac{V(T_2) - V(T_1)}{\frac{N(\lambda, T_1)}{N(\lambda, T_2)} - 1} - V_d \quad (7)$$

$$I_a = \frac{6.25 \times 10^{18} V_a \cdot C}{t} \quad (8)$$

式中, V_a 为暗电流电压(mV); V_b 为背景电压(mV); V_d 为电路本底电压(mV)。

2 实验数据分析

2.1 测试结果比较

我们分别采用方法 1 和方法 2 对不同波长的探测器进行了测试(结果见表 1 和表 2)。

从表 1 和表 2 中可以看出, 两种情况下的暗电流测试结果之间有一定差距。国外研究资料认为, 300 K 的背景辐射会影响 HgCdTe 红外探测器的优值因子 R_0A , 尤其是在探测器自

身性能较好的情况下^[6-7]。究其原因, 一方面是因为背景辐射在器件的光吸收层产生大量的载流子, 而这些过剩的载流子扩散至 pn 结的空间电荷区两侧进行积累, 使 pn 结的有效结面积发生变化, 从而改变器件原本的电学特性; 另一方面, 探测器的量子效率会随着引入光电流的大小变化而改变, 这也会影响获得优值因子 R_0A 的准确性。

2.2 国内外暗电流测试结果比较

采用方法 2 测试了一组国产探测器和一组进口探测器的暗电流(工作温度为 77 K)。图 2 和图 3 所示分别为国产和进口探测器的测试结果。其中, 离散点是各波长探测器的暗电流值, 曲线是国外资料中的 n-on-p 探测器暗电流拟合曲线。

从图 2 和图 3 中可以看出, 国产器件的暗电流水平基本与进口器件相当, 只是前者的暗电流一致性差, 具有离散性, 说明其工艺一致性较差。

2.3 国产器件的暗电流测试结果比较

2.3.1 不同温度下的暗电流性能对比

表 1 方法 1 的暗电流测试数据

波长/ μm	像元大小/ μm	工作温度/K	暗电流/(nA/pixel/s)
7.3~8.8	30×30	77	0.286
7.3~9.1	30×30	77	0.507
7.6~9.25	30×30	77	0.325
7.6~9.55	30×30	77	0.5304
7.65~9.75	30×30	77	0.8749
7.45~9.95	30×30	77	1.625
7.45~10.45	30×30	77	2.093

表 2 方法 2 的暗电流测试数据

波长/ μm	$V(T_1)/\text{V}$	$V(T_2)/\text{V}$	电路本底电压/V	暗电流/(nA/pixel/s)
7.3~8.8	2.8087	3.1141	1.681	0.416
7.3~9.1	3.0631	3.4945	1.652	0.624
7.6~9.25	2.4822	2.7152	1.6676	0.39
7.6~9.55	2.8033	3.1203	1.6635	0.6474
7.65~9.75	2.9937	3.3476	1.692	1.0049
7.45~9.95	3.0291	3.3802	1.6845	1.846
7.45~10.45	3.3193	3.7062	1.6930	2.4882

我们采用方法 2 测试了两组不同温度下的器件暗电流性能(结果见图 4 和表 3)。其中,

暗电流盲元是指暗电流大于两倍平均暗电流的像元。

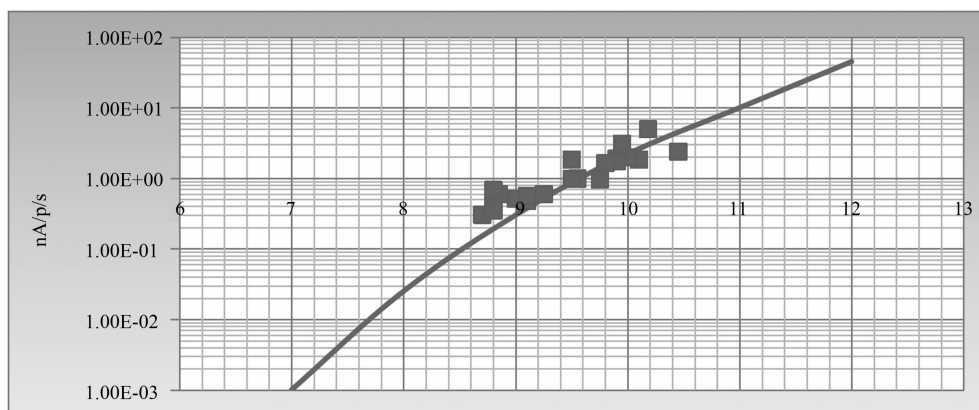


图 2 国产器件的暗电流测试值

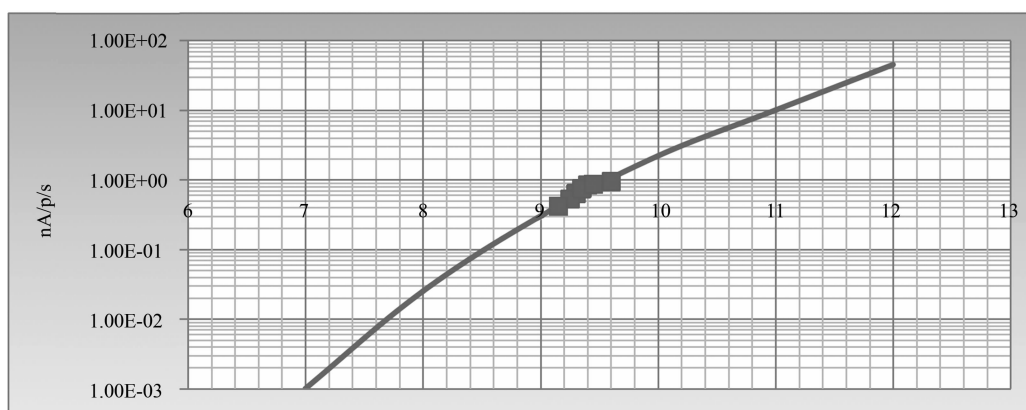


图 3 进口器件的暗电流测试值

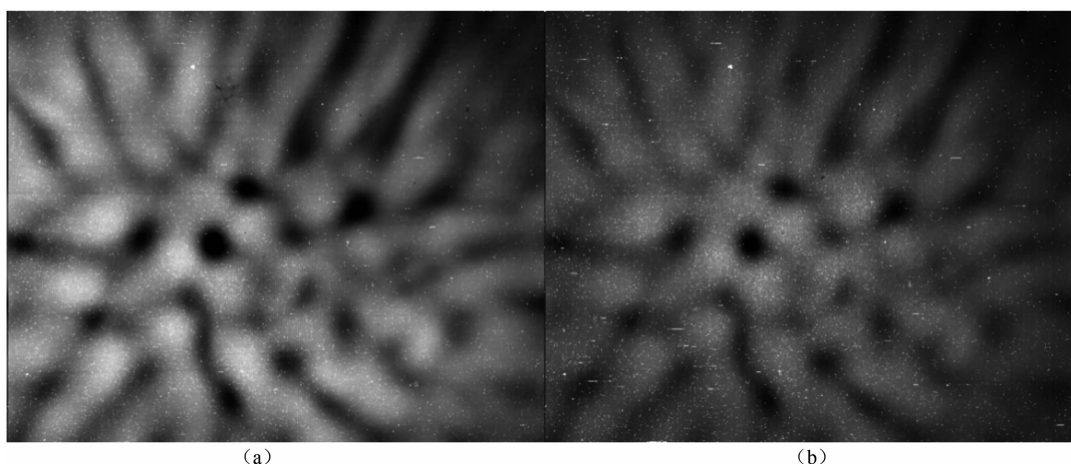


图 4 国产器件的暗电流结果: (a) 65 K; (b) 77 K

表 3 两个温度下的暗电流性能对比

工作温度/K	暗电流/(nA/pixel/s)	暗电流盲元	暗电流非均匀性
65	2.9	1.28%	17.45%
77	34	4.23%	38.32%

图 4(a)和图 4(b)分别为 65 K 和 77 K 下所采集的图像。从中可以明显看出, 65 K 下的白点要少于 77 K 下的, 而白点主要为热盲元, 即由暗电流导致的盲元。通过对两种温度下的暗电流测试结果进行对比, 验证了低温可有效降低暗电流的大小, 进而减少暗电流盲元。

2.3.2 不同工艺状态下的暗电流性能对比

我们测试了一种关键工艺两个状态下的器件暗电流性能, 即采用方法 2 得到了图 5 所示的两个状态下的暗电流图。表 4 列出了两个状态下的暗电流性能对比情况。

图 5(a)和图 5(b)分别为背减薄工艺下以及非减薄时所采集的图像。从中可以看出, 背减薄后的白亮点要多于非减薄时的。由表 4 可知, 两种状态下的平均暗电流没有明显差异, 即暗电流盲元的增多是由背减薄工艺造成的。结果表明, 暗电流的大小主要与温度有关, 且背减薄工艺会导致热噪声增大, 进而增加暗电流盲元。

从试验结果中可以看出, 暗电流和暗电流盲元主要与工作温度有关; 器件减薄工艺主要

影响暗电流盲元的个数, 对平均暗电流影响不大。通过数据积累有助于提出使用时对器件工作温度及工艺的要求。

3 实际应用分析

在使用某长波红外器件时发现其噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 较差, 不能使用长积分时间。由于该器件无法进行盲冷屏暗电流测试, 我们采用方法 2 对测试数据进行了分析 (结果见表 5)。

从表 5 中可以看出, 暗电流远大于光电流是造成该器件 NETD 较差的主要原因, 但这只是数据计算结果。利用式 (2) 可以算出 293 K 下的辐射光子数 ($4.2 \times 10^{15} / \text{cm}^2 / \text{s}$), 并得到量子效率约为 23.5%。通过查阅国外器件的量子效率数据 (见图 6) 可知, 后截止波长为 $12.5 \mu\text{m}$ 的红外探测器在 $12.5 \mu\text{m}$ 处的量子效率约为 20%。通过计算 $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 的面积, 得到国外器件在 $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 范围内的平均量子效率约为 30%。由于这种国产长波红外探测器在 $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 波段是通过滤光

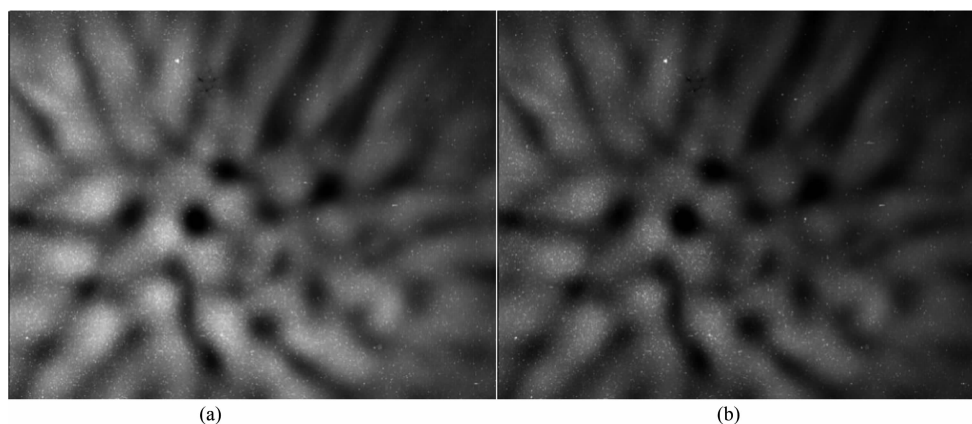


图 5 国产器件的暗电流图: (a) 背减薄; (b) 非减薄

表 4 两个状态下的暗电流性能对比

工艺	平均暗电流/(nA/pixel/s)	暗电流盲元	暗电流非均匀性
减薄	35.5	2.68%	36.45%
非减薄	34.2	1.28%	38.32%

表 5 某长波红外器件的暗电流测试数据

参数	波长/ μm	暗电流/(nA/pixel/s)	光电流(293 K)/(nA/pixel/s)	暗光比	工作温度/K
数值	11.5~12.5	8.21	2.12	3.87	60

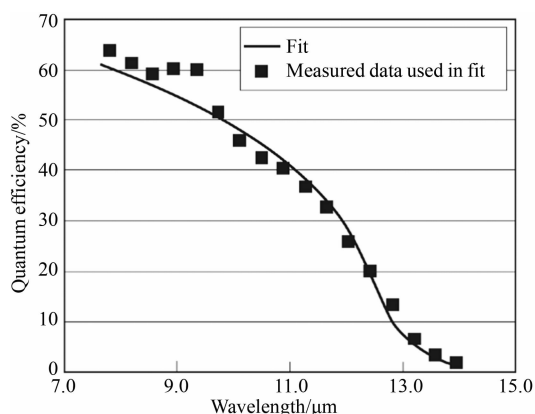


图 6 国外 12.5 μm 器件的量子效率

片截止的, 且该滤光片的透过率为 82%, 因此在去除滤光片的影响后, 发现其量子效率目前与国外相当, 并没有太大差别。

结果表明, 通过提高量子效率来改善 NETD 是很难实现的。所以只有通过减小暗电

流来提高器件的 NETD。从前面的结果来看, 在目前的工作温度及工艺状态下, 国产器件的电流水平与国外相比没有太大差距。想达到理想 NETD 的最快方式就是降低工作温度。表 6 列出了通过计算得到的满足性能要求所需的工作温度。

4 结束语

通过暗电流测试对比, 得到了暗电流的基本数据。对比了国内外器件的差异, 并分析了温度和工艺对暗电流的影响。一般情况下的器件暗电流评估仍具有较高的参考价值, 可为实际器件应用作出指导。本文没有对各个温度点的暗电流进行计算分析, 后续将在试验中总结数据, 完善各个波长和各个温度点的暗电流数据; 整理国外的暗电流数据, 对比国内外器件在各状态下的暗电流差异。

表 6 在 53 K 的暗光比条件下可满足总体 NETD 要求的器件参数

波长/ μm	暗电流/ (nA/pixel/s)	光电流(293 K)/ (nA/pixel/s)	暗光比	工作温度/K
11.5~12.5	2.21	2.17	1.02	53

参考文献

- [1] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, et al. Dark Currents in Long Wavelength Infrared HgCdTe Gated Photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, **33**(6): 621–629.
- [2] 毛京湘, 舒畅, 王晓娟, 等. 红外焦平面探测器暗电流计算 [J]. *红外技术*, 2016, **38**(3): 236–238.
- [3] 史衍丽. 垂直 p-n 结的碲镉汞光伏探测器暗电流特性分析 [J]. *红外技术*, 2006, **28**(8): 474–477.
- [4] 雍朝良, 段东, 许春, 等. 红外探测器暗电流测试方法研究 [J]. *红外技术*, 2012, **34**(4):

196–199.

- [5] Rogalski A. HgCdTe Infrared Detector Material: History, Status and Outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, **68**(10): 2304–2313.
- [6] Rosbeck J P, Kasai I, Hoendervoogt R M, et al. High Performance Be^+ Implanted InSb Photodiodes [C]. Washington, DC: 1981 International Electron Devices Meeting, 1981.
- [7] Rosbeck J P, Starr R E, Price S L, et al. Background and Temperature Dependent Current Voltage Characteristics of HgCdTe Photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, **53**(9): 6430–6440.