文章编号:1001-5078(2019)07-0871-05

· 红外材料与器件 ·

碲镉汞红外探测器量子效率计算研究

王 亮,杨 微

(华北光电技术研究所,北京100015)

摘 要:首先分析了量子效率计算的相关方法,然后分析红外碲镉汞探测器测试过程。对器件进行电学性能测试及光谱响应测试基础上,利用测试方法和测试数据计算出探测器产生的电子数。再将实际电子数与理论分析的光子数相比,计算出探测器对不同红外波段量子效率,最高可达66%,达到了国外同类型器件响应的量子效率指标。本文的研究为评价碲镉汞探测器的光电转换性能提供了一种有效的方法。

关键词:碲镉汞;量子效率;电性能测试;光谱响应

中图分类号:TN213 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.07.015

Study on the quantum efficiency calculation of HgCdTe infrared detector

WANG Liang, YANG Wei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: First, the method of quantum efficiency calculation is analyzed in the paper. Then, the test process of MCT detector is analyzed. Based on the test results of electrical parameters and spectral response of the device, the number of electrons produced by the detector is calculated by the test method and test data. By comparing the actual electronic number with the theoretical photon number, the quantum efficiency of infrared detector for different brands is calculated, which can be up to 66 %, reaching the quantum efficiency index of the response of the same type of devices abroad. This study provides an effective method for evaluating the photoelectric conversion performance of HgCdTe detector.

Key words: HgCdTe; quantum efficiency; electrical performance test; spectral response

1 引 言

20世纪70年代中期,美国提出了基于碲镉汞 (HgCdTe)的焦平面列阵(Focal Plane Arrays,FPA) 概念以来,红外成像技术的发展突飞猛进。碲镉汞 这种赝二元系材料具有带隙可调、光学吸收系数大、 载流子寿命长、电子迁移率高等特点,多年来一直是 制备红外探测器的首选材料^[1],也是第三代红外探 测器发展方向中必不可少的研制材料。

对于红外焦平面探测器组件整体结构而言,量

子效率曲线是衡量探测器光电转换性能的一个重要 指标,通过研究探测器组件的量子效率,可以为探测 器结构优化设计提供相关依据,达到更好的使用效 果,提高探测探测距离和识别能力。

国外较早地对碲镉汞器件的量子效率曲线开展 了研究工作,国外资料表明,碲镉汞量子效率曲线通 常的测试方法为将光谱测试仪在相同条件下对已经 定标的标准探测器和碲镉汞探测器进行测试,测试 流程如图1所示。

作者简介:王 亮(1986-),男,工程师,主要从事红外探测器测试及评价研究。 收稿日期:2018-12-28;修订日期:2019-03-11



图1 标准红外量子效率测试流程

Fig. 1 Standard infrared quantum efficiency test procedure

首先,标准检测器接收光谱测试仪出光口位置 相应波段的辐射光子数,产生对应波段的电子数。 通过测试得到各波段的电子数和定标的量子效率曲 线可以计算得到出光口不同波段辐射光子的真实数 值。然后通过移动平台将待测探测器移动到出光口 位置进行测试,得到待测探测器不同波段的电子数, 通过对比波段电子数和采用标准检测器计算得到的 波段辐射光子数可以得出待测探测器的量子效率 曲线。

由于国外对红外探测器标定的严格限制,禁止 将被标定的红外探测器出售给中国,所以直接测试 方法在国内难以实现。国内相关机构通过建立了很 多间接测试方法对碲镉汞组件件量子效率曲线进行 研究,研究工作也取得了一定的进展。本文以实际 研制的碲镉汞红外中波探测器为基础,通过量子效 率计算的方法介绍、器件测试及测试数据的综合计 算,得到了器件的量子效率曲线,可客观地评价器件 的光电转换性能^[2-3]。

2 方法介绍

量子效率是描述光电转换能力的一个重要参数,它是某一特定波长下单位时间内产生的平均光 电子数与入射光子数之比,因此量子效率曲线为光 子谱曲线。本文介绍的量子效率曲线测试方法为间 接法,相比与其他的间接方法,本方法采用的标准检 测器为光谱响应在1~10 μm 谱段内各波谱响应度 相对一致的热释电探测器,此类检测器可以提高量 子效率曲线的准确度

首先介绍直接法和间接法的差别。直接法中对 检测器进行了定标,检测器的光电转换效率是已知 的,先用已标定的检测器得出光源入射到探测器的 光子数,然后对探测器测试得到探测器产生的光电 子数,所以量子效率曲线可以直接得到。而间接法 中的检测器没有被标定过,光电转换效率是未知的。 通常我们得到的检测器曲线为光谱曲线(能量谱曲 线),所以求得的碲镉汞探测器的相对光谱曲线也 是能量谱曲线。为了得到碲镉汞量子效率曲线,我 们需要将相对光谱曲线转换成相对光子谱曲线,然 后计算量子效率曲线。

间接法中,第一步需要求出碲镉汞相对光谱曲 线。而相对光谱曲线的准确性是由检测器光谱曲线 决定的。

本方法建议采用的标准检测器为 GaF₂ 或 KRS 5红外热释电探测器。这两种热释电探测器在 1~10 μm 红外波段均有良好的波段响应一致性,该 一致性是测量碲镉汞器件量子效率曲线准确性的前 提和必要条件。热释电曲线如图 2 所示。



Fig. 2 Pyroelectric spectrum curve

通过调研发现很多型号的检测器在相同谱段产 生的响应信号是有差异的,该差异将导致碲镉汞探 测器相对光谱曲线不准确,如图3所示。

检测器的作用是用于校准不同谱段的光源能量,如果检测器在不同谱段接收相同能量而产生 不同的信号,且该检测器的光谱响应曲线还是未 被标定的,那么用该检测器测试碲镉汞探测器的 相对光谱曲线与绝对碲镉汞曲线是有一定偏差 的。本方法中采用的检测器虽然未被标定,但是 良好的波段响应一致可以提高量子效率曲线的准 确性。

在求得碲镉汞相对光谱响应曲线后,第二步需 要将光谱响应曲线转换成光子谱曲线。





Fig. 3 Detector spectrum curve

根据公式,波段能量谱和波段光子数存在以下 关系:

$$p = \frac{hc}{\lambda} \tag{1}$$

式中, p 为单光子能量; h 为普朗克常数, $h = 6.626176 \times 10^{-34}$ J·s; c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s; λ 为波长。

$$N = \frac{E}{p} = \frac{E\lambda}{hc}$$
(2)

式中, E 为单位波段黑体辐射能量; N 为单位波段能量在波段下的光子数。

由式(2)可知,单位波段黑体辐射能量一定时, 随着波长的增加,黑体辐射的光子数线性增加。所 以当单位波段辐射光子数一定时,单位波段辐射的 能量与波长成反比。所以利用式(2)可以将相对光 谱曲线转换成光子谱曲线。

第三步求碲镉汞探测器的量子效率。

由红外探测器量子效率的定义可知,探测器的 量子效率可通过探测器测试得到的电流转换成光电 子数与探测器接收的光子数比值得到:

$$QE(e) = N_{\underline{k}\underline{w}} / N_{\underline{a}\underline{b}}$$
(3)

由于碲镉汞红外探测器以电压形式输出,通过 公式(4)可以求出 N_{接收}。

$$N_{\dot{k}\psi} = UC/e \tag{4}$$

式中,U为探测器输出信号;C为读出电路积分电容;e为单电子电荷量。

碲镉汞红外探测器研制完成后,通过面对两个 不同的黑体温度得出不同黑体温度的输出电压 V_{r1} 和 V₁₂,利用公式:

$$U = V_{\rm T2} - V_{\rm T1} \tag{5}$$

通过面对两个黑体测试输出电压然后做差的方 式可以消除探测器杂散光带来的影响。

若求 N_{辐射},将已经求得碲镉汞光子谱曲线归一 化,并得出探测器在各个谱段光子响应的百分比 η_λ。然后利用布朗克黑体辐射公式:

$$I(\lambda, T) = \frac{2 \times h \times c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{h \times c}{\lambda \times K \times T_k}} - 1)}$$
(6)

和探测器测试的相关参数可以得到黑体辐射到 探测器焦面的能量为:

 $E(\lambda,T) = I(\lambda,T) \times \varepsilon \times \text{FOV} \times A_d \times \tau$ (7) 式中,h 为普朗克常数,6.63×10⁻³⁴ J·s;c 为光速, 3×10⁸ m/s;K 为玻耳兹曼常数,1.38×10⁻²³ J/K; A_d 为被测像元光敏面积,cm²; τ 为探测器的积分时间, s; ε 为黑体辐射率;FOV 为探测器组件的视场角,sr。

同时根据式(2),可以将黑体辐射能量转换成 黑体辐射光子数。

将探测器光谱范围内的黑体辐射光子数乘得光 子响应的百分比 η_λ并求积分得出探测器在该黑体 温度时接收的总光子数。

$$N(T) = \int_{\lambda_{\rm on}}^{\lambda_{\rm off}} \frac{E(\lambda, T) \cdot \lambda}{hc} \times \eta_{\lambda} d\lambda$$
(8)

所以,N_{辐射}用下列公式可得:

$$N_{\text{figh}} = N(T_2) - N(T_1)$$
(9)

将归一化光子谱个点的百分比乘以 QE(e),即 为量子效率曲线。

3 实 验

将研制的碲镉汞中波探测器芯片装配金属杜瓦 后进行电学性能测试,包括信号电压测试及光谱响 应测试等,测试原理图如图4所示。



图 4 测试原理流程图 Fig. 4 Flow chart of test principle

测试系统给探测器提供必要的偏置和时钟,然 后将探测器接收黑体辐射产生的电压信号采集。探 测器芯片接收黑体辐射外,还接收探测器窗片辐射 和冷屏辐射,如图5所示。



图 5 芯片接收热辐射分类 Fig. 5 Classification of chip receiving thermal radiation

窗片辐射和冷屏辐射产生的信号将影响量子效 率计算精度,需要去掉此无效信号。由于此信号为 固定值,改变黑体温度时,此信号不变,可以采用温 差方法消除冷屏辐射和窗片辐射产生的信号,即采 集两个不同黑体温度的输出电压进行做差。具体测 试参数和结果如表1所示。

表1 测试参数和结果

Tab. 1 Test parameters and results

测试条件		芯片参数	
积分时间/ms	3	像元尺寸/μm	30×30
黑体温度/K	低温(293±0.003), 高温(308±0.003)	响应波段/μm	0.8~5
芯片 F 数	F/2	读出电路积 分电容/pF	2.1
黑体辐射源的 发射率/%	≥96	293K 信号/V 308K 信号/V	2.205 2.786
探测器与黑体辐 射面之间的距离	≤20 mm,保证 探测器均匀辐照	308~293K 信号/V	0.581

利用傅里叶光谱仪对中波探测器芯片进行相对 光谱响应测试,测试曲线如图6所示。



图 6 中波碲镉汞芯片光谱响应测试曲线 Fig. 6 Spectral response test curve of MW MCT chip

将相对光谱曲线按照式(2)进行光子谱转换并 进行归一化,得到光子谱曲线如图7 所示。



Fig. 7 Normalized photon spectrum curve

4 量子效率计算

根据碲镉汞测试结果,下面对器件的量子效率 进行计算分析。

由上表可知,器件温差信号为 0.581 V。根据 下列公式可计算出探测器产生的光子数。

$$N = \frac{UC}{e} \tag{10}$$

式中,C为器件读出电路的积分电容,为2.1×10⁻¹²F; U为器件温差信号;e为电子电量,为1.6×10⁻¹⁹C;探 测器产生的光电子数为7.625 Me。

通过归一化光子谱数据和式(8)可得出器件接收的黑体光子数为11.525 Me⁻,利用公式可以得出 量子效率为66.15%,该量子效率即为光子谱归一 化后的最高值,所以得出的量子效率曲线如图8 所示。



图 8 不同波段量子效率分布结果



5 结 论

本文在分析碲镉汞红外探测器量子效率计算相 关理论的基础上,通过红外中波器件研制分析和性 能参数测试,利用实际测试数据进行了器件量子效 率的计算分析,为客观地评价碲镉汞红外探测器的 光电转换性能提供了一种有效的方法。

参考文献:

- [1] HE li, YANG Dingjiang, NI Guoqiang. Introduction to advanced focal plane technology[M]. Beijing: National Defense industry Press 2011. (in Chinese)
 何力,杨定江,倪国强.先进焦平面技术导论[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [2] ZHANG Lei, ZHANG Liang, ZHANG Xiaolei, et al. Research on caculation of quantum efficiency of InAs/GaSb type II superlattice IR detectors [J]. Infrared Technolo-

gy,2016,38(4):315 - 318. (in Chinese)

张磊,张亮,张小雷,等. InAs/GaSBⅡ类超晶格红外探 测器量子效率计算研究[J]. 红外技术,2016,38(4): 315-318.

 [3] Antoni Rogaiski. Infrared detectors[M]. 2nd ed. ZHOU Haixuan, CHEN Yunfang, transl. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese) Antoni Rogaiski. 红外探测器[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.