

一种二极管型红外热探测器热学参数的电学等效测试方法

刘超^{1,2}, 侯影^{1,3}, 傅剑宇^{1,2,3*}, 刘瑞文^{1*}, 魏德波^{1,2}, 陈大鹏^{1,2,3}

(1. 中国科学院微电子研究所 集成电路先导工艺研发中心, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 无锡物联网创新中心有限公司, 江苏 无锡, 214028)

摘要: 红外热探测器的热学参数包括热容、热导、热响应时间, 反映了结构信息和器件性能。精确有效地获得这些参数, 对探测器的结构优化与性能评估具有指导意义。二极管型红外热探测器是红外热探测器的主要类型之一。基于二极管型红外热探测器的自热效应, 提出了一种热学参数的电学等效测试方法, 具有测量精度高且实现简单的特点。并对自制的一款二极管型红外焦平面阵列像元进行了测试, 测试结果与理论分析相符, 验证了方法的可行性。

关键词: 红外热探测器; 二极管; 电学等效测试; 热学参数

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

An electrical equivalent test method for thermal parameters of a diode type infrared thermal detector

LIU Chao^{1,2}, HOU Ying^{1,3}, FU Jian-Yu^{1,2,3*}, LIU Rui-Wen^{1*}, WEI De-Bo^{1,2}, CHEN Da-Peng^{1,2,3}

(1. Integrated Circuit Advanced Process R&D Center, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Wuxi Innovation Center for Internet of Things, Wuxi 214028, China)

Abstract: Thermal parameters of infrared thermal detector include thermal capacity, thermal conductance and thermal response time, reflecting the structure information and performance of detector. Accurate and effective measurement of these thermal parameters is important for device performance evaluation and optimization. A diode-type infrared detector is an important infrared detector. Based on the self-heating effect of diode-type infrared heat detectors, an equivalent electrical test method was developed. The method has the advantages of high precision and easy implementation. The pixel of the self-made diode-type infrared focal plane array was tested by this method. The results were in good agreement with the theoretical analysis, and the feasibility of the method was verified.

Key words: infrared thermal detector, diode, electrical equivalent test, thermal parameters

PACS: 07. 57. Kp

引言

红外辐射是一种在自然界普遍存在的电磁波

能量, 一切温度高于绝对零度的物体都会产生该辐射。采集并探测物体的红外辐射, 可以重构物体特

收稿日期: 2019-03-30, 修回日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61601455, 61874137), 北京市科委重点研发计划(Z191100010618005)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61601455, 61874137), the Key R&D Program of Beijing Municipal Science and Technology Commission(Z191100010618005)

作者简介(Biography): 刘超(1993-), 男, 四川广安人, 博士研究生, 主要研究领域为非制冷红外焦平面阵列探测器测试及故障诊断。

E-mail: liuchao@ime.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): fujianyu@ime.ac.cn; liuruiwen@ime.ac.cn

Received date: 2019-03-30, Revised date: 2019-09-12

征,这在军事、工业、医疗等领域有着广泛的应用需求^[1]。根据对红外辐射响应方式的不同,红外探测器有光子探测和热探测两种类型^[2]。其中,红外光子探测器主要基于红外辐射的光电效应,红外热探测器则是利用红外辐射的热效应。红外热探测器由于避免了电子热运动产生的影响,因此可在室温条件下工作,具有质量轻、体积小、功耗小、成本低等特点,现已成为民用及中、低端军用的首选。

红外热探测器根据信号读出方式的不同,又可分为电读出和光读出两类^[3-4],分别通过集成的高信噪比读出电路或非接触式的光路系统检出并显示信号。由于光读出红外热探测器尚存在着结构热串扰、响应不均匀、温控等问题待攻克,当前主流的红外热探测器基本采用电读出技术。电读出红外热探测根据敏感机理的不同可细分为:热敏电阻型、热释电型、热电堆型和二极管型^[5-8]。其中,二极管型红外热探测器以二极管作为红外敏感元件,噪声小、均匀性好、集成度高,是目前红外热探测器研究的热点之一^[9-11]。

热容、热导和热响应时间是二极管型红外热探测器的基本热学参数,不仅反应了探测器的结构信息,同时也直接影响着探测器的响应率和热响应速度。为此,科研人员在研究二极管型红外热探测器的热学参数方面开展了大量工作。Jiang等采用理论计算的方法估算了二极管型红外焦平面阵列单个像元的热容和热导^[12];Eminoglu等使用Coventorware软件仿真了二极管型红外焦平面阵列单个像元的热导和热响应时间^[13];Xu等利用ANSYS软件完成了二极管型红外探测器的三维模型构建,仿真得到了器件的热导^[14]。现有工作主要是通过理论计算或模型仿真来获得器件热学参数,对二极管型红外热探测器的结构设计与性能优化具有指导意义。但由于器件加工会相对于设计引入偏差,同时阵列间也存在着非均匀性,因此研究二极管型红外热探测器热学参数的测试方法对掌握器件的实际性能显得尤为重要。

针对红外热探测器热学参数测试,目前国标中规定了热响应时间的测试方法:利用脉冲激光束垂直照射探测器表面,器件正向压降的上升或下降时间即为探测器的热响应时间^[15]。由于国标中只给出了热响应时间的测试方法,且测试系统复杂,所以研究人员又进一步在此基础上对探测器热学参数测试方法进行了发展。Yeong等根据热敏电阻型

红外热探测器在固定直流偏压下的频率响应,测得了探测器的热容、热导、热响应时间和红外吸收率^[16]。Blanton等针对热电堆型红外热探测器提出了一种在吸收层上引入加热电阻的测试方法,通过加热电阻的焦耳热模拟外界热辐射,获得了探测器的热容、热导和热响应时间^[17]。刘子骥等根据热敏电阻型红外热探测器响应率与调制频率的关系,提出了一种热学参数分析方法,并测得了探测器的热响应时间和热导^[18]。

现有红外热探测器热学参数的测试方法主要集中在研究热敏电阻型和热电堆型红外热探测器的热学参数测试,而对二极管型红外热探测器还未有专门的研究。由于二极管型红外热探测器的核心敏感元件——二极管,其电学性能无论是 $I-V$ 曲线,还是温度灵敏度-温度曲线,均不同于热敏电阻和热电堆,因此难以将已有的热学参数测试方法直接应用于二极管型红外热探测器,故需要结合其电学性能特点研究其热学参数测试方法。

在此,本文首先利用二极管型红外热探测器的自热效应设计了一款测试电路,并基于能量守恒分析了器件热导、热容和热响应时间的测试原理;然后,结合二极管电学特性评估了本电学等效测试方法的测试精度;最后,利用所提出的方法对自制的二极管型红外焦平面阵列单个像元进行了热学参数测试,获得了像元的热容、热导和热响应时间,并将测试结果与理论分析值进行了对比,验证了测试方法的可行性。

1 测试原理

图1给出了二极管型红外热探测器热学参数的测试电路示意图。二极管型红外热探测器通过单

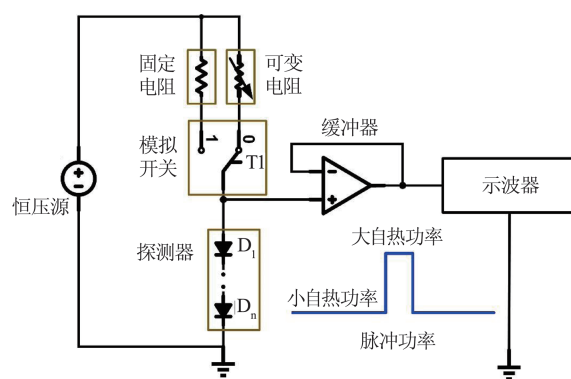


图1 二极管型红外热探测器热学参数测试电路示意图
Fig. 1 The testing circuit schematic of thermal parameters for the diode type infrared thermal detector

刀双掷开关分别与可变电阻和固定电阻串联,并由恒压源供电。外界数字信号控制单刀双掷开关轮流选通可变电阻和固定电阻。可变电阻阻值大,导通时间长,可为探测器提供一长时间的小自热功率;固定电阻阻值小,导通时间短,可为探测器提供一短时间的大自热功率;开关的交替使得探测器获得脉冲功率。探测器在脉冲功率期间,其正向压降变化过程经缓冲器缓冲后由示波器采集。

根据能量守恒,探测器在脉冲功率期间的热平衡过程可以表示为:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G \times \Delta T = P, \quad (1)$$

其中 C 和 G 分别为探测器的热容和热导, P 为探测器的脉冲功率, ΔT 为探测器相对于环境温度的温度变化量, t 为脉冲功率持续时间。

在小自热功率持续期间,因小自热持续时间长,故探测器能达到热平衡状态。此时自热效应产生的热量等于器件热导耗散的热量,由式(1),探测器可获得高于环境温度的初始温度 ΔT_0 , 表示为:

$$\Delta T_0 = \frac{P_0}{G}, \quad (2)$$

其中 P_0 表示探测器的小自热功率。

在小自热功率后的大自热功率持续期间,假设大自热功率 P_1 恒为常量,则将式(1)积分,得:

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{P_1}{G} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right], \quad (3)$$

其中, τ 为探测器的热响应时间,可表示为:

$$\tau = \frac{C}{G}. \quad (4)$$

探测器正向压降变化量 ΔV 与其温度变化量 ΔT 之间,存在关系^[19]:

$$\Delta V = \alpha \Delta T, \quad (5)$$

其中 α 为二极管的电压温度系数。

综合式(2、3、5),并考虑到大自热功率持续时间远小于热响应时间,可得探测器正向压降 V 的一阶泰勒级数展开式为:

$$V = V_0 + \Delta V = V_0 + \frac{\alpha P_0}{G} - \frac{\alpha(P_0 - P_1)}{C} t, \quad (6)$$

其中 V_0 为探测器在环境温度下的正向压降。

根据式(6),斜率 k 与热容存在关系:

$$k = \frac{dV}{dt} = -\frac{\alpha(P_0 - P_1)}{C}. \quad (7)$$

改变小自热功率,则在 $t=0$ 时,两次不同小自热功率 P_{01} 与 P_{02} 情况下,探测器的正向压降 V_{01} 与 V_{02} 之差与热导的关系为:

$$V_{01} - V_{02} = -\frac{\alpha(P_{01} - P_{02})}{G}. \quad (8)$$

通过式(7-8)可分别得到探测器的热容与热导,结合式(4),可进一步获得探测器的热响应时间。

2 误差分析

在测试原理分析中,假设加载在探测器上的大自热功率恒定。在实际测试中,探测器的大自热功率 P_1 与其正向压降有关,可表示为:

$$P_1 = \frac{(V_{dd} - V)V}{R}, \quad (9)$$

其中, R 为固定电阻阻值, V_{dd} 为恒压源电压。

图2为探测器归一化大自热功率与归一化正向压降之间的关系曲线。从图中可以看出:归一化大自热功率与归一化正向压降呈抛物线关系,当正向压降为恒压源电压的一半时,抛物线斜率为零,故可将该点视为理想工作点。

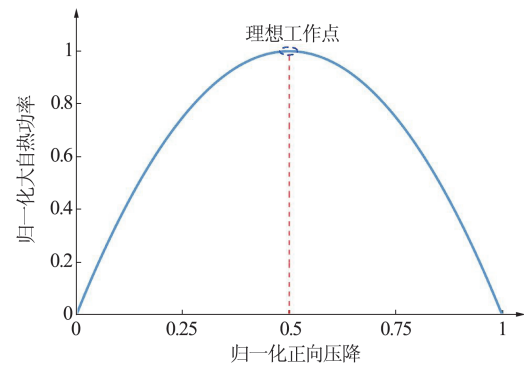


图2 归一化大自热功率与归一化正向压降的理论关系

Fig. 2 Theoretical relationship between normalized self-heating power and normalized forward voltage drop

当探测器工作在理想工作点时,由式(5)可知,由于自热效应,探测器的正向压降会偏离工作点,此时探测器的大自热功率 P_1 变为:

$$P_1 = \frac{V_{dd}^2}{4R} - \frac{1}{4R} \Delta V^2. \quad (10)$$

从式(10)可以看出,由自热效应引起的探测器正向压降变化量 ΔV ,将使得大自热功率为一非恒定值,从而影响测试精度。在测试过程中,大自热功率持续时间将直接影响探测器焦耳热的产生,导致探测器正向压降变化,故大自热功率持续时间是引起大自热功率改变的主要因素。

由式(7)可知,大自热功率会直接影响热容的测量精度,假设探测器热容相对误差 η 为:

$$\eta = \frac{C' - C}{C}, \quad (11)$$

其中 C' 为考虑实际情况后的热容值, C 为理想情况下的热容值。

以探测器的理论热响应时间为标准, 对大自热功率时间进行归一化。同时, 定义正向压降变化率为正向压降变化量与环境温度下探测器正向压降的比值。图3给出了假设探测器的电压温度系数为 8.2 mV/K 时^[20], 探测器的热容相对误差、正向压降变化率与归一化大自热功率时间的关系。从图中可以看出: 大自热功率时间越长, 自热效应越明显, 探测器的正向压降变化越大, 热容的相对误差越大。当归一化大自热功率时间小于5%时, 热容的相对误差小于3.2%。故在测试中将大自热功率时间控制在合适的范围内, 即可保证探测器热容的测试精度。

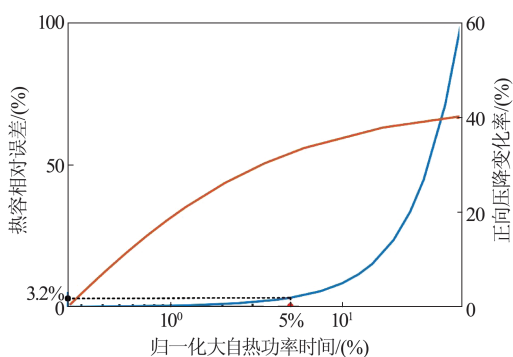


图3 探测器的热容相对误差、正向压降变化率与归一化大自热功率时间的关系

Fig. 3 Relation of the relative error of heat capacity of the detector and the rate of change of forward voltage drop to the normalized big self-heating power time

根据式(8), 探测器热导的误差由探测器的电压温度系数、正向压降和小自热功率决定。由于探测器正向压降和小自热功率均能精确测量, 故热导的误差将主要由电压温度系数的变化引起。根据文献^[21], 单个二极管在恒定偏置电流下的电压温度系数为:

$$\frac{dV_D}{dT} = - \left[V_g + \frac{\beta k T_r}{q} - V(T_r) \right] \frac{1}{T_r}, \quad (12)$$

其中, V_D 为单个二极管的正向压降, V_g 为材料在绝对零度下的禁带宽度(硅为 1.14 V), β 为工艺参数(硅为 3.5), k 为玻尔兹曼常数, T_r 为参考温度, $V(T_r)$ 为参考温度下的单个二极管正向压降。

由式(12)可知, 当 T_r 为室温时, 二极管在室温附

近的电压温度系数近似为常数。例如: 在 $10 \mu\text{A}$ 偏置电流下, 结面积为 $7.4 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$ 的单个二极管电压温度系数理论值为 1.37 mV/K ^[20]。故当探测器自热效应引起的温升较小时, 由本测试方法测得的探测器热导误差可以忽略。

3 测试结果

利用本电学等效测试方法, 我们对自制的一款二极管型红外焦平面阵列像元进行了测试。图4(a-b)分别为二极管型红外焦平面阵列像元的三维结构图与扫描电子显微镜(SEM)照片。该像元主要由敏感区、悬臂梁、框架、吸收层以及锚点组成。内含6个串联PN结二极管的敏感区通过两根悬臂梁与框架相连并悬空。吸收层通过锚点悬空在敏感区上。吸收层吸收外界红外辐射后温度升高, 该温度通过锚点传递至敏感区。敏感区的温度变化使得工作在恒定电流下的串联二极管电压随之变化, 该电压变化由读出电路读出并实现成像。像元尺寸为 $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$, 表1给出了其具体的结构与材料信息。

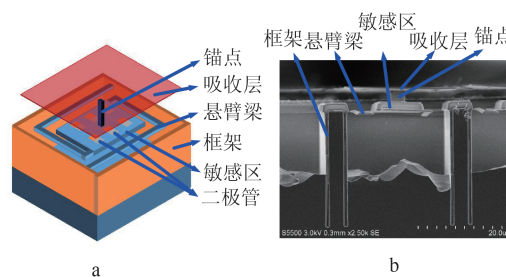


图4 (a) 二极管型红外焦平面阵列像元的三维结构图, (b) 二极管型红外焦平面阵列像元的扫描电子显微镜图
Fig. 4 (a) Three-dimensional structure of diode type infrared focal plane array pixel, (b) The scanning electron micrograph of the diode type infrared focal plane array pixel

表1 二极管型红外焦平面阵列像元的结构尺寸和材料
Table 1 The structure size and material of the diode type infrared focal plane array pixel

	长/ μm	宽/ μm	厚/ μm	材料/ μm
敏感单元	16.5	16.5	1.5	SiO_2, Si
悬臂梁	39	3	1	SiO_2, Al
吸收层	27.5	27.5	0.2	Si_3N_4

将该二极管型红外焦平面阵列置于 2 Pa 的真空环境中, 外接如图1所示的测试电路。其中, 电源电压 V_{dd} 为 10.9 V , 固定电阻阻值为 $200 \text{ K}\Omega$, 选通时间为 $200 \mu\text{s}$; 调节可变电阻阻值分别为 $14.79 \text{ M}\Omega$

和 $10.2\text{ M}\Omega$, 选通时间为 200 ms 。图 5 (a) 为在两个可变电阻情况下, 示波器 (Agilent MSO-X2022A) 采集的二极管型红外焦平面阵列单个像元自热功率和正向压降波形图。图中虚线是小自热功率与大自热功率的组合, 其中大自热功率持续时间为 $200\text{ }\mu\text{s}$ 。实线为在脉冲功率下的响应, 可分为三部分: ①部分表示像元在小自热功率期间达到热平衡阶段, 此时像元正向压降恒定; ②部分表示像元在大自热功率作用下, 从稳态初始温度升温的过程, 此时正向压降随着时间线性变化; ③部分表示像元在小自热功率期间的非热平衡状态。通过该波形, 可获得像元热容、热导以及热响应时间分别为 $1.49\times 10^{-9}\text{ J/K}$ 、 $6.70\times 10^{-8}\text{ W/K}$ 及 22.1 ms 。

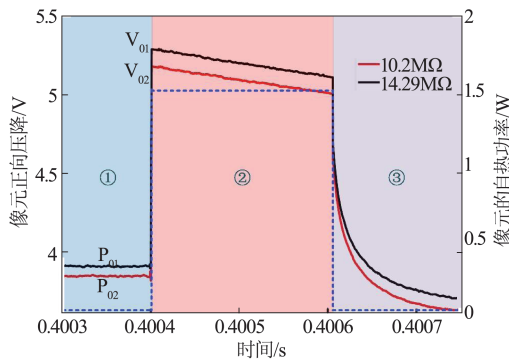


图 5 在不同可变电阻阻值下, 二极管型红外焦平面像元自热功率和正向压降与时间的关系

Fig. 5 Relation of time and self-heating power to forward voltage drop of the diode type infrared focal plane pixel at the different resistance values

图 6 考察了二极管型红外焦平面阵列单个像元热容实测值与大自热功率时间的关系。图中, 当大自热功率时间不大于 1 ms 时, 即小于探测器响应时间的 5% 时, 热容实测值基本保持不变; 之后, 随着大自热功率时间的增加, 热容实测值迅速增大。因此, 与理论分析一致, 短的大自热功率时间有助于保证热容参数测量精度。

图 7 是利用变温探针台 (Suess PA300) 和半导体分析仪 (Agilent B1500A) 测得的像元在恒定偏置电流 ($10\text{ }\mu\text{A}$) 下的正向压降与温度关系曲线。图中: 在室温附近, 像元的正向压降随着温度增高而降低, 且该变化呈线性关系, 斜率表示像元的电压温度系数, 为 -8.8 mV/K 。由此可以看出: 当测试期间像元温度在室温附近变化时电压温度系数为常数, 与理论分析相符。图 8 为二极管型红外焦平面阵列单个像元热导实测值与小自热功率的关系。小自

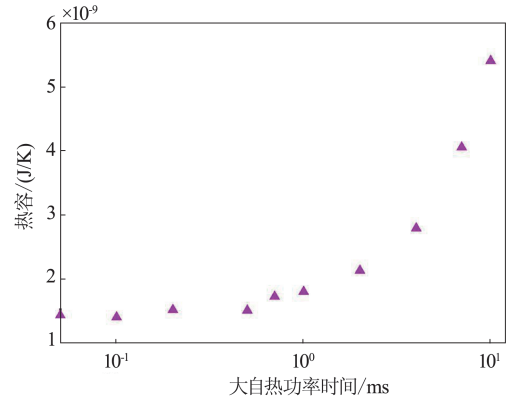


图 6 二极管型红外焦平面像元热容与大自热功率时间的关系

Fig. 6 Relation of thermal capacity to time of big self-heating power of the diode type infrared focal plane pixel

热功率的调节通过改变可变电阻阻值 (从 $14.79\text{ M}\Omega$ 到 $6.63\text{ M}\Omega$) 实现, 由于像元小自热功率引起的温升在室温附近, 电压温度系数恒定, 故如图 8 所示: 热导随小自热功率的增大几乎不变, 这与理论分析相吻合。

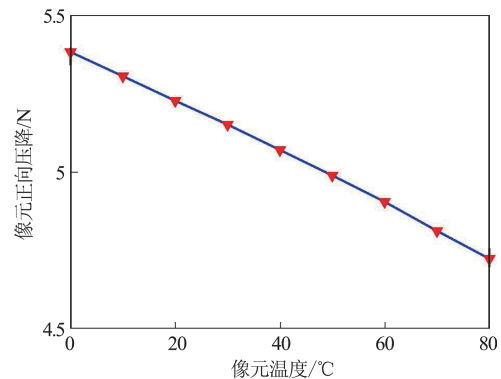


图 7 二极管型红外焦平面阵列像元正向压降与温度的关系

Fig. 7 Relation of forward voltage drop to temperature of the diode type infrared focal plane array pixel

表 2 给出了二极管型红外焦平面阵列单个像元热学参数的电学等效法实测值与理论计算值、以及黑体辐射斩波法测试值的对照表。其中, 电学等效法实测值是根据图 (5) 所示的自热功率脉冲获得, 理论值是利用二极管型红外焦平面阵列像元的材料与结构信息, 按照 Jiang 文献中提到的热学参数理论计算方法计算得到的; 黑体辐射斩波法测试值是采用黑体辐射炉和斩波器的测试方法所测得。黑体辐射斩波法是通过斩波器对黑体辐射进行斩波来产生一个矩形脉冲辐射, 其实验方法如下: 用斩

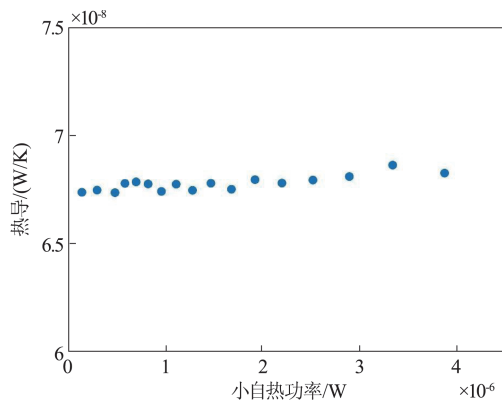


图8 二极管型红外焦平面像元热导与小白热功率的关系
Fig. 8 Relation of thermal conductance to small self-heating power of the diode type infrared focal plane pixel

波调制频率为 1 Hz 的斩波器调制温度为 120 °C 的黑体辐射,将被调制的辐射照射在工作于 10 μ A 恒流下的像元表面,测量像元正向压降的变化即可测得热响应时间。图 9 为利用黑体辐射斩波法测得的二极管型红外焦平面像元正向压降与时间的关系,可以看出当黑体辐射照射到像元时,像元的正向压降减小。根据国标,像元正向压降减小到总变化量的 63% 时所需要的时间即为像元的热响应时间。通过波形可以得出像元的热响应时间为 78 ms。由于被像元吸收的黑体辐射功率无法测得,故该方法无法进一步测出器件的热导和热容。从表中数据可以看出:电学方法测得的像元实测值与理论计算值较吻合,存在的细微偏差主要是由于器件加工工艺引起。黑体辐射斩波法所测得的热响应时间远大于电学等效法测试值与理论计算值,这是由于斩波器的斩波过程存在机械延迟,导致产生的脉冲辐射不是一个理想方波,从而引入了较大测量误差。

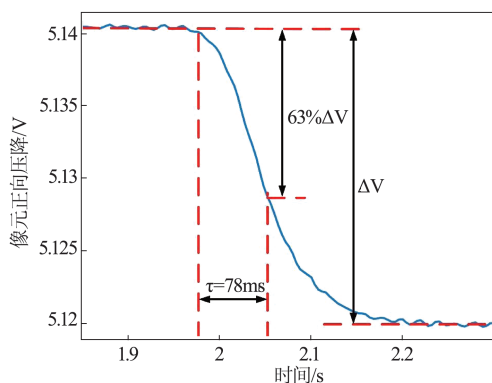


图9 利用黑体辐射斩波法测得的二极管型红外焦平面像元正向压降与时间的关系
Fig. 9 Relation of time to forward voltage drop of diode type infrared focal plane pixel by the blackbody chopper method

表 2 二极管型红外焦平面阵列像元热学参数的实测值和理论计算值、以及与黑体辐射斩波法测试值

Table 2 Measured values, theoretical values and the measured values by the blackbody chopper method of thermal parameters of the diode type infrared focal plane array pixel

	理论计算值	电学测试法	黑体斩波器法
热响应时间/ms	21.9	22.1	78
热导/(W/K)	6.19×10^{-8}	6.70×10^{-8}	~
热容/(J/K)	1.36×10^{-9}	1.49×10^{-9}	~

4 结论

本文基于二极管型红外热探测器的热平衡理论,结合二极管自身的电学特性,并利用探测器的自热效应,设计了一种二极管型红外热探测器热学参数的测试电路;基于热学参数的电学等效测试原理,详细分析了测试过程中的理想测试工作点与误差来源,进而提出了一种精确有效的测试方法。采用该方法,对自制的一款二极管型红外焦平面阵列像素进行了热容、热导和热响应时间的测试,实测结果分别为 1.49×10^{-9} J/K、 6.70×10^{-8} W/K 和 22.1 ms。测试结果表明:热学参数可通过测量探测器在脉冲功率下的正向压降变化获得,且可通过控制测试条件来保证所需的热学参数测试精度。该测试方法在测试过程中只需要基本的电学激励,无需外加脉冲红外激光等光学激励,从而极大地简化了测试系统,降低了测试操作的复杂度。有利于精确便捷地获得二极管型红外热探测器的热学参数,指导探测器的性能评估与结构优化。

References

- [1] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54: 136-154.
- [2] Vollmer M, Möllmann K P. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications* [M]. John Wiley & Sons, 2017.
- [3] XING Su-Xia, ZHANG Jun-Ju, CHANG Ben-Kang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering* (邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状. *红外与激光工程*) 2004, 33(5):441-444.
- [4] Fu J Y, Shang H P, Shi H T, et al. Optical sensitivity non-uniformity analysis and optimization of a tilt optical readout focal plane array [J]. *J. Micromech. Microeng.* 2016, 26: 025001.
- [5] Malyarov V G, Khrebtov I A, Kulikov Yu V, et al. Comparative investigations of bolometric properties of thin-film structures based on vanadium dioxide and amorphous hy-

- drated silicon [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Moscow*, 1999, **3819**: 136-142.
- [6] Hanson C. Uncooled thermal imaging at Texas Instruments [J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **2020**: 330-339.
- [7] Graf A, Arndt M, Sauer M, *et al.* Review of micromachined thermopiles for infrared detection, *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**: 59-75.
- [8] Tomohiro I, Masashi U, Kazuyo E, *et al.* Low-cost 320x240 uncooled IRFPA using conventional silicon IC process [C]. *Proc. Of SPIE*, 1999, **3698**: 556-564.
- [9] Eminoglu S, Tanrikulu M Y, Akin T. A low-cost 128x128 uncooled infrared detector array in CMOS process [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2008, **17**(1): 20-30.
- [10] ZHU Hui-Hui, FENG Fei, WANG Yue-Lin, *et al.* Noise analysis and structural optimal design of diode microbolometer uncooled IRFPAs [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (朱慧慧, 冯飞, 王跃林, 等. 二极管型红外焦平面阵列的噪声分析及结构优化设计. *红外与毫米波学报*) 2015, **34**(6): 647-653.
- [11] Fujisawa D, Ogawa S, Hata H, *et al.* Multi-color imaging with silicon-on-insulator diode uncooled infrared focal plane array using through-hole plasmonic metamaterial absorbers [C]. In 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2015, 905-908.
- [12] JIANG Wen-Jing, OU Wen, MING An-Jie, *et al.* Design and analysis of a high fill-factor SOI diode uncooled infrared focal plane array [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, **23**: 065004.
- [13] Selim E, Tanrikulu M Y, Deniz S T, *et al.* A low-cost small pixel uncooled infrared detector for large focal plane arrays using a standard CMOS process [J]. *Proc. SPIE Infrared Detectors Focal Plane Arrays VII*, 2002, **4721**: 111-121.
- [14] Xu De-Hui, Xiong Bin, Wang Yue-Lin, *et al.* Uncooled IR sensor based on lateral polysilicon pn junction diode: initial results [J]. *Proc. of SPIE*, 2011, **8191**: 819113.
- [15] National Standardization Technical Committee. GB/T 13584-2011 *Measuring methods for parameters of infrared detectors* [S]. Beijing: China Standard press. (中华人民共和国国家监督局. GB/T 13584-2011. 红外探测器参数测试方法. 北京: 中国标准出版社), 2011-12-30.
- [16] Yeong M C, Jin S S, Thunter H. Parameter extraction of resistive thermal sensors [J]. *Sensors and Actuators A*, 1996, **55**: 43-47.
- [17] Charlot B., Mir S., Parrain F., *et al.* Generation of electrically induced stimuli for MEMS self-test [J]. *Electron. Testing: Theory Appl.* 2001, **17**(6): 459-470.
- [18] LIU Zi-Ji, LV Jian, ZHENG Xing, *et al.* An improved test and analyze method for microbolometer thermal performances [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (刘子骥, 吕坚, 郑兴, 等. 一种优化的微测热辐射计热学参数性能测试分析方法. *红外与毫米波学报*) 2012, **31**(2): 183-187.
- [19] Takashima N, and Kimura M. Diode temperature sensor with the output voltage proportional to the absolute temperature and its application to the thin film Pirani Vacuum Sensor [C]. The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2007, 2197 - 2202.
- [20] ZHANG Qiang, LIU Rui-Wen, LV Wen-Long, *et al.* Analysis and optimization of the voltage temperature coefficient of a thermodiode uncooled infrared focal plane array [J]. *Micronanoelectronic Technology*, (张强, 刘瑞文, 吕文龙, 等. 非制冷热敏二极管型红外焦平面阵列电压温度系数的分析与优化. *微纳电子技术*) 2018, **55**(9): 617-624.
- [21] Samtia S, Guha P K, Ali S Z, *et al.* Silicon on insulator diode temperature sensor - A detailed analysis for ultra-high temperature operation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, **10**(5): 997-1002.