

TCR 矫正对非制冷探测器微桥热导测试的影响

邱宇峰^{1,2}, 金 晶¹, 翟厚明²

(1. 上海大学材料科学与工程学院电子信息材料系, 上海 200072;

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:VO₂ 薄膜的电阻温度系数 TCR(Temperature Coefficient of Resistance, 用 α 表示)随温度改变会发生显著变化。因此,以 VO₂ 薄膜为热敏材料的非制冷探测器微桥像元采用 $1/R - (-\alpha l^2)$ 曲线来测量微桥热导时,如果使用固定 TCR 数值,必然会对测量结果带来偏差。本文采用 TCR 逐点矫正的方法测量了非制冷微桥热导,并分析了有效热导,实验中的最大热导矫正率达到 20.08%。采用本方法可使非制冷探测器微桥的热导测试结果更为准确,也更具有实际应用价值。

关键词:非制冷探测器;热导;有效热导;电阻温度系数;微桥

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.06.008

Effect of TCR correction on microbridge thermal conductance test for uncooled detectors

QIU Yu-feng^{1,2}, JIN Jing¹, ZHAI Hou-ming²

(1. Department of Electronic Information Materials, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract:TCR (Temperature coefficient of resistance, α) of the VO₂ thin film changes with temperature. So when the thermal conductance of VO₂ microbridge pixel is tested by using the $1/R - (-\alpha l^2)$ curve method, certain deviation occurs if the TCR is treated as a constant. The test on the microbridge thermal conductance of the uncooled detector is carried out by using the TCR corrected $1/R - (-\alpha l^2)$ curve method and effective thermal conductance is analyzed. The biggest correction ratio reached 20.08% in the experiment. This method makes the thermal conductance test of the uncooled detector more precise and more practical.

Key words:uncooled detector; thermal conductance; effective thermal conductance; temperature coefficient of resistance; microbridge

1 引 言

微桥结构的非制冷探测器是当今红外成像领域中的研究热点^[1]。其中,微桥的热导大小是描述微桥性能的关键参数之一,它对探测器的响应率、响应时间等重要指标具有直接影响,因此探测器微桥热导的精确测量对探测器结构设计、性能

评估等都具有重要意义。对已有的非制冷探测器,在知道其微桥详细结构参数的情况下,热导大

作者简介:邱宇峰(1987-),男,硕士研究生,主要从事非制冷红外探测器(测辐射热计)的热学、电学性能测试与分析。E-mail:jjin@shu.edu.cn

收稿日期:2013-09-29;**修订日期:**2013-10-15

小可使用专门仿真软件进行计算^[2-3]。目前,常用测量热导的方法有微量热计法,3 ω 法以及热比较法、光热法、 $1/R-(\alpha I^2)$ 曲线法等^[4]。其中, $1/R-(\alpha I^2)$ 曲线法是对微桥结构直接进行测试,更符合器件测试要求。因此,非制冷探测器微桥热导的测试采用 $1/R-(\alpha I^2)$ 曲线法较好。

实验通过烘箱自由降温,并实时采样记录温度和电阻数值的方法,对探测器微桥像元进行了热导测试。实验结果说明随着偏置电流的增大,有效热导和热导之间的差值随之增大,有效热导在电流达到一定值时减至负值,产生“自焚”现象。对比TCR矫正前后的数值,发现偏置电流越大,矫正效果越明显。TCR矫正的方法可以得到相对更为准确的热导数值,为成品探测器器件的热导评估以及后续的材料和结构改进提供指导。

2 实验原理

在非制冷探测器的微桥结构中,微桥热导主要来自三部分,即 $G = G_{\text{leg}} + G_{\text{gas}} + G_{\text{rad}}$,分别是微桥通过支撑桥腿与衬底互连产生的传导热导、微桥与周围气体接触产生的传导热导以及通过自身辐射产生的辐射热导。在室温下测试时,放置探测器杜瓦真空度低于10Pa,此时非制冷探测器的热导主要来自于支撑桥腿的传导热导^[5-6]。

以 VO_2 薄膜为热敏材料的非制冷探测器微桥若在电极两端通以小电流 I ,当微桥处于热平衡状态时有^[4,7]:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} - (\alpha I^2) \frac{1}{G} \quad (1)$$

根据公式(1),如果假定电阻温度系数 α 为一定值,则可以画出 $1/R$ 随 $(-\alpha I^2)$ 变化的一条直线,其斜率的倒数即为微桥热导。但实际上其电阻温度系数 α 是随温度而变化的量,实验中提供 VO_2 薄膜的电阻温度系数时,也需要同时说明获得该数值时的温度。因此,为了获得更准确的非制冷探测器微桥的热导数值,在进行数据处理时需要电阻温度系数 α 值进行修正。

理想的 VO_2 薄膜在室温附近使用时处于半导体相,因此采用半导体材料电阻与温度关系式:

$$R = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (2)$$

根据电阻温度系数 α 的定义有:

$$\alpha = - \frac{(InR - InA)^2}{B} \quad (3)$$

式(3)中的 A 、 B 值在接下来的实验中可以通过数据

拟合得到,这样就有了电阻 R 和电阻温度系数 α 的对应关系。接着将所得的 $\alpha \sim R$ 变化曲线中的对应数值逐点代入 $1/R-(\alpha I^2)$ 关系图中。此时如果把所有 $1/R-(\alpha I^2)$ 数据点进行直线拟合则会引入较大的误差,因此在实验中依次将电流变化不大的几个临近点进行一次直线拟合,得到对应不同温度的准确热导值。

器件工作时,考虑偏置电流引入的焦耳热,热传导方程为^[4]:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G(\Delta T) = \frac{d(i^2 R)}{dT} \Delta T + \eta \alpha \beta P_0 \exp(j\omega t) \quad (4)$$

上式右边第一项是偏置电流引起的焦耳热,第二项为探测单元吸收的辐射能,我们引入“有效热导”来简化上式。因为 i 、 R 都是温度 T 的函数,根据实际测试连接方式,上式右边第一项可以重写为:

$$\frac{d(i^2 R)}{dT} \Delta T = \frac{d(V^2/R)}{dT} \Delta T = - \frac{V^2}{R^2} \frac{dR}{dT} \Delta T \quad (5)$$

根据电阻温度系数的定义,热传导方程可以改写为:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G(\Delta T) = - \frac{V^2 \alpha \Delta T}{R} + \eta \alpha \beta P_0 \exp(j\omega t) \quad (6)$$

在稳态条件下,即只有很小的电流偏置引入焦耳热,无入射辐射时:

$$\frac{V^2}{R} = G_0(T_1 - T_0) \quad (7)$$

式中, T_0 是环境温度; T_1 为焦耳热作用下探测器像元达到的稳定温度; G_0 为 T_0 下的热导。此时热传导方程可以简化为:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G_e(\Delta T) = \eta \alpha \beta P_0 \exp(j\omega t) \quad (8)$$

其中:

$$G_e = G + G_0(T_1 - T_0)\alpha \quad (9)$$

G_e 是计入实际测试电流热效应后的参数,称之为有效热导。

3 实验过程

3.1 实验条件及设备

实验中测试所用器件为实验室制得的 1×160 非制冷探测器线列微桥像元,图1为微桥像元在光学显微镜下的俯视照片。微桥桥面尺寸为 $80 \mu\text{m} \times 77 \mu\text{m}$,微桥支撑桥腿由机械强度很高、热导较低的 Si_3N_4 薄膜及金属电极材料构成。为了降低微桥热导,提高器件响应率,微桥桥腿长宽比约为40/1。

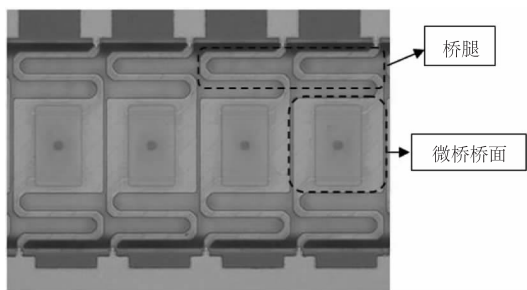


图1 非制冷探测器微桥像元显微照片

Fig. 1 The photograph of the uncooled detector microbridge pixel under microscope

被测探测器芯片用 $50\ \mu\text{m}$ 硅铝丝键压于双列直插的 28 脚金属管座上,管座可安装在真空杜瓦中,真空杜瓦可被抽真空,其极限真空度优于 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。

图 2 是实验电路图。

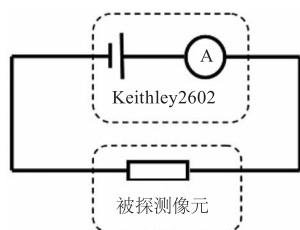


图2 I-V 测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram for I-V test

实验中使用 Keithley 2602 精密数字电源。施加在微桥压脚两端的电压变化范围为 $10 \sim 300\text{mV}$,实验时每隔 10mV 调整一次电压,并记录回路电流。

为了得到式(2)中的材料参数,需要测试微桥的电阻~温度对应关系。为了获得较高的温控及测量精度,本实验采用烘箱自由降温并实时采样记录温度和电阻数值的方法,具体操作为:将被测器件置于烘箱中,将烘箱温度升到 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 左右后关掉电源使其自由降温,到 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 温度稳定时开始采集数据,每隔 5 s 同时记录一组电阻、温度数值,直到温度降到室温附近($25\text{ }^\circ\text{C}$)。电阻的读取使用 Fluke 45 数字万用表,并利用 VB 语言编写的一个串口通信数据采集程序,通过 Fluke 45 数字万用表的 RS232 串口与 PC 通讯,设定每隔 5 s 读取一次电阻数值并记录于 Excel 文档中;温度的读取使用具有自动数据记录功能的 Fluke 289 数字万用表,该表带有可测温的热电偶探头,将热电偶探头伸入烘箱中,悬空置于待测器件附近,获得并记录温度数值。

3.2 实验结果及分析

测试时使用机械泵+分子泵机组可将杜瓦腔体抽至高真空(数表显示 $2 \times 10^{-3}\text{Pa}$),实际上,当真空度优于 10 Pa 时,空气热导几乎可忽略不计。图 3 直观显示出了真空对于降低热导的作用,由于真空环境下热导

的降低,薄膜电阻因为自热效应而减小的趋势很明显。

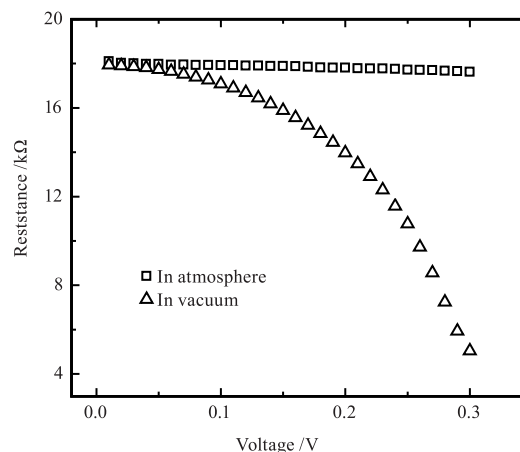


图3 空气以及真空中电阻随电压的变化比较

Fig. 3 Comparison of the R-V relation in atmosphere and in vacuum

图 4 为微桥在 $25 \sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 变化时,电阻随之变化的 $T \sim R$ 关系图。实际处理数据时,把每 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 记录的多组电阻测试值取平均数作为该温度的实际对应值,为使数据点清晰可辨,图中数据散点的间隔为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

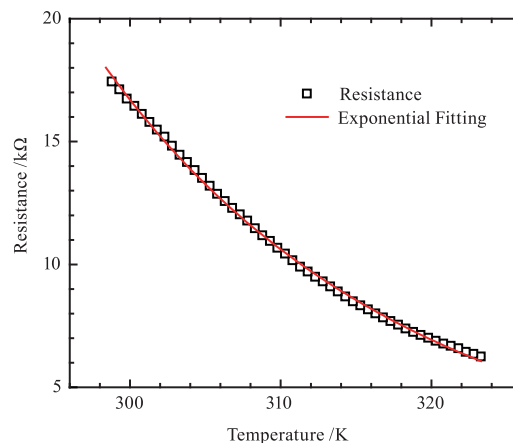


图4 像元电阻温度关系

Fig. 4 Relationship between resistance and temperature of the pixel

由此对于以 VO_2 为热敏材料的微桥,其拟合所得材料参数 A、B 分别为: $A = 1.30458 \times 10^{-5}$, $B = 4.21882 \times 10^3$ 。

则式(2)可写为:

$$R = 1.30458 \times 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{4.21882 \times 10^3}{T}\right)$$

$$\text{式(3)可写为: } \alpha = -\frac{(\ln R + 11.247044)^2}{4218.82}$$

一般情况下,若不进行 TCR 矫正,取材料在 300 K ,即 $27\text{ }^\circ\text{C}$ 时的数据。对于我们的氧化钒薄膜,利用式(3)有 $\alpha = -0.0468$ 。把电压 $10 \sim 30\text{ mV}$ 时拟合到的热导作为 G_0 ,利用式(9), T_1 是不同偏压下薄膜的实际中心温度,表 1 列出了部分的测试数据, $\Delta T = T_1 - T_0$,热导测试结果如图 5 所示。

表 1 热导测试数据

Tab. 1 Thermal conductance testing data

电源电压/mV	60	90	120	150	180	210	240	270
$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	0.345	0.818	1.521	2.589	4.041	6.160	9.564	16.470
热导/ $(10^{-7}\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$	5.6434	6.0318	5.9833	5.7359	6.2587	6.5660	7.3071	8.9520
有效热导/ $(10^{-7}\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$	5.5546	5.8214	5.5919	5.0698	5.2190	4.9811	4.8463	4.7142
α 修正后热导/ $(10^{-7}\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$	5.6905	6.0508	5.9537	5.6366	6.0574	6.2177	6.7075	7.7954
α 修正后有效热导/ $(10^{-7}\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$	5.5998	5.8363	5.5560	4.9635	5.0150	4.6456	4.3061	3.7677

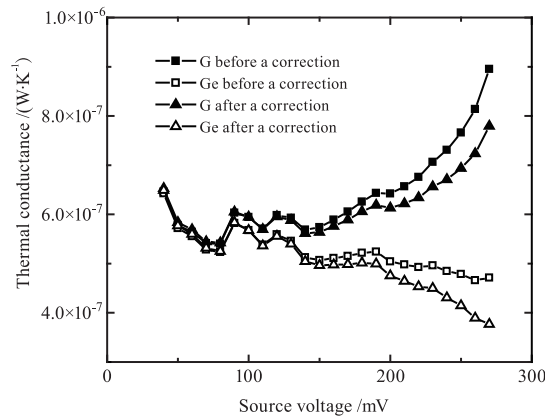


图 5 热导测试结果

Fig. 5 Thermal conductance testing result

通过对比两条实心点数据线以及空心点数据线,发现经过 TCR 修正后的热导值比之不经修正的数值在各个温度段都有所减小,其结果更为接近实际值。在测试过程中,通过微桥像元的电流越大,其修正效果越明显,在实验中,最大有效热导修正比例达到 20.08%。此外分别对比两条方框形数据线和三角形数据线,看出有效热导与热导之间的差值随着偏置电流的变大急剧增加。单就有效热导 G_e 来看,其随着薄膜温度的提高一直在减小,当为负的时候,薄膜将会因过热而损坏,称为“自焚”,对于我们的器件,自焚现象发生在 77℃ 附近。自焚现象在器件设计和使用时应避免。

4 结 论

提出了一种非制冷探测器微桥像元的热导测试方法,该方法在原有的 $1/R - (-\alpha^2)$ 曲线测试方法基础上对 TCR 值 α 进行变化修正,使得最后的测试结果更为准确。通过对实验室制得的器件像元进行测试并分析了有效热导,在本次实验中最大热导修正比例为 20.08%,有效热导和热导之间的差值随偏置电流的增大急剧增加,实际工作中应避免因电流过大而导致的有效热导减为负值的“自焚”现象。采用 TCR 修正的微桥热导测试方法可以得到更接近实际值的热导数据,在非制冷探测器的热导参数评估与设计中有实际使用价值。

致 谢 :衷心感谢上海硅酸盐研究所金平实教授和曹逊博士在非制冷探测器流片中给予的帮助,生长了高 TCR 的氧化钒薄膜;此外还分享了 TCR 测试方法,推动了本文实验的进行。

参考文献:

[1] LEI Yagui, WANG Rongrui, CHEN Miaohai. Development of foreign uncooled IRFPA detectors [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(9): 802 – 805. (in Chinese)
雷亚贵, 王戎瑞, 陈苗海. 国外非制冷红外焦平面阵列探测器进展 [J]. 激光与红外, 2007, 37(9): 802 – 805.

[2] Zerov V Y, Malyarov V G, et al. Calculational modelling of the main characteristics of an uncooled linear microbolometer array [J]. Journal of Optical Technology, 2004, 71(3): 153 – 157.

[3] LI Ge, YUAN Ningyi, et al. Thermal simulation of micromachined bridge and self-heating for uncooled VO₂ infrared microbolometer [J]. Sensors and Actuators A, 2006, 126(2): 430 – 435.

[4] LIU Weiguo, JIN Na. Integrated uncooled thermal imaging detector array [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 19 – 21, 341 – 345. (in Chinese)
刘卫国, 金娜. 集成非制冷热成像探测阵列 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 19 – 21, 341 – 345.

[5] MANG Ouyang, Jin-Shown Shie. Measurement of effective absorptance on microbolometers [J]. Instrumentation and measurement, IEEE, 2006, 55(3): 1012 – 1016.

[6] LIU Ziji, LÜ Jian, ZHENG Xing, et al. An improved test and analyze method for microbolometer thermal performances [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2012, 31(2): 183 – 187. (in Chinese)
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 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(2): 183 – 187.

[7] M du Plessis, J Schoeman, et al. The electro-thermal properties of integrated circuit microbolometers [C]. SAIEE Africa Research Journal, 2011, 102(2): 40 – 48.