#### **文章编号:** 1672-8785(2015)09-0025-05

# 微电子器件红外测温中的发射率 测量方法研究

# 郑世棋 翟玉卫 刘霞美

(中国电子科技集团公司第十三研究所,河北石家庄 050051)

**摘 要:**为了使红外热像仪能够准确测量微电子器件中微米级发热结构的温度,并克服由热胀冷缩引起的器件形变问题,提出了一种单温度发射率测量方法。分析了在用传统的双温度发射率测量方法对微电子器件进行红外检测时热胀冷缩对检测结果的影响。在温度变换过程中,器件的形变效应会严重影响温度测量结果。提出了一种针对微电子器件显微红外测试的单温度发射率测量方法。该方法只需将被测件保持在一个固定温度下即可对发射率进行测量。理论分析结果表明,该方法与双温度法在最终的测量结果上是等效的。单温度发射率测量方法可以有效避免微电子器件的形变影响,因而可保证温度测量结果的准确性和可靠性。

关键词:微电子;显微红外测温;发射率;单温度

中图分类号: TN3 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.09.006

# Study of Emissivity Test Method in Infrared Thermal Test of Micro-electronic Devices

ZHENG Shi-qi, ZHAI Yu-wei, LIU Xia-mei (The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** To let an infrared thermal imager measure the temperature of micrometer-level heating structures in micro-electronic devices accurately and overcome the problem of device deformation due to expansion and contraction, a single-temperature emissivity measurement method is proposed. The influence of expansion and contraction on the detection result when a traditional dual-temperature emissivity measurement method is used to detect micro-electronic devices is analyzed. In the process of temperature transformation, the deformation effect of the device may affect the measurement result seriously. The proposed single-temperature emissivity measurement method is designed for the microscopic infrared test of micro-electronic devices. It can measure the emissivity of a device as long as it is kept at a fixed temperature. The theoretical analysis result shows that the single-temperature method and the dual-temperature are equivalent in the final measurement results. However, the single-temperature method can avoid the deformation of devices. So, the accuracy and reliability of its measurement result is ensured.

Key words: micro-electronic; infrared temperature test; emissivity; single temperature

收稿日期: 2015-08-10

作者简介:郑世棋(1963-),福建莆田人,工程师,主要从事精密仪器计量及微电子器件的温度可靠性等方面的 研究。E-mail: kaoyan071@126.com

# 0 引言

显微红外测试手段适用于微电子器件的温 度检测,因为其能够以图像的形式将器件表面 的温度分布情况直观地显示出来,以便人们对 器件的热特性进行分析和研究。该方法属于非 接触测温,不会影响被测器件的工作状态,因此 可在微电子器件的真实工作状态下对其温度进 行测量。这就是显微红外方法的突出优势所在。

根据辐射测温原理,发射率计算是红外测 温方法的关键步骤,其测量结果的准确与否会 直接影响最终的温度测试结果。在红外温度测 量中,获取发射率的方法一般有两种:(1)参考已 有的资料或经验数据,并将其作为发射率输入 红外热像仪。该方法广泛应用于准确度要求较 低或者被测对象发射率较为稳定的测温领域。 (2)实时发射率测量法:根据红外测温理论,设 计某种测量方法,以实时获取发射率数据。该方 法用于精确测温或者被测对象表面各种材料的 发射率差异较大的场合。

对于微电子器件的显微红外测试,国际上 通常采用实时发射率测量方法。这主要是因为 该方法能够有效地消除环境辐射的干扰,而且 理论上也可以在未知被测对象发射率信息的情 况下实现对任意材料的温度检测。

作为一种传统的发射率实时精确测量方 法,双温度法是在两个固定且已知的温度下分 别测量器件的辐射量,然后再由其计算出发射 率的。但是在温度变换过程中,热胀冷缩会引起 器件发生形变。而微电子器件的发热区域较小 (微米甚至亚微米量级),即便是轻微的形变也可 能会严重影响测量结果。因此,如何避免形变对 显微红外测试结果的影响是测试人员极为关心 的一个问题。

# 1 双温度发射率测量方法的弊端

#### 1.1 双温度发射率测量方法的原理

显微红外热像仪所接收到的总辐射量可用 式(1)表示:

$$\varphi = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_s, \lambda) \mathrm{d}\lambda + r \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_a, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \quad (1)$$

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.9, SEP 2015

式中,  $\varphi$  为显微红外热像仪对所接收到的辐射能量的响应;  $\varepsilon$  为被测件的发射率; Q 为热像仪对一定温度和波长下的黑体辐射量的响应;  $T_s$  为被测件的温度; r 为被测件的反射率;  $T_a$  为环境温度;  $Q_f$  为热像仪对自身杂散辐射的响应。

由式 (1) 可知, 影响红外检测的主要因素来 自于被测件对环境辐射的反射。为了消除由反 射引入的误差, 一般使被测件分别处在两个固 定温度  $T_{s_1}$ 和  $T_{s_2}$ 下, 此时红外热像仪的响应分 别为  $\varphi_{s_1}$ 和  $\varphi_{s_2}$ :

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S1} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S1}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + r \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle a}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \quad (2)$$

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S2} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S2}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + r \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle a}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \quad (3)$$

两式相减可得

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S2} - \varphi_{\scriptscriptstyle S1} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S2}, \lambda) \mathrm{d}\lambda - \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S1}, \lambda) \mathrm{d}\lambda$$
(4)

显微红外热像仪对温度为  $T_{s_1}$  和  $T_{s_2}$  的黑体的响应分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ :

$$\varphi_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{S1}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \tag{5}$$

$$\varphi_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{s_2}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \tag{6}$$

此时可得被测件的发射率 ε:

$$\begin{split} \varepsilon &= \frac{\varphi_{S1} - \varphi_{S2}}{\varphi_1 - \varphi_2} \\ &= \frac{\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{S2}, \lambda) \mathrm{d}\lambda - \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{S1}, \lambda) \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{S2}, \lambda) \mathrm{d}\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{S1}, \lambda) \mathrm{d}\lambda} \end{split} \tag{7}$$

由式 (7) 可知,此时的发射率计算结果没有误差。

### 1.2 形变效应对双温度法的影响

双温度发射率测量方法虽然可以有效消除 由环境辐射带来的影响,但是在温度变换过程 中,由于热胀冷缩,被测物会发生形变。当被测 件表面为均匀材料且尺寸较大时,由热胀冷缩 引起的形变量可以忽略不计。

微电子器件的表面由多种材料构成,且发 热区域较小,比如 GaN 器件的沟道区域只有 4 µm 宽,如图 1 所示。此时,由热胀冷缩导致的 形变量就不能忽略。

图 1 为热胀冷缩效应的示意图。其中,区域 I 的材料发射率为  $\varepsilon_1$ ,区域 II 的材料发射率为  $\varepsilon_2$ 。在较低的温度下进行发射率测量时,被测件 的位置如图 1 的上半部分所示;当温度升高后, 形变效应就会使被测件两种材料的位置发生变 化,如图 1 的下半部分所示。



图 1 热胀冷缩效应的示意图

在两次测量中,镜头相同区域的材料特性 发生了变化,这明显违背了双温度法的要求,因 此必然会导致发射率计算出现较大偏差,使最 终的红外热成像图像出现伪高温点。如图2所 示,某硅器件由于热胀冷缩所导致的形变会对 测量结果产生影响。其中,箭头方向即为形变方 向。

由于微电子器件的发热结构较小,采用双 温度法计算发射率时极易受到热胀冷缩效应的 影响,并会给最终的检测结果带来较大的误差。

# 2 单温度发射率测量方法

为了有效检测微电子器件的温度,必须对 双温度发射率测量方法进行修正。因此,本文提



图 2 基于双温度发射率法的显微红外图像

出了一种可有效避免热胀冷缩效应影响的单温 度发射率测量方法。

#### 2.1 单温度测量方法的理论分析

由前面的分析可知,在发射率测量过程中, 最大的影响因素是环境辐射。只要能消除环境 辐射的影响,就可以实现发射率的准确测量。

通过对公式进行分析可以看出,若能得到一 个等同于环境温度下的黑体辐射源的辐射量:

$$\varphi_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_a, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \tag{8}$$

则只需再获取被测物在某一固定温度下的辐射 量:

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + r \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle a}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_f \quad (9)$$

二者之差为

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S} - \varphi_{\scriptscriptstyle a} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + (r-1) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle a}, \lambda) \mathrm{d}\lambda \tag{10}$$

式 (10) 的等效形式为

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S}, \lambda) \mathrm{d}\lambda - \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle a}, \lambda) \mathrm{d}\lambda \quad (11)$$

此时,只需再获取与被测物温度相同的黑体的 辐射量:

$$\varphi_{\scriptscriptstyle S0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(T_{\scriptscriptstyle S}, \lambda) \mathrm{d}\lambda + Q_{\scriptscriptstyle f} \tag{12}$$

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.9, SEP 2015

发射率 ε 可由式 (10)、式 (11) 和式 (12) 计 算得到:

$$\frac{\varphi_{s}-\varphi_{a}}{\varphi_{s0}-\varphi_{a}} = \left[\varepsilon \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} Q(T_{s},\lambda) \mathrm{d}\lambda - \varepsilon \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} Q(T_{a},\lambda) \mathrm{d}\lambda\right]$$
$$\div \left[\int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} Q(T_{s},\lambda) \mathrm{d}\lambda - \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} Q(T_{a},\lambda) \mathrm{d}\lambda\right] = \varepsilon \quad (13)$$

式(13)与式(7)是等效的。

等同于环境温度的黑体辐射量 *φ*<sub>a</sub> 可以通过 在环境温度下对黑体进行实际测量得到。

对于固定温度下的黑体,辐射量 φ<sub>so</sub> 可以通 过在不同温度下对其进行测量来获取。然后将 数据存储在计算机中,这样即可在测量时直接 调用,而无需每次都进行测量。

本文方法只需将被测物保持在一个固定温 度下就可以实现对发射率的测量。由于无需变 换被测件所处的温度,可以有效避免热胀冷缩 现象的出现。

#### 2.2 单温度测量方法的实现

根据上述理论推断,现给出单温度发射率 测量方法的具体步骤:

(1) 在固定的环境温度下,用显微红外热像 仪测量黑体的辐射量,得到热像仪的响应  $\varphi_a$ ;

(2) 使黑体温度升至不同温度,分别记录热 像仪在这些温度下的响应  $\varphi_s$ ;

(3) 将被测件安置在控温装置上,然后使其 温度上升至明显高于环境温度,获得热像仪的 响应  $\varphi_s$ ;

(4) 根据公式计算被测表面的发射率  $\varepsilon$ 。

在步骤(2)中,黑体的校准值可以保存在热 像仪的校准文件中,因此后续的发射率测量只 需进行第(1)、第(3)和第(4)步。

采用以上两种方法分别对上述硅器件进行 了发射率测量。图 3 中的白点位置即为待测区 域。该点位于两种不同的发射率材料的分界处, 处于低发射率区域。这两种材料的发射率分别 为 0.59 和 0.22。随着器件温度的上升,由于热胀 冷缩,器件的高发射率材料逐渐向白框位置移 动。图 4 所示为测量结果的对比曲线,其中双温 度法的起始温度均为 60 ℃。

由此可见,单温度法的测量结果较为稳定 且接近于真实值,而随着温差的增大,双温度法 的发射率计算误差会逐渐增大。

图 5 为采用单温度法对同一器件进行测量 时获得的显微红外温度分布图像。与图 2 相比, 图 5 没有出现伪高温现象。

在单温度发射率测量方法中,由于无需变 换被测件的温度,可以避免由热胀冷缩导致的 器件形变,并可实现对微电子器件发射率及温 度的精确测量。同时,由于无需转换被测器件的 温度,也节省了至少二分之一的时间,极大地提 高了测量效率。



图 3 被测器件的表面结构图



图 4 发射率的测量结果



图 5 基于单温度法的显微红外图像

## 3 结论

本文提出了一种适用于微电子器件显微红 外温度测试的发射率测量方法。该方法在一个 固定温度下即可实现对发射率的测量,避免了 形变效应对测量结果的影响,既提高了效率又 提高了准确度。试验结果验证了本文方法的正 确性。另外,该方法还可以被推广到针对 MEMS 等其他微小结构的红外温度检测领域。

(上接第20页)

and Effective Spectral Emissivity-simulation and Initial Verification[J].Journal of Applied Meteorology, 2004,43(5): 795–809.

- [10] McNally A P, Watts P D. A Cloud Detection Algorithm for High-Spectral-Resolution Infrared Sounders [J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003,129(595): 3411–3423.
- [11] 朱文刚,李刚,张华,等.高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究 [J].**气象**,2013,**39**(5):633-644.
- [12] 曹广真,漆成莉,马刚,等. FY-3A 气象卫星 VIRR 云检测产品与 IRAS 的匹配 [J].遥感技术与应用, 2008,23(1): 89-92.
- [13] Dahoui M, Lavanant L, Rabier F, et al. Use of the MODIS Imager to Help Deal with AIRS Cloudy Ra-

#### 参考文献

- 梁法国, 翟玉卫, 吴爱华. 用显微红外热成像技术分析功率器件可靠性 [J]. 微纳电子技术, 2011, 48(5): 338-342.
- [2] McDonald J D. Optical Microscopy [M/OL]. www.moleculaexpressions.com, 2004.
- [3] Albright G C, Stump J A, McDonald J D, et al. True Temperature Measurements on Microscopic Semiconductor Targets [C]. SPIE, 1999, **3700**: 245–250.
- [4] Hamrel I T. Accurate Temperature Measurement in Thermograph an Overview of Relevant Features Parameters and Definitions [C]. SPIE, 1991, 1467: 448–457.
- [5] 陈波若. 红外系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [6] McDonald J D, Albright G C. Microthermal Imaging in the Infrared [J]. Electron Cooling, 1997, 3(1): 26–29.
- [7] Albright G C, Stump J A, Li C P, et al. Emissivity Corrected Infrared Thermal Pulse Measurement on Microscopic Semiconductor Targets [C]. SPIE, 2001, 4360: 103–111.
- [8] 侯成刚,张广明.用红外热成像技术精确测定物体发 射率[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(3): 193–198.
- [9] 朱德忠, 顾毓沁, 晋宏师, 等. 电子器件真实温度和 发射率分布的红外测量 [J]. 红外技术, 2000, 22(1): 45-47.

diances[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, **131**(610): 2559–2579.

- [14] Pavelin E G, English S J, Eyre J R. The Assimilation of Cloud-affected Infrared Satellite Radiances for Numerical Weather Prediction [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008,134(632): 737–749.
- [15] 朱国富,薛纪善,张华,等. GRAPES 变分同 化系统中卫星辐射率资料的直接同化 [J].科学通 报,2008,53(20):2424-2427.
- [16] Yang M S. A Survey of Fuzzy Clustering[J].Mathematical and Computer Modelling, 1993,18(11):1–16.
- [17] 王根,张建伟,陈允杰,等.一种各向异性 GVF 模型的心脏左心室 MR 图像分割模型 [J].计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(11):1887–1891.