

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.12

半导体器件用显微红外热成像技术原理及应用

翟玉卫, 郑世棋, 刘岩, 梁法国

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 对用于半导体器件温度测量的显微红外热成像技术的原理及应用情况进行了总结。显微红外热成像技术基于普朗克黑体辐射定律, 依靠测量被测件表面发出的红外辐射确定温度。在中红外波段下, 该技术具备最高 $1.9\ \mu\text{m}$ 的空间分辨力, 配合发射率修正技术, 能够测量非黑体的微小半导体器件的真实温度。该技术具备稳态温度成像测量能力、连续毫秒级甚至微秒级的高时间分辨力成像测量能力和脉冲条件下器件温度测量能力。在各类半导体器件不同工作条件下的温度测量方面得到了广泛的应用。

关键词: 半导体器件; 显微红外热成像; 测温; 发射率修正; 空间分辨力; 时间分辨力

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0053-08

Principles and Applications of Infrared Micro-thermography Technique for Semiconductor Devices

ZHAI Yuwei, ZHENG Shiqi, LIU Yan, LIANG Faguo

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The principles and applications of infrared micro-thermography technique for semiconductor device temperature testing were reviewed. This technique is based on Planck blackbody radiance law, and it determines the temperature by measuring the infrared radiation from the surface of the object under test. In the mid-infrared waveband, the highest spatial resolution of $1.9\ \mu\text{m}$ had been realized, and combining with the emissivity correction, the infrared micro-thermography technique can measure the true temperature of micro semiconductor devices. This technique is capable of measuring the stable and continuously dynamic temperature thermography, with milliseconds or even microseconds of temporal resolution, and the device temperature under pulsed conditions. It has been widely used in temperature testing for various semiconductor devices under different working conditions.

Key words: semiconductor devices; infrared micro-thermography; temperature testing; emissivity correction; spatial resolution; temporal resolution

0 引言

温度参数是半导体器件一类非常重要的参数, 最典型的就结温和热阻, 它们是评估半导体器件尤其是功率器件性能和寿命、分析器件可靠性、研究器件失效机理最重要的依据之一。在美军 MIL-STD-750D, GJB-548 等相关标准中都规定了结温和热阻参数为半导体器件的必测参数。由于温度参数的重要性, 用于半导体器件测温的各类技术和仪器一直是国内外半导体器件行业研究和关注的热点。目前, 有多种技术手段可以实现对半导体器件温度参数的测量, 如接触测温法、电学参数法和光学法^[1], 其中光学法又可以细分为: 液晶测温技术、荧光热成像测温技术、红外热成像测温技术、显微拉曼光谱测温技术、可见光热反射测温技术等^[2-4]。在这些技术中, 被半导体器件科研生产单位广泛采用的是电学参数法和显微红外热成像测

温技术。相对于只能测量器件平均温度的电学参数法, 基于红外测温原理的显微红外热成像技术具备微米级的空间分辨力^[5], 可以观察器件表面的温度分布情况, 能够得到更多的温度信息, 另外, 红外测温属于非接触测温, 不会影响器件的工作状态, 可以测量器件真实工作条件下的温度特性, 在当今的宽禁带、大功率器件温度测量方面具有不可替代的作用。

1 显微红外热成像技术的测温原理

显微红外热成像技术测温的基本原理是普朗克黑体辐射定律, 其数学表达式为^[6]

$$W_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \quad (1)$$

式中: $W_b(\lambda, T)$ 为黑体光谱辐射通量, $\text{W}/(\text{m}^{-2})$; c_1 为第一辐射常数, 其值为 3.742×10^{-16} , $\text{W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, 其值为 1.4388×10^{-2} , $\text{m} \cdot \text{K}$; T 为黑

体温度, K; λ 为波长, m。

表示物体总辐射量的斯蒂芬-玻尔兹曼公式是在普朗克公式的基础上对物体在一定温度 T 下, 单位面积、单位时间内所发射的全部波长的总辐射出射度的积分得到的

$$M = \sigma \varepsilon T^4 \quad (2)$$

式中: M 为辐射单元的全波长总辐射出射度, W/m^2 ; ε 为辐射单元表面发射率, 无量纲; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为 5.67×10^{-8} , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T 为辐射单元表面温度, K。

用于显微红外热成像测量的探测器多采用光子探测器, 因此热像仪的响应与入射光子的数量成正比(而非能量), 所以采用斯蒂芬-玻尔兹曼公式的光子形式来表示^[7]。

$$Q = \sigma \varepsilon T^3 \quad (3)$$

式中: Q 为单位面积全波长光子发射量, 个/($\text{s} \cdot \text{cm}^2$); ε 为辐射单元表面发射率, 无量纲; σ 为常量, 其值为 1.52×10^{11} , 个/($\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^3$); T 为辐射单元表面热力学温度, K。

由于光子探测器只能对某一波段的红外辐射产生响应, 所以其实际的测温不能由上述原理公式直接计算得到, 这里用 N 来表示热像仪接收到的辐射。又由于被测件都不是黑体, 处于一定的环境温度中时必然会将部分环境背景辐射反射进入热像仪, 所以, 热像仪探测器实际接收到的辐射可以表示为

$$N_M = \varepsilon N_T + (1 - \varepsilon) N_A \quad (4)$$

式中: N_M 为被测件发出的红外辐射, 个/($\text{s} \cdot \text{cm}^2$); ε 为发射率, 无量纲; N_T 为与被测件温度相同的黑体发出的红外辐射, 个/($\text{s} \cdot \text{cm}^2$); N_A 为与环境温度相同的黑体产生的红外辐射^[8], 个/($\text{s} \cdot \text{cm}^2$)。

式(4)只是一个定性的表达式。实际的显微红外测温装置在出厂前都对不同温度下的黑体进行测量, 并将黑体辐射与温度的关系拟合成一条曲线, 这些数据和曲线将作为后续测温的依据。例如, 环境温度容易测得, 如果发射率也已知, 则只再测量一只环境温度下的黑体, 就可以得到 N_T , 再根据拟合曲线算出 N_T 对应的温度即可。

显微红外热成像技术最重要的用途就是测量半导体器件的真实温度, 而非辐射温度, 所以必须准确的知道被测件表面的发射率。但是, 半导体器件表面的发射率不是已知的, 而是与材料种类、表面状态等密切相关的, 因此, 要实现准确的显微红外测温必须首

先计算发射率。

2 显微红外热成像技术的实现

采用显微红外热成像技术的测温装置一般被称为显微红外热像仪或红外显微镜(infrared microscope), 其典型结构如图 1 所示。

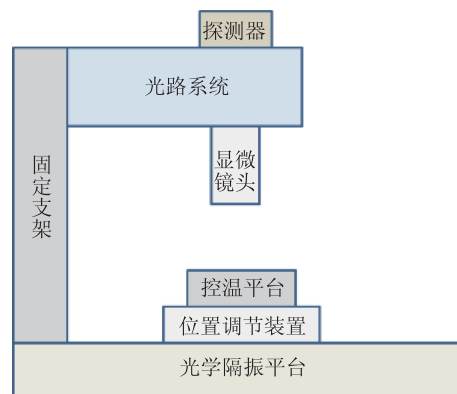


图 1 显微红外热像仪典型结构

被测件置于控温平台上, 以降低周围环境辐射的影响。被测件的红外辐射由显微镜头进入热像仪经光路系统传输后进入探测器, 探测器响应的信号再由计算机进行处理和显示。

作为半导体器件温度测量的专用测量仪器, 其最突出的特点就是高空间分辨力的真实温度测量。

2.1 高空间分辨力的实现

空间分辨力指的是图像中可辨认的临界物体空间几何长度的最小极限, 即对细微结构的空间分辨能力。光衍射理论指出, 当光线通过一个圆形的孔径时会形成所谓的爱里斑, 如图 2, 点光源的像并不是一个单一点。如果有两个点光源距离较近, 两个光源的像就会重叠, 而使得光学系统无法分辨出这两个点光源, 爱里斑的大小决定了光学系统的空间分辨力^[9]。

基于光的衍射理论, 关于空间分辨力有如下两个著名判据, 即式(5)的瑞利判据(Rayleigh Criteria)和式(6)的斯派罗判据(Sparrow Criteria)。

$$D_r = \frac{0.61\lambda}{N.A.} \quad (5)$$

$$D_s = \frac{0.5\lambda}{N.A.} \quad (6)$$

式中: D_r 和 D_s 分别为两种判据公式中的空间分辨力, m; λ 为光的波长, m; $N.A.$ 为数值孔径, 无量纲。

由上述两个判据可见, 空间分辨力取决于入射辐射的波长和显微物镜的数值孔径。

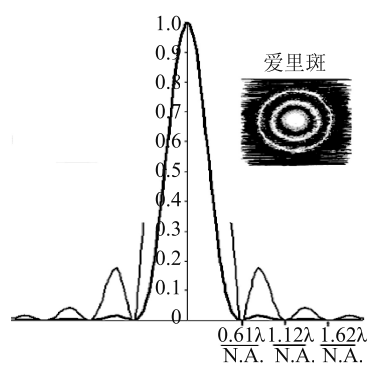


图2 点光源所形成的爱里斑

由于半导体器件温度一般在 300 ℃ 以下，所以近红外波段辐射较弱，一般不用来进行准确的温度测量。用于半导体器件精确测温的焦平面阵列探测器一般是光子探测器，多为 InSb 或 HgCdTe^[10]，适用的波长范围一般在中红外波段(2 ~ 5 μm)或远红外波段(8 ~ 13 μm)^[3]。以 InSb 探测器为例，在空气介质的条件下，显微红外热像仪配备显微镜头一般最大数值孔径为 0.55，则在 2 μm 波长下，其空间分辨力约为 1.9 μm，此时镜头的工作距离仅为 7 mm。当然，还可以采用更大数值孔径的显微物镜进一步实现高空间分辨力，但是，数值孔径越高，工作距离越近，进入热像仪的光强越弱，测温结果误差越大，测温的实用性越来越差，而且在空气介质的条件下，数值孔径始终小于 1，最大空间分辨力也不会高于 1 μm。所以，目前用于半导体器件测温的显微红外热像仪采用的物镜数值孔径一般不超过 0.55。

从空间分辨力的判据可见，空间分辨力的大小与探测器的参数无关。但是，探测器的参数与最终的显微红外热成像质量有着非常密切的关系。

以 InSb 探测器为例，最早的显微红外测温装置受限于探测器的技术水平采用的是单探测器测温，并配备了高数值孔径的显微物镜，但是，其只能得到点测温的结果，并不能将高空间分辨力的图像测量出来^[11]。为了实现高空间分辨力的成像测温，美国 NIST 在 1990 年报道了利用扫描式显微红外热像仪实现最高空间分辨力 15 μm 的温度成像测量^[12]。随着红外 CCD 焦平面阵列探测器生产技术的进步，显微红外热成像技术开始采用阵列式的焦平面探测器，其成像方式也转变为一次性凝视成像，不再需要扫描过程。焦平面阵列探测器经历了一个逐渐发展的过程，其阵列数从 160 × 160^[13]，256 × 256^[14]，512 × 512^[15] 发展到今天

的 1024 × 1024。由于采用阵列式探测器和高数值孔径的显微镜头，显微红外热像仪已经可以实现几个微米的空间分辨力，这对测量结构微小的半导体器件时非常有利的。随着探测器阵列数的增加，显微红外热成像技术的空间分辨力和图像质量越来越高，能够提供更丰富的温度细节信息，目前，最新的显微红外热像仪配备了 1024 × 1024 的探测器，其空间分辨力最高可实现 1.9 μm。表 1 是 1999 年 Grant C. Albright 等在文献[14]中报道的 256 × 256 的 InSb 焦平面探测器显微红外热像仪的空间分辨力。

表 1 不同倍率物镜对应的空间分辨力

镜头倍率	空间分辨力/μm
1/5X	300
1X	60
5X	12
25X	3

所以，高空间分辨力的显微红外热成像技术主要取决于探测器敏感波长、显微物镜的数值孔径及探测器的阵列数。

如果空间分辨力数值大于被测温度点的尺寸，则会造成平均效应而低估最高温度，如图 3，a 为高温区域，c 为低温区域，探测器探测的是整个区域的平均温度，必然会低估 a 区域的温度。

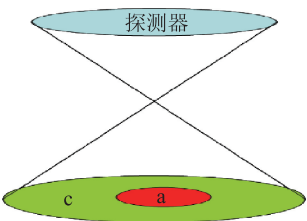


图3 空间分辨力不足时测量误差形成的示意图

在空气介质的条件下，显微红外热像仪配备显微镜头一般最大数值孔径为 0.55，则在 2 μm 波长下，其空间分辨力约为 1.9 μm。Kuball 等人指出^[15]，在检测尺寸小于显微红外热像仪最高空间分辨力的微小结构温度时，红外测温结果会有很大的误差。图 4 的结果显示 3 μm 空间分辨力的显微红外和 0.5 μm 空间分辨力的拉曼技术分别测量某一 GaN HEMT 器件 0.5 μm 宽的栅极发热区域温度相差近 50 ℃，产生这个误差的主要原因就是显微红外热成像技术空间分辨力不足。

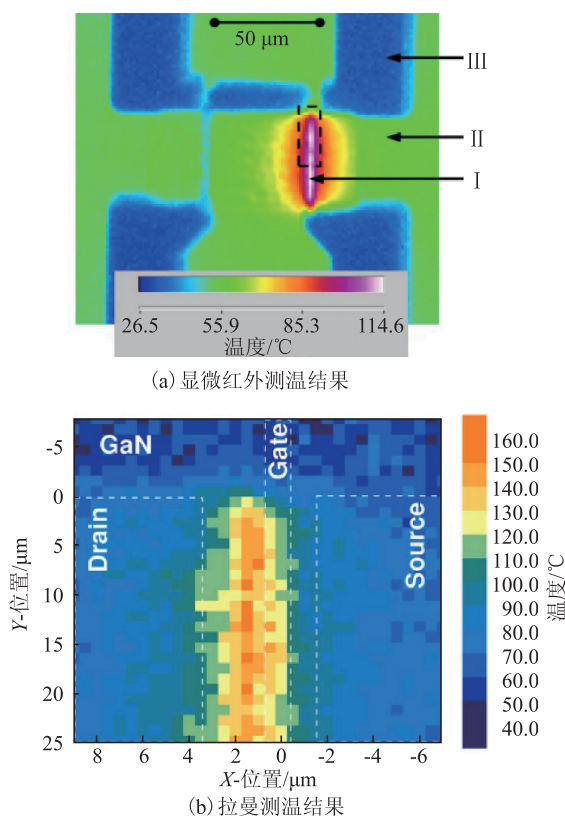


图4 显微红外法与拉曼法测温结果的对比

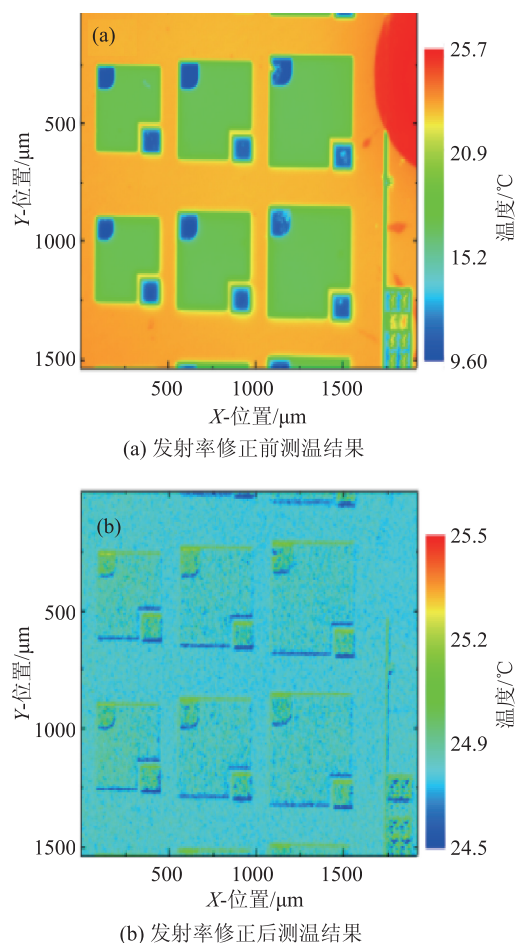


图5 发射率修正前与发射率修正后测温结果对比

2.2 真实温度测量的实现

半导体器件表面材料一般是各种金属和半导体,其发射率都小于甚至远小于1。根据公式(3)必须获取材料的发射率才能进行精确的测温,而半导体器件的材料发射率是未知的,所以测温前必须先测量发射率,这个过程一般称为发射率修正。发射率修正对于半导体器件温度测量是非常重要的^[16]。如果不进行发射率修正,显微红外热成像技术只能测得的被测件表面辐射量的分布,而非温度。2012年Ki Soo Chang等人利用FLIR公司生产的红外探测器对LED的稳态温度进行了检测,图5给出了修正发射率和不修正发射率的对比结果^[17],左图为未进行发射率修正的显微红外测温结果,右图为发射率修正后的显微红外测温结果。可见,如果不进行发射率修正,测量结果与真实温度将会有非常大的误差。

修正发射率最简单的方法是给被测件表面涂一层黑体材料,这种方法不仅为红外测温提供了准确的发射率数据^[18],同时消除了环境背景辐射的影响,准确度较高,但是这种方法会污染被测件,且不可逆转,测量完毕后被测件无法再投入后续应用,这既是成本的浪费也不能满足大规模测量的需要。

后续发展的显微红外热成像技术针对性的提供了实时的发射率修正方法。根据红外测温的原理,将被测件置于不同的台温下,分别测量被测件表面的红外辐射,并与相同温度下黑体辐射对比后,可以根据式(7)得到被测件的发射率^[19]。

$$\varepsilon = \frac{N_{M1} - N_{M2}}{N_{T1} - N_{T2}} \quad (7)$$

式中: N_{M1} 和 N_{M2} 为热像仪在两个不同的温度下接收到的红外辐射, N_{T1} 和 N_{T2} 为热像仪在两个不同温度下测得的黑体辐射。

后来随着半导体器件的尺寸越来越小,在两个不同的温度下进行发射率修正时,温差引入的热膨胀会导致器件的位置发生变化,从而引入误差。为了消除这个误差,最新提出了在一个固定的台温下进行发射率修正的方法^[20],这种方法设计了一个模拟环境温度黑体的装置其辐射量为 N_A ,进行发射率修正前,首先将测量 N_A ,并将这个数据存入计算机,后续测温过程中得到的红外辐射数据首先要减去 N_A 。被测件入射到

热像仪的辐射量如式(4)，则直接用式(4)减去 N_A ，得到式(8)。

$$\begin{cases} N_M = \varepsilon N_T + (1 - \varepsilon)N_A - N_A \\ N_M = \varepsilon N_T - \varepsilon N_A \end{cases} \quad (8)$$

则可以得到发射率的计算公式

$$\varepsilon = \frac{N_M}{N_T - N_A} \quad (9)$$

此时，如果环境温度波动较大，必然会造成发射率修正结果出现明显误差，而影响最终的测温结果。假设环境温度在 20 ℃ 左右，平台温度以最常见的 70 ℃，被测件真实结温为 200 ℃，测温误差随着被测件发射率的变化如图 6 所示。所以，需要根据被测件的发射率合理的控制环境温度。

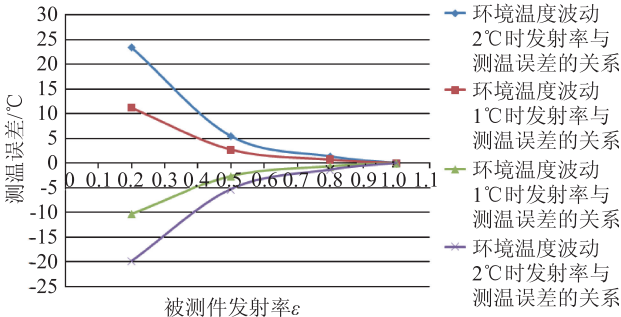


图 6 环境温度波动对不同发射率被测件测温结果的影响

另外，半导体器件本身的红外辐射较弱，如果探测器噪声较大或者灵敏度不够，其测量结果准确度或者温度分辨率会比较差，目前，非制冷式探测器的 NETD 为 80 ~ 200 mK，制冷式探测器则达 10 ~ 20 mK^[3]。因此，用于半导体器件精确测温的焦平面阵列探测器一般是工作在制冷条件下的光子探测器。最常见的探测器制冷方式就是液氮制冷^[21]。

3 显微红外热成像技术的典型应用

显微红外热成像技术发展初期，受限于探测器性能以及数据采集装置及数据处理技术的限制，仅能实现对稳态温度信号的成像式测量；后来，一方面得益于探测器技术的进步，另一方面，高速数据采集装置和锁相放大算法等新技术的应用，显微红外热成像技术时间分辨率逐渐提高，已经能够测量微秒量级变化的动态温度信号。这些测温能力很好的满足了不同半导体器件的需求，得到了广泛的应用。

3.1 测量半导体器件的稳态温度

由于焦平面红外探测器的帧频较慢，一般在 100 Hz 以下，不适合用于高速变化的温度信号的检测，

因此，显微红外热成像技术最广泛的应用是测量半导体器件的稳态(直流或连续波)温度信号。

2006 年 Singhal S 等人利用稳态成像功能测量了一款 GaN HEFT 器件在直流和射频条件下的温度^[22]，图 7 是射频条件下测得的器件温度分布。

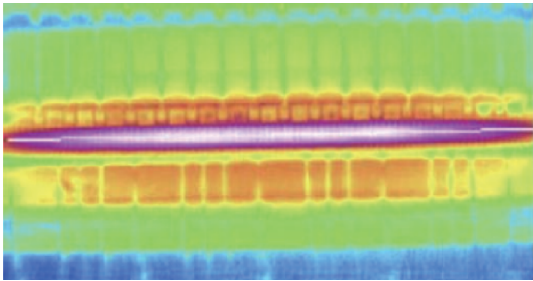


图 7 射频条件下 GaN HEFT 的显微红外温度图像

现在很多半导体器件，如 GaAs 微波功率器件，GaN 微波功率器件，其发热区域都在 1 μm 以下，而显微红外热像仪最高空间分辨力为 1.9 μm。因此，空间分辨力成为制约显微红外热像仪在宽禁带微小结构半导体器件温度检测方面应用的主要因素。

鉴于空间分辨力的不足，显微红外热成像技术最新的发展动向是与有限元仿真工具结合，用大区域的显微红外测温数据修正仿真参数，用仿真结果给出微小区域的真实温度。2009 年 A. Prejes 等利用 ANSYS 有限元仿真与显微红外测温技术结合给出了某 GaN HEMT 器件上 0.4 μm 宽的发热区域的温度数据，如图 8 所示。有限元仿真结果峰值结温约 254 ℃ 比 7 μm 空间分辨力的红外测量结果 210 ℃ 高 44 ℃^[23]。

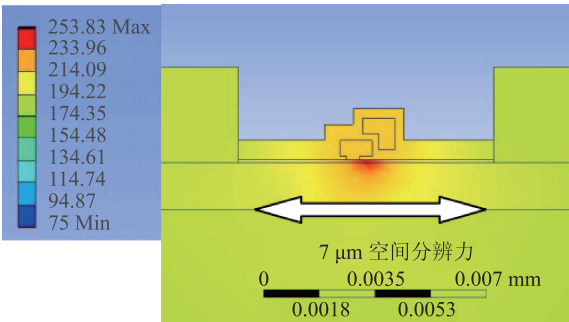


图 8 A. Prejes 等基于红外测温的有限元仿真结果

此外，显微红外热成像技术在国内也得到了非常广泛的应用。如：王因生等人利用稳态温度成像功能测量了 L 波段硅脉冲功率管的结温，以进行寿命评估^[24]；房迅雷等利用该技术测量了微波多芯片组件的温度情况^[25]；郭春生等对 GaN HEMT 进行了多种功率

条件下的结温测量^[26]，等。

3.2 测量半导体器件周期性变化的温度

除了稳态温度，半导体器件尤其是大功率器件还经常会工作在周期性温度变化的条件下。测量周期性温度变化也是非常重要的。

2001 年 Grant Albright 等人对稳态显微红外热成像技术进行了改进，依靠探测器本身的帧频进行连续的图像采集，实现了对以 0.5 Hz 频率温度变化的半导体器件连续的温度成像检测^[27]，图 9 是不同时刻测得的器件的温度分布图像。

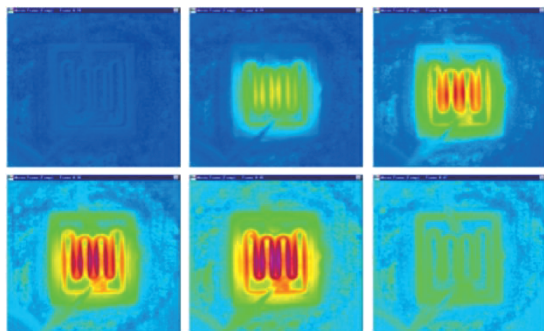


图 9 低速连续成像测温结果

但是，探测器本身的帧频是无法对以微秒级速度变化的温度信号进行有效数据采集的，为了满足对脉冲条件下器件高速变化的温度检测需求，quantum focus 公司开发了具备单探测器高时间分辨率测温功能的 InfraScope II 型显微红外热像仪，响应时间在几十个微秒。图 10 是 2007 年 M. Mahalingam 等用该型热像仪对典型硅基微波功率器件测量得到的脉冲条件下器件温度变化曲线^[28]。

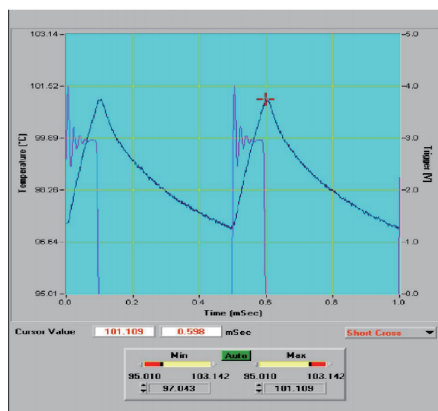


图 10 脉冲条件下的显微红外单点温度测量结果

3.3 测量半导体器件非周期性变化的温度

除了稳态温度和周期性温度，还经常需要对半导体

器件进行非周期性动态温度检测，如器件的失效过程等。

2008 年 Robert Furstenburg 等人以 FLIR 公司的红外探测器为基础自制了一套显微红外热像仪，对微小预浓缩器进行了稳态和动态的温度成像测量^[29]，图 11 是测得不同时间的温度分布图像。

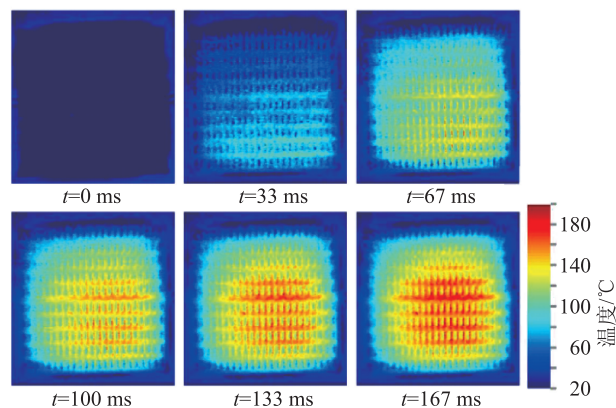


图 11 微小预浓缩器的连续显微红外图像

2014 年 E. Miranda 等人对 FLIR 的 Merlin-MID 显微红外热像仪进行了改进，开发了外部同步逻辑模块，对一款 MIM 电容实现了最高采样频率 100 kHz 的连续成像测量。这是迄今为止关于红外成像测温速度最高的报道^[30]，测量结果如图 12。

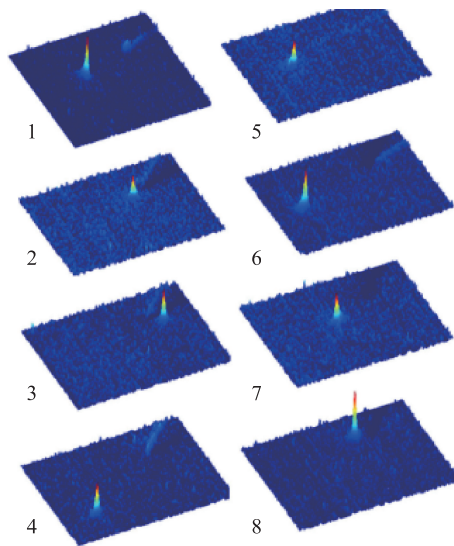


图 12 不同时刻电容的红外成像结果

4 总结与展望

半导体器件温度测量领域应用的显微红外热成像技术最突出的特点是较高的空间分辨率和基于发射率修正的真实温度测量。同时，该技术已具备稳态温度

测量、周期性温度测量和非周期性温度测量等能力。

近些年来国内部分科研人员^[31-32]认为基于非制冷式探测器的低成本显微红外热成像技术是一个重要的发展方向,以高美静等为代表的研究人员开展了此类研究,其报道的最高空间分辨力为 $15\text{ }\mu\text{m}$ ^[33],但是,仅空间分辨力一项就远不能满足半导体器件测温的需要,还没有实际应用的报道。另外,研发空间分辨力更高的拉曼测温技术^[34]和可见光热反射测温技术^[35]成为半导体器件光学测温技术的重要发展方向,但是,目前这些技术测试效率低、系统复杂、操作难度大,在真正的工业生产的应用还有很长的路要走。

综合国内外大多数技术文献,半导体器件测温用制冷式显微红外热成像技术经历了一个逐渐发展完善的过程。目前,该类技术主要采用中红外波段和远红外波段进行测量,其在空气介质中的空间分辨力极限是 $1\text{ }\mu\text{m}$,相对于目前已经投入工业应用的 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ 而言提高的余地已经不大,有鉴于空间分辨力对半导体器件测温准确度的重要性,显微红外热成像技术发展的一个主要趋势是与有限元仿真结合实现对低于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的结构温度测量。另一方面,为了满足越来越多的高速变化的温度信号测量需求,提高显微红外热成像技术的时间分辨力也是一个重要的发展方向。

可以预见,在未来很长时间内基于制冷式探测器的显微红外成像技术仍将在半导体器件尤其是大功率、宽禁带器件温度测量方面发挥不可替代的作用。

参 考 文 献

- [1] Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium[C]//Dallas, TX, USA, 2006: 199-204.
- [2] Blackburn D L. Blackburn Temperature Measurements of Semiconductor Devices-A Review [C]//IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2004, 20: 70-80.
- [3] 蔡涛,段善旭,康勇. 半导体器件热特性的光学测量技术及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(6): 51-58.
- [4] Ailani S R, Yagoub M C E. Review of Non Contact Thermal Mapping Methods for Electronic Systems Application [C]//2008 International Symposium on Telecommunications, 2008: 821-824.
- [5] 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.
- [6] 陈波若. 红外系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [7] McDonald J D. Optical Microscopy[EB/OL]. <http://www.molecularexpressions.com>. 2004.
- [8] JEP138 User Guidelines for IR Thermal Imaging Determination of Die Temperature [S].
- [9] 翟玉卫,梁法国,刘岩,等. 空间分辨力对半导体器件光学测温结果的影响[J]. 红外, 2016, 37(11): 36-41.
- [10] McDonald J D, Albright G C. Microthermal imaging in the infrared [J]. electronics cooling, 1997, 3(1): 26 - 29.
- [11] Lidback C A. Scanning Infrared Microscopy Techniques for Semiconductor Thermal Analysis [C]// Reliability Physics Symposium, 1979: 183-189.
- [12] Hefner A, Berning D, Blackburn D, et al. A High-Speed Thermal Imaging System For Semiconductor Device Analysis [C]//IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2001: 43-49.
- [13] 何晓琦,费庆宇. 半导体器件与 IC 失效分析的有力工具——介绍显微红外热像仪 InfraScope 和光辐射显微镜 EMM1630 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1996(2): 60-61.
- [14] Albright G C, Stump J A, McDonald J D, et al. True Temperature Measurements on Microscopic Semiconductor Targets [C]//In Proc. SPIE Thermosense XXI, 1999, 3700: 245 - 250.
- [15] Lény Baczowski, Dominique Carisetti, Jean-Claude Jacquet, et al. Thermal Characterization of High Power AlGaIn/GaN HEMTs Using Infra Red Microscopy and Thermoreflectance [C]// International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, 2014: 1-6.
- [16] Andrei Sarua, Hangfeng Ji, Martin Kuball, et al. Integrated Micro-Raman/Infrared Thermography Probe for Monitoring of Self-Heating in AlGaIn/GaN Transistor Structures [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006, 53 (10): 2438-2447.
- [17] 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): 45-48.
- [18] Chang K S, Sun C Y, Kim J Y, et al. Precise Temperature Mapping of GaN-Based LEDs by Quantitative Infrared Micro-Thermography [J]. Sensors 2012, 12(4): 4648-4660.
- [19] GJB 548B-2005 微电子器件试验方法和程序[S]. 2005.
- [20] 郑世棋,翟玉卫,刘霞美. 微电子器件红外测温中发射率测量方法研究[J]. 红外, 2015, 36(9): 25-29.
- [21] Kuball M, Sarua A, Ji H, et al. Integrated Raman - IR Thermography on AlGaIn/GaN Transistors[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2006: 1339-1342.
- [22] Singhal S, Li T, Chaudhari A, et al. Reliability of Large Periphery GaN-on-Si HFETs [J]. Microelectronics Reliability, 2005, 46(8): 1247-1253.
- [23] Prejs A, Wood S, Pengelly R, et al. Thermal analysis and its application to high power GaN HEMT amplifiers [C]// MTT '09. IEEE MTT-S International. Microwave Symposium Digest,

- 2009: 917-920.
- [24] 王因生, 陶有迁, 徐全胜, 等. L 波段硅脉冲功率管 52000 器件小时的脉冲射频加速寿命试验[J]. 固体电子学研究进展, 2011, 31(5): 473-477.
- [25] 房迅雷, 姜伟卓, 严伟. 红外热像技术在微波多芯片组件中的应用[J]. 现代雷达, 2004, 26(1): 68-70.
- [26] 郭春生, 李世伟, 任云翔, 等. 加载功率与壳温对 Al-GaN/GaN 高速电子迁移率晶体管器件热阻的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 265-270.
- [27] Mahalingam M, Mares E, Brakensiek W, et al. High Power Microwave Device Temperature Measurement -Methodology and Applications for Pulsed Devices [C]//2007 IEEE MTT-S International, 2007: 1189-1192.
- [28] Furstenberg R, Kendziora C A, Stepnowska S V, et al. Infrared micro-thermography of an actively heated preconcentrator device[Z].
- [29] Albright G C, Stump J A, Li C P, et al. Emissivity Corrected Infrared Thermal Pulse Measurement on Microscopic Semiconductor Targets[C]//Proc. SPIE, 2001, 4360: 103 - 111.
- [30] Miranda E, Riccio M, Falco G D, et al. Assessing the Spatial Correlation and Conduction State of Breakdown Spot Patterns in Pt/HfO₂/Pt Structures Using Transient Infrared Thermography[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(17): 174502-174502-6.
- [31] 高美静, 许杰, 金伟其, 等. 显微热成像技术研究现状与展望[J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 13-18.
- [32] 岳静静, 吴之茂, 木二珍, 等. 红外显微热成像系统研究及应用[J]. 红外技术, 2017, 39(11): 973-978.
- [33] 高美静, 范祥瑞, 顾海华, 等. 电子器件无损检测光学微扫描显微热成像系统[J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 779-784.
- [34] 杨丽媛. 氮化镓基 HEMT 器件高场退化效应与热学问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 69-104.
- [35] Maize K, Pavlidis G, Heller E, et al. High Resolution Thermal Characterization and Simulation of Power AlGaIn/GaN HEMTs Using Micro-Raman Thermography and 800 Picosecond Transient Thermoreflectance Imaging [C]// Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. IEEE, 2014: 1-8.

收稿日期: 2018 - 05 - 28

基金项目: 国家技术基础科研项目

作者简介

翟玉卫(1983 -), 男, 河北石家庄人, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事电磁类仪器计量和半导体器件温度检测技术与可靠性分析研究。



梁法国(1965 -), 男, 山东聊城人, 研究员, 硕士, 主要从事微电子计量测试研究。

