文章编号: 1672-8785(2016)11-0036-06

空间分辨率对半导体器件 光学测温结果的影响

翟玉卫 梁法国 刘 岩 郑世棋 (中国电子科技集团公司第十三研究所,石家庄 050051)

摘 要:从空间分辨率的定义出发,指出物镜的数值孔径和光的波长是决定光学仪器 空间分辨率的主要因素。给出了空间分辨率影响半导体器件结温检测结果准确度的原 理。对 GaN HEMT 进行了不同空间分辨率下的显微红外温度检测,较低空间分辨率下 的测温结果低于高空间分辨率下的测温结果,证明空间分辨率的不足会导致温度测量 结果偏低。

关键词: 空间分辨率; 数值孔径; 温度检测; 半导体器件

中图分类号: TN304 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.11.007

Influence of Spatial Resolution on Optical Temperature Measurement Results of Semiconductor Devices

ZHAI Yu-wei, LIANG Fa-guo, LIU Yan, ZHENG Shi-qi (The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: From the definition of spatial resolution, it is pointed out that the numerical aperture of an objective lens and the wavelength of light are the main factors for determining the spatial resolution of optical instruments. The principle that the spatial resolution affects the measurement accuracy of the junction temperature of semiconductor devices is given. Microscopic infrared temperature detection is conducted on GaN HEMTs at different spatial resolution. The temperature measurement results obtained at lower spatial resolution are less accurate than those obtained at high spatial resolution. This shows that insufficient spatial resolution may result in less accurate temperature measurement results.

Key words: spatial resolution; numerical aperture; thermal measurement; semiconductor device

0 引言

基于光学原理的温度检测技术已经在半导体器件温度测量领域得到了广泛应用,尤其是 对工作在大功率条件下的器件,光学温度检测技术已经不可或缺。采用光学原理的温度检测装 置主要有显微红外测温仪器、拉曼测温仪器及 可见光热反射测温仪器^[1]。此类仪器的突出优势是非接触测温,不会影响被测器件或产品的工作状态,可以检测器件表面的温度分布,测试结果直观。国内外的半导体器件研制单位都已 广泛采购该类仪器进行器件的温度检测,并对各种仪器检测半导体器件的准确度及其影响因

收稿日期: 2016–09–09

E-mail: kaoyan071@126.com

作者简介:翟玉卫(1983-),男,河北晋州人,硕士,工程师,主要从事半导体器件可靠性检测与分析研究。

素进行了大量研究。

文献 [2-4] 指出在利用光学测温仪器对发热 结构微小的半导体器件进行温度检测时,空间 分辨率是制约其测温准确度的主要因素之一。 但这些文献没有具体给出决定光学仪器空间分 辨率的因素,也没有分析空间分辨率影响结温 检测准确度的原理。

对空间分辨率认识的不足会直接影响光学 测温仪器的选型、采购及结温检测结果的准确 性。本文将重点对影响光学测温仪器空间分辨 率的因素进行分析,对空间分辨率影响测温结果 准确度的原理进行探究。

1 决定光学测量仪空间分辨率的因素

空间分辨率指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在孔径的边缘发生弯曲而引发光线衍射,衍射造成点光源发出的光会在孔径内以特有的模式传播,形成所谓的爱里斑,如图1 所示,点光源的像并不是一个单一的点。如果两个点光源距离较近,两个光源的像就会重叠,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率。





基于光的衍射理论,关于空间分辨率有两 个著名判据,即瑞利判据 (Rayleigh Criteria)和斯 派罗判据 (Sparrow Criteria)^[5]。

http://journal.sitp.ac.cn/hw

$$D_r = \frac{0.61\lambda}{N.A.} \tag{1}$$

 $D_s = \frac{0.5\lambda}{N.A.} \tag{2}$

式 (1) 为瑞利判据,式 (2) 为斯派罗判据。 D_r 和 D_s 分别为两种判据公式中的空间分辨率,单位 为m; λ 为光的波长,单位为m; N.A.为数值 孔径,无量纲。

图 2 给出了符合两种判据的情形。图 2 的 左边部分为瑞利判据,图 2 的右边部分为斯派 罗判据。瑞利判据认为,当两个光源的距离小于 *D_r*时,光学系统就无法分辨这两个光源,此时 光学系统的空间分辨率为 *D_r*。斯派罗判据认为 当两个光源的距离小于 *D_s*时,光学系统就无法 分辨这两个光源,此时光学系统的空间分辨率 为 *D_s*。很明显,*D_r* > *D_s*,所以衡量或者对比 不同光学仪器的空间分辨率指标时,必须采用 相同的判据。



图 2 瑞利判据和斯派罗判据

根据上述两个判据,空间分辨率的大小只 与光线的波长及物镜的数值孔径有关,与所用物 镜的放大倍数无关。一旦波长与数值孔径确定, 放大镜的倍数再大也不能提高空间分辨率。

1.1 物镜的数值孔径对空间分辨率的影响

数值孔径 (Numerical Aperture, N.A.) 指被测物体与物镜间的媒质的折射率 *n* 与 1/2 物镜孔径角的正弦值的乘积,一般简写为 N.A.。数值孔径的定义如图 3 所示。

INFRARED (MONTHLY)/VOL.37, NO.11, NOV 2016



图 3 数值孔径的定义

对于常规的光学测温仪器,介质多为空气, n为1。也就是说,在传播媒质为空气的情况下, 数值孔径的极限值为1,此时要求镜头距被测物 体无限近,但在实际测试过程中这是不可能实 现的。而且,镜头的数值孔径越高,其成本就越 高。 所以一般的光学测温仪器都会在镜头的工作距离、数值孔径方面折中处理,用到的数值孔径最大值多在 0.9 以下,红外一般最大到 0.5,数值孔径是限制光学测温仪器空间分辨率的一个主要因素。

1.2 波长对光学测温仪器空间分辨率的影响

根据空间分辨率的两个判据,对于数值孔 径一定的物镜,空间分辨率与波长成正比。由于 大气透射的原因,用于半导体器件温度检测的绝 大多数光学测温仪器都只对某一或某些波段的 光敏感,如显微红外热像仪只对中红外波段 (2 μm~5 μm)和远红外波段的 (8 μm~12 μm) 波段 的红外辐射敏感^[6],如图 4 所示。拉曼光谱测 温仪器则只能测量某一固定波长如 585 nm 的可 见光。



图 4 红外热像仪的敏感波段

设红外热像仪的敏感波段为 2 μm~5 μm, 配备 N.A. 为1 的物镜。根据斯派罗判据,其最 高空间分辨率为1 μm,具体计算为

$$\frac{0.5 \times 2\mu \mathrm{m}}{1} = 1\mu \mathrm{m} \tag{3}$$

实际上,由于数值孔径不可能为1,而且测 温仪器的性能必然低于理论极限值,商用的显 微红外热像仪的最高数值孔径为0.5,其空间分 辨率为2.8 μm。敏感波长为585 nm 的拉曼测温 仪的最高数值孔径为 0.9,最高空间分辨率约为 1 μm。敏感波长为 400 nm 的可见光热反射测温 仪器的最高数值孔径为 0.9,最高空间分辨率为 300 nm。

1.3 光学系统的其它参数与空间分辨率的关系

对光学测温仪器而言,还有两个非常重要的参数,一个是放大倍率,一个是像元尺寸。这 两个参数会影响光学仪器检测结果的质量。一方 面,由空间分辨率的定义可见,除了数值孔径与 光源波长外,光学系统的放大倍率、像元尺寸等 关键参数与空间分辨率没有直接的关系。另一 方面,对于具有成像能力的光学仪器,其探测器 的性能和镜头放大倍率会对成像结果的清晰度 产生影响。任何一种成像系统的探测器都有一 个分辨极限,如人眼在 250 mm 观测距离上的分 辨极限是 76 μm。这个极限由像元间距决定。

以两个点光源为例,如图 5 所示,黑框代表 一个像元,虽然光学系统的空间分辨率大于两 个点光源的间距,但是由于放大倍率不足或者像 元尺寸过大,两个点光源的像落在一个像元上, 这个像元只能输出一个信号,所以它无法区分 开两个点光源,此时需要增大放大倍率或缩小像 元的尺寸。图 6 中,合适的放大倍数使最小可分 辨单元的像落在三个像元上,通过测量三个像元 的不同信号就可以明确分辨出两个点光源。但 是,当光学仪器的空间分辨率不足以分辨两个 光源时,即使增大放大倍率,缩小像元尺寸,光 学仪器仍然不能分辨小于空间分辨率尺寸的两 个光点,如图 7 所示。

所以,对于空间分辨率确定的光学成像仪器,通过提高镜头的放大倍率和缩小探测器像 元的尺寸可使得到的图像的细节显示更清晰, 便于观察,但并不能改变空间分辨率的值。对于 小于空间分辨率的光源,无法通过增加放大倍 率的方法清晰分辨,而且镜头的倍率越大,其接 受的光学信号越弱,所以选择合适的镜头倍率 使光学测温仪器能清楚显示出最小分辨单元就 可以了。盲目追求放大倍数不仅无助于提高对 微小细节的分辨能力,反而会降低测量的准确 度。



图 5 放大倍率不足的情况



图 6 放大倍数足够的情况



图 7 放大倍率足够但是空间分辨率低的情况

2 空间分辨率影响测温结果准确度的 原理

在对半导体器件等微小发热结构进行温度 检测时,需关注半导体器件微小结构的真实温 度。仪器空间分辨率的不足会造成小面积发热源 温度的平均,从而低估实际温度。

设区域 a 为发热单元,其温度均匀分布, 假设为 m ℃。区域 c 为环绕区域 a 的非发热部 分,温度均匀分布,假设为 n ℃,忽略热传导。 如果选用的红外热像仪的空间分辨率足够高, 能够分辨 a 区域,如图 8(a)所示,此时测得的温 度应为 m ℃;如果热像仪的空间分辨率不能分 辨 a 区域,而只能分辨 b 区域,如图 8(b)所示, 此时热像仪获取的温度将是 b 区域的温度,低 于 m ℃,而非 a 区域的真实温度。而 a 区域的真 实温度才是最重要的结果。

对于大功率 GaN HEMT 类的半导体器件, 其发热结构通常很小,如图 9 所示^[7]。此时, 如果光学测温仪器具备 7 µm 空间分辨率,则其 温度检测结果为 165 ℃,如仪器的空间分辨率为 1 µm 以上,温度检测结果为 175 ℃。可见对于 GaN HEMT 而言,空间分辨率越高,测温的准确 度就越高。



图 8 (a) 低空间分辨率红外热像仪的成像示意 图 (b) 高空间分辨率红外热像仪的成像示意图 利用显微红外热像仪对同一 GaN 器件在 相同工作条件下进行不同空间分辨率的温度测 试,其结果如图 10 所示。图 10(a) 是 25 μm 空间 分辨率下的测量结果,图 10(b) 是 7 μm 空间分 辨率下的测试结果。由图可见,随着红外热像仪 空间分辨率的提高,不仅器件的发热细节更加 清晰,测得的最高温度也变高了。结合图 9 的结 果,说明检测结果的准确度提高了,这也证实了 空间分辨率的重要性。



图 9 典型 GaN HEMT 的温度分布图



鉴于光学测温仪器的空间分辨率对半导体器件测温准确度有重要的影响,为了尽可能地 消除或者降低空间分辨率的影响,应根据被测件 结构的具体尺寸*l*合理选择空间分辨率*r*。一般 有以下两种情况:

第一,在空间分辨率足够的情况下,一般要 保证 *r* ≤ *l*,以保证测温结果不会由于空间分辨 率不足而被低估。

第二,当仪器的空间分辨率无法满足 r ≤ l 时,应选择最高的空间分辨率进行温度测量,再 采用文献 [7] 中提到的有限元仿真方法或者类似 的技术对结果进行修正。

值得注意的是,空间分辨率只要足够就可 以,不要盲目追求高分辨率。根据 1.3 中的分 析,空间分辨率越高,光强就越弱,成像质量就 越差。而且对于光学仪器,空间分辨率越高,测 试时间就越长,效率就越低。

3 结束语

在半导体器件温度检测领域,基于光学原 理的检测仪器的空间分辨率是影响测温准确度 的重要因素。影响光学系统空间分辨率的主要 因素是敏感波长和物镜的数值孔径。放大倍率和 像元尺寸只能提高图像的清晰度以及增大被测物在图像中所占的面积,对空间分辨率没有影响。空间分辨率不足会导致微小结构的温度被低估。对 GaN HEMT 大功率器件的显微红外温度检测结果证明了上述分析。

参考文献

- [1] 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.
- Sarua A, Bullen A, Haynes M, et al. High-Resolution Raman Temperature Measurements in GaAs p-HEMT Multifinger Devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(8):1838–1842.
- 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.
- [1] 翟玉卫,梁法国,郑世祺,等.用热反射测温技 术测量 GaN HEMT 的瞬态温度 [J].半导体技 术,2016,41(1):43-47.
- McDonald J. Optical Microscopy. [G]. 美国 QFI 公司, 2004.
- InfraScope Thermal Mapper User's manual. [G]. 美国QFI公司, 1996.
- CREE Inc. Thermal performance guide for high power SiC MESFET and GaN HEMT transistors
 [G].USA: CREE Inc,2009:1–3.

新闻动态 News

美国哈里斯公司推出低照度作战 功能增强的双筒夜视望远镜

据 www.militaryaerospace.com 网站报 道,纽约州罗切斯特市的哈里斯公司夜视业务 分部推出了 F5032 型轻型夜视双筒望远镜,以增 强作战人员夜间和微光时的视觉能力,同时减 少执行任务时的眼疲劳感。

哈里斯 F5032 型 25cm 望远镜的近景对焦功 能使用户能完成以前在战场上不可能完成的任 务。双筒具有可调屈光度的固定镜片,在个人需 求或特定任务要求下不需要改变静态镜头。有 了此功能,用户便可以通过调整镜头来减少眼睛的疲劳感。

哈里斯护目镜包括一个集成的红外照明器,战士不需要另外携带照明灯。该照明器的 图像增强功能使士兵在光线微弱甚至没光线的 战斗场景下能比以往任何时候更有效地执行任 务,而且可以对单元级的灯元进行更换。

"这款轻质哈里斯双筒望远镜的功能比其 他任何型号望远镜多,"哈里斯夜视业务副总裁 兼总经理埃里克·福克斯说。这是最近哈里斯和 美国 Exelis 公司合并生产的第一批夜视产品之 一。

口张小华