

功率器件瞬态热特性的激光探针无损测试*

曾绍群 徐海峰 刘贤德 李再光

(华中理工大学光电子系, 武汉 430074)

摘要 报道了一种弱相干激光干涉测温方法,以 $1.3\ \mu\text{m}$ InGaAsP 半导体激光为微探针,实时测量了功率晶体管内部结点的瞬态热特性,该方法具有响应速度快、完全非侵入性、空间分辨率高、测温范围广等优点,适合于测试 Si、GaAs、InP 等材料的功率电子和光电子器件的瞬态热特性。

关键词 激光干涉测温,热测试,功率器件热分析

1 引言

工作温度是功率半导体器件的一个重要参数,器件性能以及失效率等都与之密切相关。随着高速半导体器件和集成电路的发展,器件工作频率逐渐提高,功率日益增大,其热效应日趋严重,对器件热设计、热测试提出了更高的要求。然而传统的电学敏感参数法^[1,2]测量器件断电后某时刻的温度推导得到通电时的温度,对高频器件误差较大,并且不能探测芯片内部结点的热状态。红外扫描微像仪^[1,2]虽能测得芯片的热分布,但测量准确度受到表面发射率以及背景辐射的影响,同时,空间分辨率也难以提高。液晶测温法^[3]则需在芯片表面涂覆液晶层,破坏器件实际工作状态,且测温范围有限。为此人们一直在探索用于半导体芯片热测试的光探针无损检测技术^[4]。

最近,激光干涉测温方法用于薄膜材料与半导体芯片生产制作过程中实时监测温度变化、等离子体蚀刻速率变化等,取得了较好结果^[5,6]。本文将光学弱相干层析^[7]与激光干涉测温结合,研究了一种适于测试功率半导体器件热特性的激光无损探针。理论与实验均表明,该探针能够实时测量器件工作时内部结点的热特性而不影响器件的工作状态,具有空间分辨率高(可达微米量级)、测温范围广(远大于半导体器件工作温度范围)等优点,适用于测试 Si, GaAs, InP 等材料的电子和光电子器件,为功率器件及集成电路的热设计提供了有力的测试工具。

2 测温原理

首先考虑波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 激光束入射 Si 双极型功率晶体管芯片,芯片-热沉界面反射光波相位的变化。器件处于工作状态时,芯片中存在电场强度、载流子浓度、温度的扰动,这三个因素都会影响 Si 材料的折射率(芯片为其它半导体材料如 GaAs, InP 时也一样),温度变化还会

* 国防预研基金资助项目。

收稿日期: 1995年9月22日; 收到修改稿日期: 1996年4月24日

引入较大热膨胀,由此引起反射光相位的变化。研究表明样品为高频功率管时,对波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 光波,电场强度、载流子浓度对光程的影响远低于温度调制的影响,因此以下仅考虑温度变化引入的光程变化。由于器件工作时温度变化范围不大,可进一步假设折射率、膨胀系数与温度间存在线性变化关系^[8]。

器件工作时厚度方向存在温度梯度分布,因而折射率变化是不均匀的,设厚度方向温度增量分布为 $T(z)$,则由之产生的探测光相位变化 ϕ 为:

$$\phi = 2m \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \int_0^l n(T, z) dz \quad (1)$$

式中 m 为探测光在芯片 - 热沉界面反射次数, λ 为探测光波长, l 为芯片厚度, n 为样品折射率。由此可求得厚度方向平均温升 \bar{T} 为:

$$\bar{T} = \frac{\phi}{m \cdot n_0 \cdot l_0 (A + a) \cdot 4\pi/\lambda} \quad (2)$$

式中 A, a 分别为线性折射率 - 温度系数及热膨胀系数。因此,采用双光束干涉方法测量器件工作时探测光相位的变化,可实时测得芯片平均温升随时间变化关系,从而测得器件的瞬态热特性。让芯片在样品平面内扫描的同时,记录干涉信号可获得芯片的二维热分布,从而确定芯片的热不均匀性。

由于硅芯片对 $1.3 \mu\text{m}$ 入射光吸收极小,可认为是透明的,测得的干涉信号中会含有各界面反射光的影响,特别是芯片前后表面多次反射光会严重影响测量信号,这使得对相位变化 ϕ 的精确测量难以进行。根据光学弱相干层析原理^[7],采用弱相干源能够有效地抑制背景光。此时反射光与参考光产生的干涉信号为:

$$I = I_0 + I_1 \cdot \Gamma(\tau) \cdot \cos(\phi) \quad (3)$$

式中 I_0 为背景光强, I_1 为两光束相位完全匹配时干涉信号幅值, $\Gamma(\tau)$ 为光源自相干函数, $\tau = \phi/2\pi\nu$ 为相应的时延, ν 为光源频率。(3) 式表明干涉信号受到光源自相干函数的调制,当两光束相位失配较大时,干涉信号急剧下降。因此适当选择光源,调节参考镜位置,可选择所需反射光进行测量。

3 实验及其结果

图 1 为根据上述原理设计的弱相干激光测温系统,其核心是迈克尔逊干涉仪。He-Ne 激光

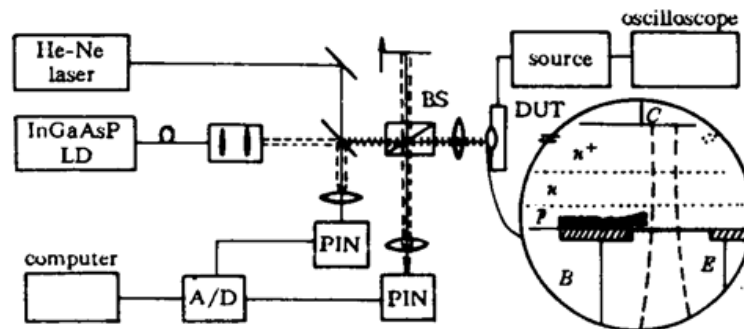


Fig. 1 Schematic diagram of the low-coherence laser interferometric temperature measurement system.

The inser is the configuration of the wafer under test and the probe beam

用于辅助光路调整。InGaAsP 激光二极管为检测光源, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda \sim 4 \text{ nm}$, 尾纤输出功率

~2 mW。去掉顶盖的功率晶体管取代一个反射镜,聚焦激光束(半宽度约 10 μm)透过芯片电极间隔中的薄膜(SiO_2 等)入射芯片,图 1 中插图为功率晶体管芯片结构及探测光束的放大示意。调节参考镜的位置,选择芯片-热沉界面的某一级次反射光进行测量,以获得最佳测试灵敏度。调节好光路之后,待测器件通电进入工作状态,温度变化引起探测光相位变化。高灵敏度、宽动态范围的 PIN-FET 组件记录干涉光强的变化,信号经过处理进入计算机。由(3)和(2)式即可求得芯片在测量点处的温度变化。

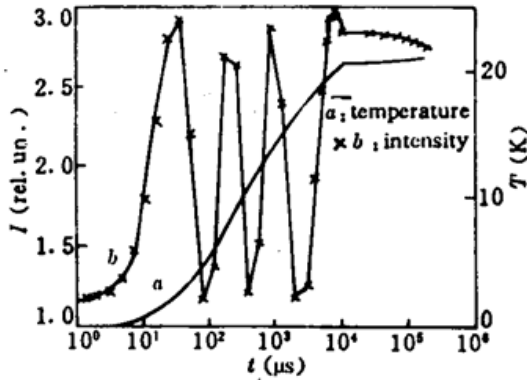


Fig. 2 The rising process of the transient thermal response in a power transistor

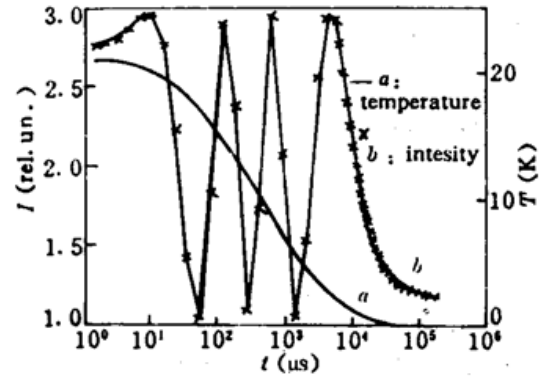


Fig. 3 The descending process of the transient thermal response of a power transistor

图 2, 3 为实时测得的功率晶体管瞬态热特性。图中曲线 b 为实测干涉光强变化, a 为由(3), (2)式计算得的芯片平均温度变化。由于瞬态过程中测试信号变化极快,图中时间轴采用指数坐标。图 2 为通电瞬间芯片温度上升过程,至稳态时,温度上升 21.2 K;图 3 为关断电源时温度下降过程。由图可知在通电或断电瞬间,测量信号变化极快,然后逐渐慢变化(数毫秒以后),最后趋于稳态值。这与理论分析结果完全一致。在通电瞬间,器件开始工作,热耗散使得芯片温度急剧上升,引起测试信号的剧变。当有源区产生热量逐渐与热沉散热量平衡时,芯片温度趋于稳态值,探测光光程变化极小,因此测量信号趋于稳定。

图 3 还表明,在关断数十微秒之后,芯片温升下降为峰值温升的 1/2,这证实了用热敏参数法测量器件工作温度时必须进行修正^[2]。

4 讨 论

对于激光干涉测温,通常考虑三种因素对灵敏度的影响,即系统等效噪声功率、A/D 转换器读数误差和非线性效应。当系统的等效噪声功率远小于信号功率时,可不考虑其影响。我们的系统中窄带等效噪声功率小于 0.2 nW,远小于信号功率(微瓦级),因此可忽略其影响。

由于相位的测量是利用正弦信号或余弦信号采样值进行,因此要考虑 A/D 转换器对正弦或余弦信号的分辨能力。实验中所用的为八位 A/D 转换器,相位测量差 $\Delta\phi < 7.2^\circ$ 。若不考虑其它因素造成的测温误差,由(2)式可求得上述测相误差在 $m = 2$ 时,测温误差为 0.25 K。虽然增大 m 有利于提高测量精度,但也会降低信噪比,不利于测量。因此要根据实际情况进行选择。我们的实验中取 $m = 4$,相应误差为 0.1 K。

式(2)中仅考虑了折射率及热膨胀系数与温度的线性变化关系。事实上忽略折射率、厚度与温度变化量之间的非线性关系时,会引入部分测量误差。考虑二次效应时引入的相对光程误

差为:

$$E = (B + b)\bar{T}/(A + \alpha) \quad (4)$$

式中 B, b 分别为折射率、热膨胀与温度变化量的二次系数。取文献[8]的研究结果代入(4)式可求得 $E \sim 0.07T\%$, 因此测温绝对误差为 $\Delta T = 0.7 \times 10^{-3}T^2$, 即误差与平均温升 T 有二次关系。图2中测得的稳态温度为 21.2 K, 对应误差为 0.3 K。因此当器件功率较大, 温升较高时, 应考虑非线性项的影响。对于要求极高的精确测量, 可由实际样品实测折射率-温度系数及热膨胀系数定标。

致谢 感谢石家庄十三所蔡树军高工、李云高工、清华大学电子系江剑平教授的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Blackburn D. L. . A review of thermal characterization of power transistors. Proc. 4th IEEE SEMI-THERM Meas. Symposium, 1988. 1~7
- 2 高光勃, 李学信. 半导体器件可靠性物理. 北京: 科学出版社, 1987. 140~144
- 3 Parsley M. . The use of thermochromic liquid crystals in research applications, thermal mapping and NDT. Proc. 7th IEEE SEMI-THERM Meas. Symposium, 1991. 53~58
- 4 Ostermeir R. , Brunner K. , Abstreiter G. *et al.* . Temperature distribution in Si-MOSFET's studied by micro Raman spectroscopy. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1992, **39**(4) : 858~863
- 5 Saenger K. L. , Gupta J. . Laser interferometric thermometry for substrate temperature measurement. *Appl. Opt.* , 1991, **30**(10) : 1221~1226
- 6 Donnelly V. M. , McCaully G. . IR-laser interferometric thermometry; a noninvasive technique for measuring semiconductor wafer temperatures. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, **8**(1) : 84~92
- 7 曾绍群, 骆清铭, 刘贤德 等. 光学弱相干层析系统相干传递函数研究. *光学学报*, 1996, **16**(3) : 340~344
- 8 Magunov A. N. . Temperature dependence of the refractive index of monocrystalline silicon. *Opt. Spectrosc.* , 1992, **73**(2) : 352~355(in Russian)

Measurements of Transient Thermal Characteristics in Power Devices with a Noninvasive Laser Probe

Zeng Shaoqun Xu Haifeng Liu Xiande Li Zaiguang

(Department of Optoelectronic Engin. , Huazhong University of Sci. & Tech. , Wuhan 430074)

Abstract A low-coherence laser interferometry has been proposed to measure temperature of power devices. The transient thermal characteristic in power transistors has been measured in real time with a InGaAsP LD used as a microprobe. The experimental results show that this method is accurate and noninvasive. It also has the advantages of high spatial resolution, quick response speed, and a wide measuring range. It is applicable to power electronics and optoelectronics devices fabricated with Si, GaAs, and InP materials.

Key words laser interference thermometry, thermal measurement, power device thermal analysis