

半导体功率器件结温的实时测量和在线测量*

朱阳军^{1,2,†} 苗庆海¹ 张兴华¹ Yang Lieyong³ 卢烁今¹

(1 山东大学物理与微电子学院, 济南 250100)

(2 School of Computer Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

(3 Fab7, Chartered Semiconductor Manufacturing, Singapore 738406)

摘要: 克服了器件在大电流测试时温度系数测不准的难题, 帮助国际标准完善了实时测量和在线测量结温的方法, 即在加热的同时, 不改变加热状况的情况下, 直接把加热电流当作测量电流, 借助于校准曲线从而测量出晶体管的结温。

关键词: 实时测量; 结温; 本底数据

EEACC: 2560P; 2550 **PACC:** 6500

中图分类号: TN3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)06-0980-04

1 引言

对于半导体功率器件, 发热的均匀性和温度分布的均匀性, 对于半导体器件的参数的稳定性、品质的可靠性以及器件、整片集成电路乃至整机和系统的寿命都有不可忽视甚至决定性的影响。功率器件对于航空、航天、军事、民用等领域的重要性是不可动摇的。而功率器件结温的实时测量方法不仅可用于稳态寿命试验, 更新热阻测量方法和仪器, 而且对于在线测量, 机载测量, 评价装备和系统的可靠性和寿命等许多场合都有着非常重要的作用。迄今为止, 国际、国内人们一直在追求晶体管结温的实时测量这一有趣而又有意义的课题的圆满解^[1-5]。2001年, 张德骏、苗庆海以及贾颖等人提出了“在晶体管稳态工作寿命试验过程中实时测量结温的方法”的专利申请, 并于 2003 年获得发明专利^[6]。2005 年, 李霁红、贾颖以及张德骏等人报道了“结温可控的晶体管稳态工作寿命试验方法研究”, 利用试验过程中工作电流和测量电流有规律地瞬间交替, 通过测量电流来测量结温^[5], 是该专利的一个典型实施例, 比原来的稳态工作寿命试验方法有了突破性的进步, 已经受到了工业界的重视和好评。但是, 这种测量方法把原来的连续加热电流改变为断续加热, 破坏了标准规定的既定试验条件, 还不是理想的和彻底的实时测量。另外, 上述方法需要较大程度地改动电流供电系统或从根本上需要专用新设备, 因此增加了

试验的成本和难度。

1988 年, 国际电工委员会发布了关于热阻测量的权威技术标准 IEC 747-7, 经修订后易名为 IEC 60747-7, 沿用至今, 该标准中提到“利用总电流(测量电流和加热电流之和)下的 V_{EB} 的温度系数, 并利用图 24 示出的 $\Delta V_{EB}^{(2)}$, 同样也可以计算出热阻。不过, 在这么大的电流下, 由于器件上压降的影响, 所测得的温度系数是不准确的。因此, 通常不使用这种方法。”^[7-10] 标准认为, 在加载的大电流和实际的集电极电压下, 晶体管耗散的功率较大, 温度较高, 大电流下半导体势垒(结)电压的温敏系数是测不准的, 因此标准仅仅将其作为一种设想而没有施行。

本文所完善的实时测量方法解决了 IEC 60747-7 中没有解决的大电流下半导体势垒(结)电压的温敏系数测不准的问题, 从而使功率器件结温的实时测量以及在线测量这一长期困扰微电子学领域的科技难题得到解决。

2 基本原理

2.1 测量、加热电流合二为一

晶体管在耗散功率的同时, 不改变其加热状态, 也不引入其他的电源装置而是用其耗散功率的加热电流直接作为测量电流来测试晶体管的结温, 从而达到对结温实时测量的目的。这种测量严格来讲, 才是真正的实时。然而正如 IEC 60747-7 里所说, 在较

* 国家自然科学基金(No. 60476039)和国家留学基金委员会资助项目

† 通信作者, Email: Allan800713@163.com, sduzyj@gmail.com

2006-12-13 收到, 2007-02-03 定稿

大电流的情况下,器件压降的影响会导致所测得的温度系数不准确.这是因为用较大的,例如安培量级的加热电流直接作为测量电流的时候,基区会出现大注入或者极大注入的情况.由于大注入时的电导调制效应和基区宽变效应,基极发射极之间电压的一部分就会被基区内建电势分担,而且大电流测量时,串联电阻的影响也不能忽略.

那么如何利用大电流下的温敏参数来实时测量结温呢?我们引入本底数据来校准大电流时的温敏参数.在IEC标准里,小电流时的温敏参数同样需要校准,我们这里的校准数据比标准里提到的更丰富,包涵器件更多的热电信息.

2.2 本底数据和温敏系数

将待测晶体管放在温度可调的恒温装置里,采用晶体管正常耗散功率时的偏置条件,对集电极施加电压(电压可调,范围同正常功率耗散时的情况),用脉冲幅度可调的程控恒流源采集被测晶体管基极发射极之间在不同温度下的 $I-V$ 数据,得到 $I-V-T$ 数据,称之为本底数据,实质上是用于获得被测管电流、电压、温度的校准曲线的基本数据^[12].为了尽量减小测量电流的热效应引起的附加结温升,脉冲宽度应尽量地减小.为消除引线电阻的影响,测试时采用共柃四线制.这样可以大大拓宽电流的适用范围,因应高速度测量应尽量缩短测量引线,以减小寄生电感对测量结果的影响.

使用华峰测控公司的BX 1031A型半导体分立器件通用测试模块,分别采集晶体管3DD102C, 2SD850的BE结压降.测量电流序列为1,2,5,10,20,50,100,200,500mA以及1,2,3,5A.恒温装置设置温度分别为25,35,45,55,65,75,85,95,105,115,125,135和145℃.测量电流的脉宽均为300 μ s,由于测试时间很短,测量电流对被测器件的热效应可以忽略.

处理本底数据,可以求得所需的温敏系数,如图1所示,分别为两支被测管的 $V-T$ 关系.图1显示出电流在较大范围内(1mA~5A)的正向压降与温度仍然满足近似线性关系,这说明晶体管在大电流下的正向压降仍然是温敏的.

在采集本底数据的时候,因为晶体管也在耗散功率,但是测量时间非常短,可以忽略其热效应对温敏参数的影响,所以该温敏参数已经包涵了大电流注入时电导调制效应和基区展宽效应等因素对它的影响,用它来校准实时测量的数据是准确的、可靠的.利用数学方法,通过曲线拟合,便可以得到任意 V_{CB} 和 I_E 的功率配比下,任意 V_{BE} 值下的温度,从而准确地校准实时测量时 V_{BE} 所对应的结温.

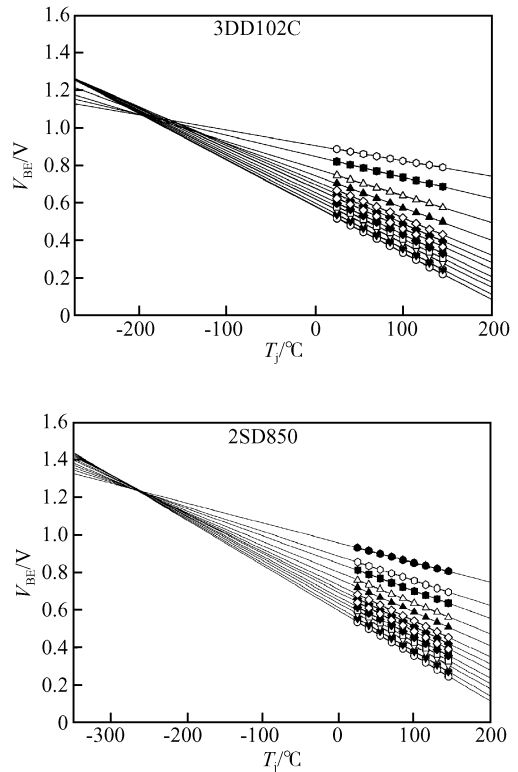


图1 不同测试电流下BE结压降与温度的关系 曲线从上到下对应的测试分别电流为5,3,2,1A以及500,200,100,50,20,10,5,2,1mA.

Fig. 1 Voltage drop between BE junction versus temperature with different measuring currents The measuring currents, corresponding to curves from top to down, are 5, 3, 2, 1A, and 500, 200, 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1mA, respectively.

3 实验分析与讨论

用华峰测控公司的BX 1031A型半导体分立器件通用测试模块采集样管2SD820的本底数据,用标准中指定的北京无线电仪器厂生产的BJ2984型大功率晶体管瞬态热阻测试仪测量样管2SD820的结温,用16位AD并联在基极发射极两端,采集加热期间BE间正向压降.如图2所示,我们采用20kHz的频率采集了热阻仪加热50ms的完整数据,功率条件为40V,4A.整个测量过程分为三段:小电流采集晶体管 V_{BE} 初始值、加热电流采集升温曲线、小电流采集降温曲线,分别对应于图2的左右三段曲线.

由于被测器件在通过加热电流时其发射结电压同样具有温敏特性,实时测量就是把加热电流同时也当作测量电流,根据实时测量的电压值,查找本底数据及其校准曲线,就可以得到对应的温度.选择不同的功率条件,即集电极电压 V_{CB} 和发射极恒流 I_E

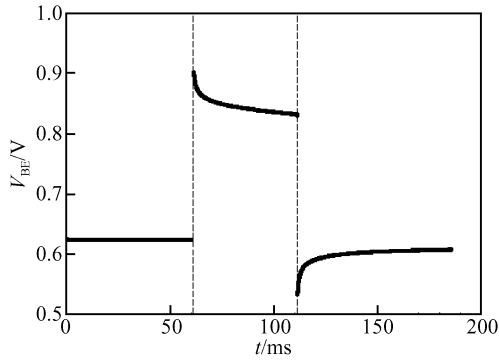


图2 热阻仪测量过程中16位ADC的采集曲线

Fig.2 Collected curve by 16bit ADC in the measuring procedure of the thermal resistance instrument

的配比,加热时间均选定50s.我们得到实时测量方法测出的结温与热阻仪测算出的结温的对比结果,如图3所示.

从图3我们可以看出,实时测量的结温高于BJ2984型大功率晶体管瞬态热阻测试仪测量的结温,这是因为BJ2984测温不及时,是加热断开后延迟50 μ s后的测量结果^[13].

把原来只用于加热的发射极大电流同时成功地当作测量电流使用是新方法,在完全不改变加热状况的情况下实时测量结温,是理想的测温方法,比断开加热延后再用小电流测量结温的方法简便、及时、科学、合理.

实时测量结温的概念源于国际电工委员会IEC标准,在IEC 747-7中提出并在修订的第二版IEC 60747-7中继续保留,其测量原理在标准里有“利用总电流(测量电流和加热电流之和)下的 V_{EB} 的温度系数,并利用图24示出的 $\Delta V_{EB}^{(2)}$,同样也可以计算

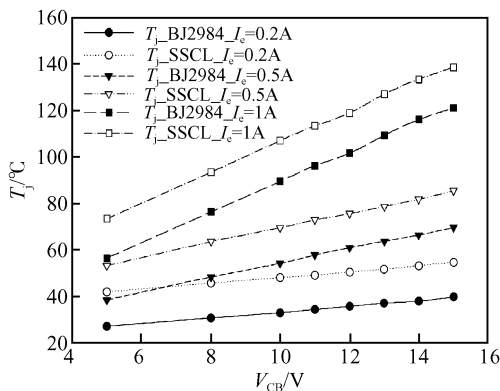


图3 不同功率条件下,热阻仪与实时测量方法所得结温的对比

Fig.3 Comparison in junction temperature obtained from the thermal resistance instrument and the real-time measurement with different power conditions

出热阻”的明示.因此,从根本上说,此方法不存在用其他方法校准的问题,因为它本来就存在于当前执行的国际标准里,只不过标准里提到的“大电流下的温度系数测不准问题”,现在得以解决了,使其完善了.显然,一旦“温敏参数测不准的问题”解决了,那么实时地测量器件结温的难题也就迎刃而解,这比断开功率延迟50 μ s后测试出的结温更科学、更可靠.因此,实时测量方法不论在理论上还是实验上都比类似于BJ2984热阻测试仪等测量仪器和方法科学合理,更具有可行性和可信性.

公认的检验结温不均匀性的最好方法是红外热像法,但是测试热阻的国际权威标准的理论基础是以假设结温均匀为前提的,这就决定了不应使用红外热像法来校准.对于IEC 747-7和IEC 60747-7,没有人要求应该用红外热像图校准之后才可以出炉,因为在晶体管通电自加热时所摄取的红热像图结温都是不均匀的,热像图给出很多温度值,无法以某一个温度为准去校准标准电学方法的测量结果.如果加热电压比较高,加热电流比较小,比如加热电流在IEC 60747-7标准里所建议的50mA左右的值时^[9],实时测量本来是很容易理解和可行的,相对于此,我们的研究仅仅是扩大了适用范围.

按照热阻测试的国际权威标准的理论基础——结温均匀的前提,检验一种新的电学测量方法的标准,还是只能靠国际权威标准自身的规定:“请注意,此测量方法作了这样的假设:当晶体管耗散功率时,结温分布是均匀的,并且和校准晶体管时的温度相同.”^[7~10].这一严正申明说明,标准电学方法完全适用于测量温度均匀晶体管的热阻和结温,此时,其理论依据是科学的、严格的.本文所完善的实时测量结温的方法,仍然遵循上述结温均匀的假设,校准过程严格执行权威标准,提取本底数据是在结温均匀的恒温区中进行的,实时测量得到的温敏参数即发射结电压直接在本底数据中查找校准曲线以得到结温,恒温区中的温度测量精度高于其他任何方法.即使是按照美军标准利用外推修正到断开加热电流零时刻值的方法^[10],也不会比实时测量的方法可信度高.

如果被测晶体管是分立的单管,那么该方法在用于对其实施可靠性分析或者筛选时,称之为实时测量;如果被测晶体管在电路中,通过获取该器件在线状态时工作电流所对应的正向压降,便可以利用本底数据即校准曲线得到此时的芯片温度,则称之为在线测量,或可实施在线测量.对于处于稳态时的器件,由于结温升随时间变化不明显,所以此时对器件正向压降测试时,不需要很高的采集速度,因此该方法实施起来相对容易、可靠.而对于器件可靠性实验分析或筛选时,对瞬态时的器件结温实施实时测量时,由于结温升随时间变化较快,所以此时需要高速

采集获取器件的正向压降,因此需要研制专用配套的仪器,以保证测试的及时性、准确性和测量精度。

4 结论

在温度可调的恒温装置里,在不同功率条件下,用微秒级的电流脉冲采集晶体管的电流-电压-温度的本底数据,是实现大电流下实时测量结温的关键技术基础,该方法得到的校准数据包涵了大电流注入时的各种因素对温敏参数的影响,因此是准确可靠的。

把原来只用于加热的发射极大电流同时成功地当作测量电流使用是新观念和新方法,在完全不改变加热状况的情况下实时测量结温,是国际权威标准 IEC 60747-7 所期待的测温方法,比断开加热延迟后再用小电流测量结温的方法简便、及时、准确、科学、合理。

参考文献

- [1] Musallam M, Acarnley P P, Johnson M, et al. Real-time power electronic device junction temperature estimation. The Institution of Electrical Engineers, 2004; 231
- [2] Musallam M, Acarnley P P, Johnson M, et al. Open loop real-time power electronic device junction temperature estimation. The Institution of Electrical Engineers, 2004; 1041
- [3] Frank U, Krümmer R, Reimann T, et al. Online monitoring of power devices junction temperature in power converters using a 32-bit microcontroller. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003; 1130
- [4] Olavsbråten M. A simple practical technique for estimating the junction temperature and the thermal resistance of a GaAs HBT. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2002; 1005
- [5] Li Jihong, Jia Ying, Kang Rui, et al. Study of transistor steady-state operation life test by method of controllable junction temperature. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(6): 696 (in Chinese) [李雾红, 贾颖, 康锐, 等. 结温可控的晶体管稳态工作寿命试验方法研究. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(6): 696]
- [6] Zhang Dejun, Miao Qinghai, Jia Ying, et al. Real-time measurement method in process of the steady-state operation life test of transistor. China Patent, 01107821. 9, 2001 (in Chinese) [张德骏, 苗庆海, 贾颖, 等. 在晶体管稳态工作寿命试验过程中实时测量结温的方法. 中国专利, 01107821.9, 2001]
- [7] International Standard IEC 60747-7 Semiconductor devices-Part 7: Bipolar transistors. 2nd ed. Geneva: International Electro-technical Commission, 2000; 137
- [8] National Standard GB/T 4587-94 IEC 747-7 1988. P. R. China. Chapter 7 semiconductor devices and integration circuit. Bipolar transistor. 1st ed. Beijing: China Standard Publishing House, 1996; 50
- [9] British Standard BS IEC 60747-7: 2000 Semiconductor devices-Part 7: Bipolar transistors. 2nd ed. London: British Standard Institution, 2001; 68
- [10] MIL-STD-750D. Test method standard semiconductor devices. 1995; 3103; 8
- [11] Miao Qinghai, Miao Yuan, Zhu Yangjun, et al. Discussion on the relationship between ΔV_{EB} and IE presented in thermal resistance standard IEC60747-7 version 2000. Progress in Natural Science (Chinese), 2005, 15(4): 380
- [12] Blackburn D L. An electrical technique for the measurement of the peak junction temperature of power transistors. IEEE Reliability Physics Symposium, Las Vegas, NV, 1975; 142
- [13] Lu C Z, Wang M Z, Gui X, et al. Fast measurement of the peak junction temperature of power transistors using electrical method. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1991; 39

Real-Time and On-Line Measurement of Junction Temperature for Semiconductor Power Devices*

Zhu Yangjun^{1,2,†}, Miao Qinghai¹, Zhang Xinghua¹,
Yang Lieyong³, and Lu Shuojin¹

(1 School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250100, China)

(2 School of Computer Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

(3 Fab7, Chartered Semiconductor Manufacturing, Singapore 738406, Singapore)

Abstract: A new method for the real-time measurement of junction temperature is introduced. For transistors dissipating power at a constant rate, the heating current is treated as the measuring current in order to measure directly the junction temperature of the transistors. The method can be used in on-line measurements.

Key words: real-time measurement; junction temperature; background data

EEACC: 2560P; 2550 **PACC:** 6500

Article ID: 0253-4177(2007)06-0980-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60476039) and the China Scholarship Council

† Corresponding author. Email: Allan800713@163.com, sduzyj@gmail.com

Received 13 December 2006, revised manuscript received 3 February 2007