

# 基于实际结温分布中小电流过趋热效应的验证\*

朱阳军<sup>1,2,†</sup> 苗庆海<sup>1</sup> 张兴华<sup>1</sup> 卢烁今<sup>1</sup>

(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, Singapore)

**摘要:** 对于从红外热像图得到的实际的晶体管结温分布,通过热谱分析方法获得该温度分布对应的热谱曲线,进而建立了晶体管管并联模型,并在此基础上,经过实验和理论计算证实了pn结中小电流过趋热效应存在的真实性.当结温分布不均匀时,对于通过pn结的电流,小电流比大电流更具有趋热性.即电流越小,高温区与低温区电流密度的比值越大,电流越集中在高温区,且集中区域的面积随着电流的减小而缩小.利用这一特性可以研究器件热电不稳定性,结温分布的不均匀性及不均匀度,峰值结温的估算等,这对于半导体器件可靠性分析具有重要的意义.

**关键词:** 热谱曲线; 电流密度; 过趋热性; 有效面积

**PACC:** 7115; 7120; 7200

**中图分类号:** TN301

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)07-1112-05

## 1 引言

流经pn结的电流具有正温度系数,当其工作时由于器件的热电不稳定性,可以引起芯片区域性温度升高和电流集中,从而引发电热正反馈,导致器件结温分布更不均匀,最终有可能在器件有源区内出现稳定或不稳定热斑甚至烧毁.因而器件结温分布均匀与否是衡量其热电性能优劣的重要因素之一,人们对这方面的研究越来越深入<sup>[1~6]</sup>.

作为一种新的半导体物理学现象,苗庆海等人<sup>[7]</sup>首次报道了小电流过趋热效应及理论模拟计算.小电流过趋热效应描述了在结温分布不均匀的pn结上电流的一种趋热现象,且随着通过pn结总电流的减小,这种趋热的程度就会增大,电流密度分布变得更加不均匀.基于该现象,可以使用电学方法来探测结温分布的不均匀性和不均匀度,估算峰值结温,研究器件的热电不稳定性等.小电流过趋热效应对半导体器件可靠性分析具有重要的作用和意义.

文献<sup>[7]</sup>中假设了一种各并联子管温度从343.15到443.15K线性增加的结温分布,并在此温度分布基础上,通过模拟理论计算和相关实验验证了小电流过趋热效应的存在.为了更加真实地验证这一物理现象,本文以从红外热像图得到的实际的

结温分布为基础,通过热谱分析方法获得相应的数据进而建立物理模型,并通过实验和理论两方面分别进行对比验证.

## 2 热谱曲线和模型建立

对于pn结势垒器件,我们选择最具典型代表的双极晶体管作为研究对象.当晶体管在耗散功率时,芯片表层结温分布一般是不均匀的<sup>[6,8,9]</sup>.型号为3DD102的晶体管样管在自加热条件为50V,1A,500s时的红外热像图如图1(a)所示.此时结温分布已经很不均匀,局部小区域出现了热斑,而芯片的其他大部分则处于相对的低温区.对芯片的发射极区进行热谱分析<sup>[10]</sup>,计算出相同温度所对应的点的个数,即如果在所选定的区域内共有 $n$ 个温度值,那么对应于某个温度 $T_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ),在选定区域内共有 $m_i$ 个点与其对应.如果把所有点的总数 $\sum_{i=1}^n m_i$ 看作1,那么每个温度值所对应的点个数可以进行归一化,即得到发射区内每个温度分布的归一化面积<sup>[10]</sup>  $A_{\text{Normalized}}$ ,记为 $A_N$ .那么对于选定区域内的某个温度 $T_i$ 所对应的归一化面积为:

$$A_{Ni} = m_i \times \left(1 / \sum_{i=1}^n m_i\right) \quad (1)$$

于是便由图1(a)的红外热像图得出如图1(b)所示

\* 国家自然科学基金(批准号:60476039)及国家留学基金委员会资助项目

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

2006-12-15收到,2007-01-12定稿

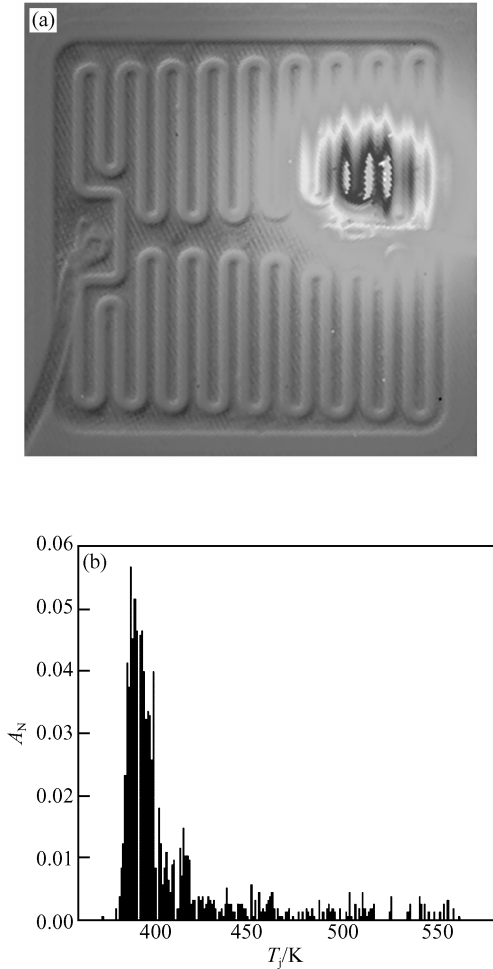


图 1 在功率条件为 50V,1A,500s 稳态下晶体管真实的结温分布 (a)红外热像图;(b)热谱曲线  
Fig.1 Actual junction temperature distribution of transistor in the steady state under the condition of 50V,1A,500s (a) Infrared image;(b) Thermal spectrum curve

的对应的热谱曲线。

由图 1(b)热谱曲线里的 135 个温度值及其对应的归一化面积,我们给出晶体管子管并联物理模型:该晶体管(母管)由  $n$  (这里对应的  $n = 135$ ) 个在形式结构上并联而结温互不相同的子晶体管(简称子管)组成,各子管内的温度都是均匀的,对于某一个子管,它的结温以及电流流过的面积分别是  $T_i$ ,  $A_{Ni}$ ,即我们使用 3DD102 晶体管的管芯上每个温度所占有的归一化面积来作为模型里该温度对应子管的面积.因此,每个子管的结压降都等于晶体管的结压降,所有子管的电流之和等于流经晶体管芯片的总电流.

上述理论模型里温度分布数据是从实际的红外热像图提取而来的,它如实地体现了在加热期间各子管间横向传热(自恰,自动调整)和全部子管经载

体热沉向下纵向散热,继而通过热像仪的载物台及其散热系统传热的最后综合的温度分布结果.测量电流均为小电流,其自热效应可以忽略(标准 IEC 60747-7 里电学方法使用测量电流测试结温时忽略其自热效应).

### 3 理论分析

根据 Shockley 方程,对于一个理想 pn 结,其正向电流密度  $J_F$  与正向压降  $V_F$  的关系为<sup>[11]</sup>:

$$J_F = J_s(e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1) \quad (2)$$

$J_s$  为反向饱和电流密度,是半导体材料禁带宽度和温度的函数,其表达式为:

$$J_s = BT^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT}} \quad (3)$$

式中  $B$  为器件的结构因子,对于同一个器件, $B$  为常数; $\gamma$  是一个大于 3 的常数; $V_{g0}$  是半导体材料的禁带宽度.将(3)式带入(2)式得:

$$J_F = BT^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT}} (e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1) \quad (4)$$

由(4)式,对于同一个管子  $V_F$  不变的情况下,芯片表面某位置处的电流密度  $J_F$  仅仅是温度  $T$  的函数,即  $J_F(T)$ ,不同的结温  $T$  对应不同的电流密度  $J_F$ .由上面建立的物理模型,对应该结温分布,第  $i$  个子管的结温是  $T_i$ ,电流流经的面积是  $A_{Ni}$ ,那么由(4)式,第  $i$  个子管内流过的电流为:

$$J_{Fi} = A_{Ni}BT_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1) = A_{Ni}BT_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1) \quad (5)$$

流经晶体管的总电流等于所有流经子管的电流之和,即:

$$I_F = \sum_{i=1}^n I_{Fi} = \sum_{i=1}^n A_{Ni}BT_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1) \quad (6)$$

因为使用了归一化面积,即对于所有子管对应的面积有  $\sum_{i=1}^n A_{Ni} = 1$ ,因此(6)式表征的流过母管的总电流,也就等于流过母管电流的平均电流密度  $\bar{J}_F$ .所以各子管电流密度与流经母管的平均电流密度比值为:

$$\frac{J_{Fi}}{J_F} = \frac{BT_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1)}{\sum_{i=1}^n A_{Ni}BT_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1)} = \frac{T_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1)}{\sum_{i=1}^n A_{Ni}T_i^\gamma e^{-\frac{qV_{g0}}{kT_i}} (e^{\frac{qV_{BE}}{kT_i}} - 1)} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,各个子管的电流密度与母管平均电流密度的比值与  $B$  无关,与各子管的温度  $T_i$ ,面积  $A_{Ni}$  和 BE 结的压降  $V_{BE}$  有关.

在这  $n$  个子管中任选两个子管,它们的温度分

别为  $T_h$  和  $T_l$ , 其中  $T_h > T_l$ . 由(4)式可得流经这两个子管的电流密度分别为:

$$J_{Fi}(T_h) = BT_h^\gamma e^{\frac{qV_{g0}}{\eta k T_h}} (e^{\frac{qV_{BE}}{\eta k T_h}} - 1) \quad (8)$$

$$J_{Fi}(T_l) = BT_l^\gamma e^{\frac{qV_{g0}}{\eta k T_l}} (e^{\frac{qV_{BE}}{\eta k T_l}} - 1) \quad (9)$$

在温度不是很高的情况下, 反向漏电流可以忽略不计, (8)式和(9)式可以改写为:

$$J_{Fi}(T_h) = BT_h^\gamma e^{\frac{q(V_{BE} - V_{g0})}{\eta k T_h}} \quad (10)$$

$$J_{Fi}(T_l) = BT_l^\gamma e^{\frac{q(V_{BE} - V_{g0})}{\eta k T_l}} \quad (11)$$

(10), (11)式可得到流过高温子管和低温子管的电流密度的比值:

$$\begin{aligned} \frac{J_{Fi}(T_h)}{J_{Fi}(T_l)} &= \left(\frac{T_h}{T_l}\right)^\gamma \exp\left\{\left[\frac{q(V_{BE} - V_{g0})}{\eta k}\right]\left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_l}\right)\right\} \\ &= \left(\frac{T_h}{T_l}\right)^\gamma \exp\left\{\left[\frac{q(V_{g0} - V_{BE})}{\eta k}\right]\left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h}\right)\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $V_{BE} < V_{g0}$ ;  $\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h} > 0$ . 由(12)式可见: 随着  $V_{BE}$  的减小, 指数项  $\left\{\left[\frac{q(V_{g0} - V_{BE})}{\eta k}\right]\left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h}\right)\right\}$  增大, 从而  $\frac{J_{Fi}(T_h)}{J_{Fi}(T_l)}$  增大<sup>[9]</sup>, 又因为正向偏置时  $I$ - $V$  曲线是单调递增的, 那么  $V_{BE}$  的减小也就意味着流经芯片的总电流  $I_F$  减小. 也就是说随着测试电流  $I_F$  的减小, 流经高温子管的电流密度与流经低温子管的电流密度的比值是成指数增大的, 即测试电流的分布变得更不均匀.

### 4 实验对比与讨论

实验设计采用文献[7]中的装置和电路, 如图 2 所示. 将图 1 中拍摄红外热像图的被测样管, 即模型里的母管放于恒温装置中, 通过调节滑变电阻器使得在每次设定恒温装置温度  $T_i$  的时候,  $V_{BE}$  的值始终固定保持在选定的数值, 从而记录下该温度  $T_i$  对应的通过样管的电流  $I_{Mi}$ <sup>[7]</sup>. 按照模型里各子管的结温调节恒温装置, 在温度  $T_i$  下采集通过母管的电流, 根据其归一化面积便可以计算出通过对应结温为  $T_i$  的那个子管的电流. 我们将 135 个分别处于不同温度下的子管进行实验, 来使用单一晶体管, 即模型的母管分别处于 135 个温度下来代替. 调节 135 次恒温装置, 便可以获得在相同的 BE 结压降下, 所有子管上通过的电流.

在恒温装置里的母管, 其上电流分布均匀, 因此对于占母管面积为  $A_{Ni}$  的子管上通过的电流可表示为:

$$I_{Fi} = I_{Mi} \times A_{Ni} \quad 1 \leq i \leq 135 \quad (13)$$

因此, 在相同的 BE 结压降下通过所有温度各不相

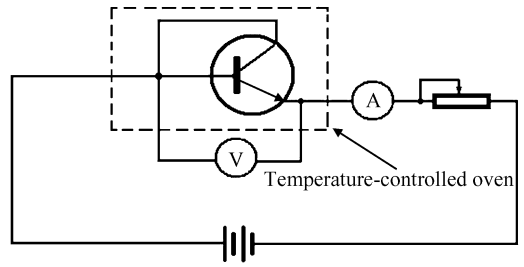


图 2 实验部分电路原理图  
Fig.2 Circuit schematic diagram of the experiment

同子管的总电流由(13)式得:

$$I_F = \sum_{i=1}^n I_{Fi} = \sum_{i=1}^{135} (I_{Mi} \times A_{Ni}) \quad (14)$$

由于使用了归一化面积, 母管的总面积为 1, 因此, (14)式表征的也是母管的平均电流密度, 那么由(13)和(14)式, 各子管电流密度同母管平均电流密度的比值可以表示为:

$$\frac{J_{Fi}}{J_F} = \frac{I_{Fi}/A_{Ni}}{\sum_{i=1}^m I_{Fi}} = \frac{I_{Mi}}{\sum_{i=1}^{135} (I_{Mi} \times A_{Ni})} \quad (15)$$

选定  $V_{BE} = 200\text{mV}$ , 即每次调节温度测量时, 均应使电压表示数恒定在 200mV, 记录下每次测量的  $I_{Mi}$ , 由(15)式便可计算出子管电流密度同母管平均电流密度的比值, 如图 3 虚线所示.

理论计算部分, 对于该 3DD102 型号的样管, 在理论数值基础上参照以往经验和文献, 我们令  $\gamma = 3.5$ ,  $\eta = 1.05$ ,  $V_{g0} = 1.18\text{V}$ <sup>[7]</sup>. 并连同  $V_{BE} = 200\text{mV}$ , 将各子管对应的  $T_i$ ,  $A_{Ni}$ , 分别带入(7)式, 便可以计算出理论上得出的各子管电流密度与母管平均电流密度的比值, 如图 3 实线所示.

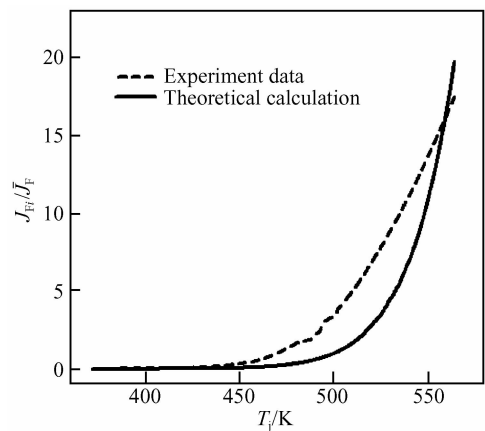


图 3 在  $V_F = 200\text{mV}$  时,  $J_{Fi}/\bar{J}_F$  随结温升高成单调递增的变化关系  
Fig.3 Monotone increasing relationship between  $J_{Fi}/\bar{J}_F$  and junction temperature at forward voltage  $V_F = 200\text{mV}$

由于具有公共分母——母管平均电流密度,所以图3实际表征的是各子管电流密度  $J_{Fi}$  随结温的变化关系.可以看出电流密度是结温的单调增函数,且温度越高,增加的相对幅度越大.

再来看高温子管 ( $T_h = 423.15\text{K}$ ) 与低温子管 ( $T_l = 381.15\text{K}$ ) 电流密度的比值随测量电流的变化关系.对于理论计算部分,  $V_{BE}$  从  $200\text{mV}$  到  $425\text{mV}$  连续取值,并将选定的各参数分别代入(12)式,便描绘出图4实线所示的曲线.对于实验计算部分,  $V_{BE}$  从  $200\text{mV}$  到  $425\text{mV}$  每隔  $15\text{mV}$  取值,共计16个点.按照(13)式求出电流,再除以各自的有效面积便得到电流密度,然后便得到高低温子管电流密度的比值,如图4中圈点所示.

从图4可以看出,随着  $V_{BE}$  的减小,流经高温区与低温区的电流密度的比值是增大的,由(12)式的理论分析得出近似以指数形式增大,而  $V_{BE}$  的减小是伴随着总电流  $I_F$  的减小.这表明随着总测试电流的减小,电流会更加趋向于高温区,而低温区流过的电流所占总电流的比例则越来越少,电流分布变得越来越不均匀.

这里没有选择温度更高的子管来作为比较,因为考虑到 Shockley 方程的适用范围,温度不能过高,而且在实验验证部分,温度太高时由于反向漏电流不可忽略,也会使得小电流测量不准确.但是由于电流的趋热性以及热电正反馈,我们依然可以推断出,温度更高时的电流密度也会更高,高低温子管的温度差别越大,相应的电流密度差别也越大,该比值也会越高.

由小电流的过趋热效应,对于同样的结温分布,不同的测试电流所得的电流密度分布也会不同,从

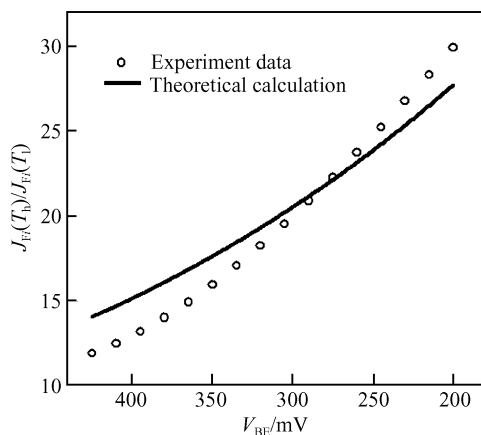


图4 高温( $T_h = 423.15\text{K}$ )与低温( $T_l = 381.15\text{K}$ )电流密度的比值随  $V_{BE}$  的变化关系

Fig. 4 Ratio of the current density of high temperature region to low temperature region versus forward voltage  $V_{BE}$  at  $T_h = 423.15\text{K}$ ,  $T_l = 381.15\text{K}$

而使得有效面积也会因测试电流不同而不同.同文献[7]中约定,对于所有子管中通过的电流,按照结温从高到低依次累加,当累加之和达到通过母管总电流的99%时,那么所有被累加在内的子管对应的归一划面积之和就是该测试电流所对应的有效面积,记作  $A_E$ ,即表示99%的测试电流流经的区域面积.

依照上面选定的16个  $V_{BE}$  值,即有16个测试电流与之对应,那么就会计算出16个不同的有效面积.理论和实验分别计算得出如图5所示的曲线,圆点实线为理论计算结果,菱形虚线为实验数据计算结果.由图5可以看出,随着  $V_{BE}$  的减小,即测试电流的减小,有效面积逐渐减小.

综合以上理论和实验结果分析,晶体管在结温分布不均匀的情况下,使用的测试电流越小,电流的趋热性越显著,电流越往高温区集中,晶体管有效面积就越小,这就是小电流过趋热效应<sup>[12]</sup>.

## 5 结论

由晶体管红外热像图得到实际的结温分布,通过热谱分析方法获得有源区所有温度及其占有的归一划面积,进而建立了各子管并联物理模型.在此物理模型的基础上,经过严格的理论推导和实验验证与对比,实验和理论符合良好,均证明小电流过趋热效应在pn结温度分布不均匀时确实存在.即随着通过pn结总电流的减小,电流的趋热效应会越来越显著,电流会更加集中于高温区,而晶体管的有效面积也会越来越小.测试电流一般比较小且脉宽较短,因此在本文的理论和实验分析中,忽略了测量电流的自热效应.

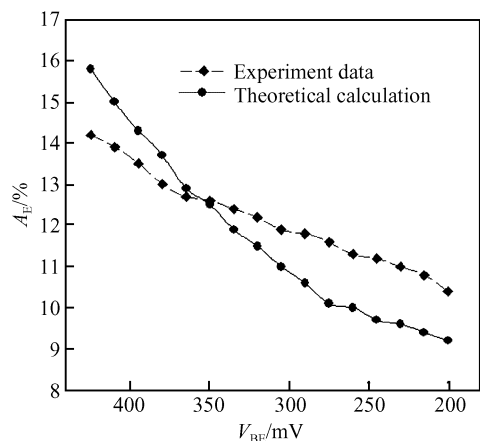


图5 对于相同的结温分布,有效面积  $A_E$  随  $V_{BE}$  的减小而减小

Fig. 5 Effective area  $A_E$  decreases with  $V_{BE}$  decreasing in the case of same junction temperature distribution

根据小电流过趋热效应的特性,在测量晶体管结温时通过多组电流测试,进而研究结温分布的不均匀性,计算结温分布的不均匀度,以及峰值结温的估算.相关研究,我们将在以后的论文中报道.

### 参考文献

- [1] Lu C Z, Wang M Z, Gui X, et al. Semiconductor thermal measurement and management symposium. Semi-Therm VII Proceedings, Seventh Annual IEEE, 1991:39
- [2] Yang Zhiwei, Miao Qinghai, Zhang Dejun, et al. Measuring junction temperature inhomogeneity of bipolar transistors by electrical method. Research & Progress of SSE, 2001, 21(2): 170(in Chinese)[杨志伟,苗庆海,张德骏,等.双极晶体管结温分布不均匀性的电学测量方法.固体电子学研究与进展, 2001, 21(2): 170]
- [3] Yang Zhiwei, Miao Qinghai, Zhang Dejun, et al. Measurement of junction temperature inhomogeneity of bipolar transistors by  $\Delta V_{bc}$  method. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(10): 1028(in Chinese)[杨志伟,苗庆海,张德骏,等.用  $\Delta V_{bc}$  法对双极晶体管结温不均匀性的测量.半导体学报, 2000, 21(10): 1028]
- [4] Yang Zhiwei, Miao Qinghai, Zhang Dejun, et al. Research on current thermotaxis of bipolar transistors and the effect on measuring the junction temperature. Semiconductor Technology, 1999, 24(2): 44(in Chinese)[杨志伟,苗庆海,张德骏,等.双极晶体管发射结电流趋热效应及其对结温测量的影响.半导体技术, 1999, 24(2): 44]
- [5] Feng Shiwei, Xie Xuesong, Lü Changzhi, et al. Measurement and study on thermal characteristics of semiconductor devices by electrical method. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(5): 358(in Chinese)[冯士维,谢雪松,吕长志,等.半导体器件热特性的电学法测量与分析.半导体学报, 1999, 20(5): 358]
- [6] Miao Qinghai, Du Wenhua, Zhang Xinghua, et al. Temperature spectrum on normalized area of emission region area for transistors. Semiconductor Technology, 2003, 28(12): 53(in Chinese)[苗庆海,杜文华,张兴华,等.晶体管发射区归一化面积的温度谱.半导体技术, 2003, 28(12): 53]
- [7] Miao Qinghai, Zhu Yangjun, Zhang Xinghua, et al. Excessive thermotaxis effect of low current in pn junction and theoretical analog calculation. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(9): 110(in Chinese)[苗庆海,朱阳军,张兴华,等. pn 结中的小电流过趋热效应及理论模拟计算.半导体学报, 2006, 27(9): 110]
- [8] 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
- [9] Miao Qinghai, Miao Yuan, Zhu Yangjun, et al. Discussion on the relationship between  $\Delta V_{EB}$  and  $I_E$  presented in thermal resistance standard IEC60747-7 version 2000. Progress in Natural Science, 2005, 15(4): 380
- [10] Zhu Yangjun, Miao Qinghai, Zhang Xinghua, et al. Thermal spectrum analysis method for infrared thermogram of transistors. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(7): 11(in Chinese)[朱阳军,苗庆海,张兴华,等.晶体管红外热像图的热谱分析方法.半导体学报, 2005, 26(7): 11]
- [11] Sze S M. Semiconductor devices, physics and technology. Canada: John Wiley & Sons, 1985
- [12] International Standard IEC 60747-7 semiconductor devices—Part 7: bipolar transistors. 2nd ed. Geneva: International Electro-Technical Commission, 2000:137

## Verification of the Excessive Thermotaxis Effect of Low Current Based on Actual Junction Temperature Distribution\*

Zhu Yangjun<sup>1,2,†</sup>, Miao Qinghai<sup>1</sup>, Zhang Xinghua<sup>1</sup>, and Lu Shuojin<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Using the junction temperature distribution as determined from infrared imaging, the thermal spectrum curve is obtained by thermal spectrum analysis for use in creating a “sub-transistors in parallel connection” model. Based on the model, from theoretical calculation and experiment, the validity of the excessive thermotaxis effect of low current is verified. For current passing through a pn junction in a non-uniform temperature distribution, there is much more thermotaxis at low current than at high current, i. e., with decreasing measured current, the ratio of the current density at high-temperature to that at low-temperature increases, and the effective area decreases. Based on these characteristics, the electro-thermal instability and the degree of uniformity of the junction temperature distribution can be studied. This has great significance for the reliability analysis of semiconductor devices.

**Key words:** thermal spectrum curve; current density; excessive thermotaxis; effective area

**PACC:** 7115; 7120; 7200

**Article ID:** 0253-4177(2007)07-1112-05

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

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

Received 15 December 2006, revised manuscript received 12 January 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics