

双极性功率晶体管稳定热斑 出现过程的研究*

高 光 瀚**

(北京工业大学无线电电子学系)

提 要

本文实验研究了双极性功率晶体管稳定热斑的出现过程,以及金属化种类,收集结偏压对这种过程的影响,在结温与电流非均匀分布的前提下,对产生这种过程的原因做了初步的探讨。

一、引 言

双极性晶体管,由于发射结电压的负温度系数,或者说,是发射极电流的正温度系数,使其具有热不稳定性,这种热不稳定性,对于双极性功率晶体管(以下简称功率晶体管),尤为突出。往往在器件有源区内出现热斑(又称过热点,是指电流高度集中区域),它引起器件参数蜕化,甚至诱发二次击穿,使器件永久性毁坏。对于双极性的集成电路(TTL 或 ECL),热不稳定性也是一种潜在的失效机理^[1]。

1969年 D. Navon^[2] 假设晶体管在

$$\Delta T(x, y, 0) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(t)$$

的初始扰动下,求解了二维的热传导方程,给出了 $\Delta T(x, y, t)$ 的解析表达式,依据 $\Delta T(x, y, t)$ 随时间的增长是收敛还是发散,来决定器件是否热稳定。

1974年, P. L. Hower^[3] 引入了热稳定因子 s , 即

$$s = R_{T_{jc}} V_c \frac{\partial I_c}{\partial T_j} \quad (1)$$

式中: $R_{T_{jc}}$ 晶体管结到管壳的热阻($^{\circ}\text{C}/\text{W}$), V_c 收集结偏压(V), I_c 收集极电流(A), T_j 结温($^{\circ}\text{C}$)。

当 $s < 1$, 器件处于热稳定;

$s = 1$, 器件临界热稳定;

$s > 1$, 器件热不稳定。

以后关于热不稳定的实验观测与理论分析又有许多报道,但是对于热斑是否可以稳定存在的报道却寥寥无几。1976年,在国际电子器件会议上 Hower^[4] 根据式(1)首先提出了热斑可以稳定存在的机理。他认为,电流的集中固然使热阻 $R_{T_{jc}}$ 增大,进而使热稳

* 1980年3月17日收到。

** 朱津津同志参加了本课题的试验工作。

定因子 s 增加,但是另一方面,电流的集中,又会引起基区扩展效应及电流集边效应,这两个效应综合结果,使 $\frac{\partial I_c}{\partial T_j}$,也即使热稳定因子 s 有下降的趋势。这样,虽然电流集中,但仍可以维持 $s \leq 1$,即形成了稳定热斑。

但是对稳定热斑的实验观测及它的产生是否需要一个过程,这个过程与金属化种类,收集结偏压有什么关系等问题,至今未见有详尽的报道。

近几年来,我们在功率晶体管的热失效分析及功率晶体管热设计研究中,采用扫描电镜、红外微像仪,并借助于计算机,精细地研究了上述诸问题。我们深感,这些问题对于功率晶体管的设计、制造及使用均具有重要的意义。

二、稳定热斑的观测

1. 稳定热斑形成的过程

我们对各种功率晶体管(包括低频大功率管,高频功率管,以至微波功率管)的实验观测表明,在一定的偏置条件下,电流总要集中,热斑是客观存在的,我们将它分为两类:

其一,热斑形成后,以毫秒乃至微秒的延迟时间立即趋于“热奔”,最后导致二次击穿,器件烧毁。这种热斑我们称为不稳定热斑。

其二,热斑形成后,可以稳定很长时间,几小时到几百小时,这取决于电流集中程度,金属化种类以及发射结深浅。这种热斑我们称为稳定热斑。

我们以1千兆赫,0.5瓦的单发射极树枝状结构的超高频中功率管为例,精细地研究了稳定热斑形成的过程,对于这种器件,我们发现稳定热斑的形成可以分三个阶段。

1) 热斑形成前阶段,当器件加上 $P_c = 15$ 伏 $\times 0.065$ 安培的直流功率后,管芯表面没有立刻形成过热点,显微观测表明,金属化表面光泽、平整、晶粒细密,图1给出了这种状态下的SEM照片(见图版I)。

2) 稳定热斑酝酿阶段,经过几十小时后,金属化表面已变得粗糙不平,晶粒粗大,发生明显球化(见图版I,图2),随着外加功率和时间的增加,金属化层的球化越严重,这时结温分布已不均匀,采用RM-50红外微像仪测量表明,峰值结温 $T_{jpeak} = 247^\circ\text{C}$ 。而且随着时间的推移,金属化薄膜表面球化越发严重, T_{jpeak} 在缓慢增加。

前两个阶段的时间长短,取决于电应力的大小(尤其是收集结偏压的高低),散热条件,以及金属化种类。我们发现,在相同电应力下,及相同散热条件下,金薄膜的再结构温度高,因而稳定热斑形成前以及酝酿阶段的时间长。而铝薄膜金属化再结构温度低,因而这一时间短。前者时间最长可达数百小时,而后者可短至几分钟,甚至几秒钟。铝金属化在稳定热斑酝酿阶段时,表面粗糙不平(光学显微镜下观察表面发黑),如图3所示(见图版I)。

3) 稳定热斑明显出现阶段,试验进行81.5小时以后,这时电流已高度集中,金属化球化严重,局部地区金属间互溶形成了稳定热斑。如图4所示(见图版I),采用红外热像仪测量表明,这时热斑温度已达到 337°C (见图5),发射结特性已经蜕化(见图6), BV_{cbo} 由5.2伏硬击穿,蜕化为2.7伏(取 $I_b = 0.1$ 毫安为击穿判据),而收集结特性完好,可见

器件没有发生二次击穿。稳定热斑到底能持续多久,对于金的多层金属化而言,主要取决于阻挡膜阻止金原子穿透的能力。对于铝金属化而言,主要取决于发射结深浅,这是因为在稳定热斑阶段,硅原子向铝中发生固态溶解,硅中留下空位,当这些空位转移到结附近时,器件发射结特性将开始蜕化。所以在同样电应力下发射结越深,热斑稳定时间越长。

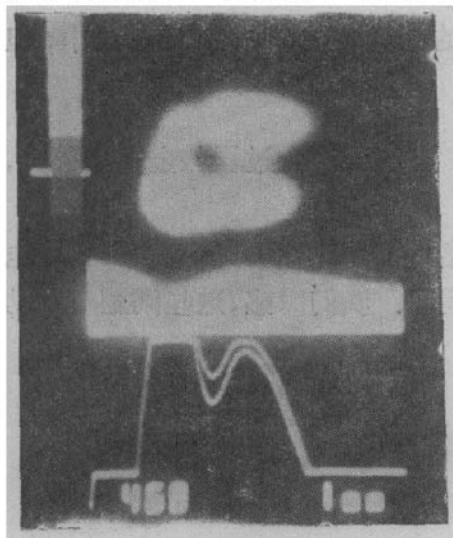


图5 热斑形成后热分布照片

2. 金、铝系统抗稳定热斑能力的比较

为了比较金的多层金属化系统与铝金属化系统抗稳定热斑能力的差异,我们将1千兆赫,0.5瓦超高频功率晶体管的同一批次的两次扩散后的硅片分成两部分,一部分蒸发NiCr-Al·4%Cu(重量比)双层薄膜,另一部分溅射Pt-Cr-W-Pt-Au多层金属化。采用同样的B-4封装,在同样功率和散热条件下,进行步进功率加速寿命试验。试验前每个器

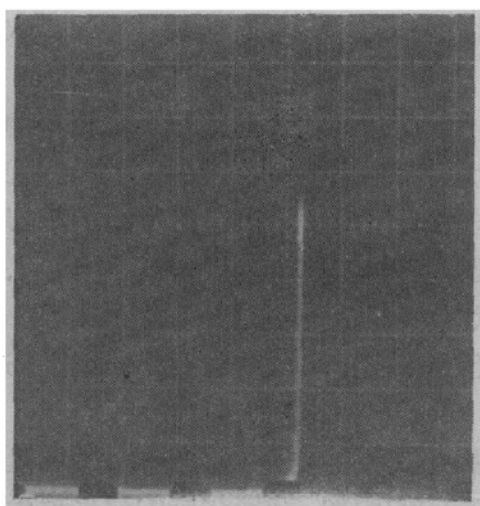


图6(a) 热斑形成前,发射结的击穿特性
(纵轴: 0.1 毫安/格,横轴: 1.0 伏/格)

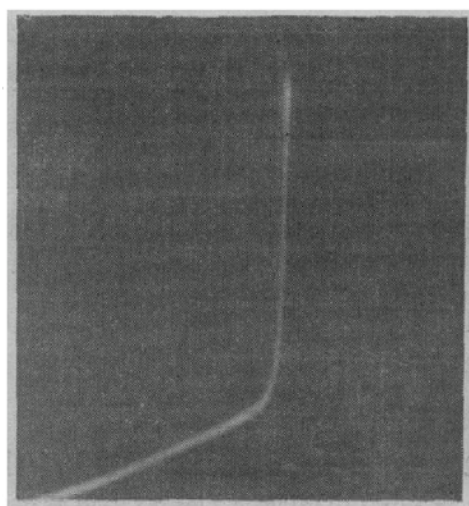


图6(b) 热斑形成后发射结的击穿特性
(纵轴: 0.1 毫安/格,横轴: 1.0 伏/格)

表1

功率(伏·安)	时间(小时)	失效百分比(%)		失效判据
		Al	Au	
15×0.05	39	31.2	7.9	$V_{eb} < 5$ 伏 $I_{ebo} = 0.1$ 毫安
15×0.06	6	39.5	7.9	$V_{eb} < 5$ 伏 $I_{ebo} = 0.1$ 毫安
15.5×0.055	15	93	23.7	$V_{eb} < 5$ 伏 $I_{ebo} = 0.1$ 毫安
15.5×0.065	29.5		50	$V_{eb} < 5$ 伏 $I_{eb} = 0.1$ 毫安

件经过功率筛选和严格测试,并将优选出来的器件的参数及特性曲线逐一记录和拍照下来,试验结果如表1所示。

由表可见,金的多层金属化抗热斑能力大大优越于铝金属化系统,从失效百分比看大约相差四倍。采用红外微热像仪对结温测量表明,金系统的热斑处峰值温度 $T_{jpeak} = 337^{\circ}\text{C}$,而铝系统的热斑处峰值温度 $T_{jpeak} = 257^{\circ}\text{C}$,对于其它铝系统的高功率管 T_{jpeak} 最高可达 303°C (见图7)。这个数据与 D. J. Lacombe^[5] 报道的金的多层金属化器件 (PHI 1510) 工作时热斑温度可达到 340°C ,及铝金属化系统器件 (MSC 1315) 热斑温度最高可达 310°C 的数据是相近似的。

3. 收集结偏压对稳定热斑的影响

实验观察了在同样功率下,收集结偏压对功率晶体管管芯温度分布的影响,结果如图8所示。这个实验结果进一步证明了作者在文献[6]中的理论分析。

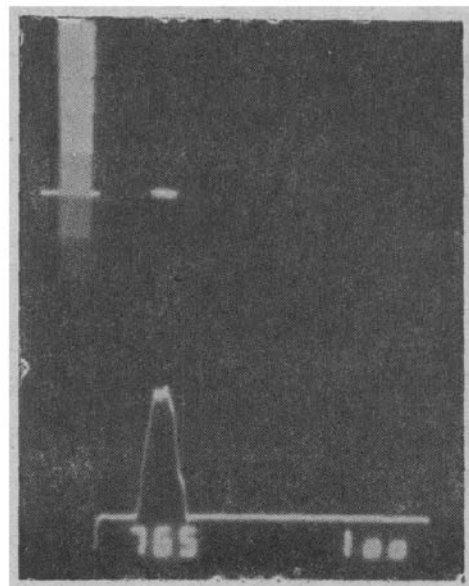


图7 铝金属化系统高功率管稳定热斑的红外照片 ($T_{jpeak} = 303^{\circ}\text{C}$)

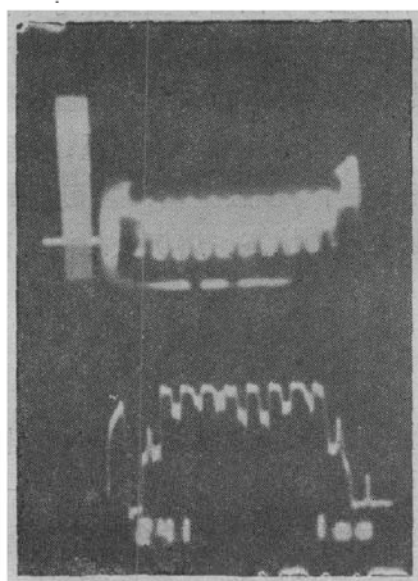


图8(a) 低频大功率管 10 伏 $\times$ 4 安培下结温的分布

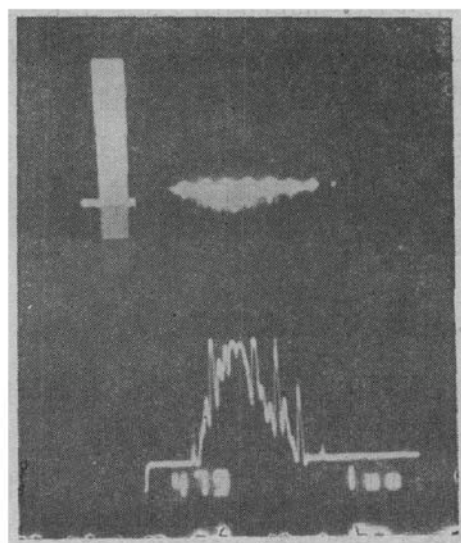


图8(b) 低频大功率管 50 伏 $\times$ 0.8 安培下结温的分布

三、实验现象的定性解释

1. 关于稳定热斑的产生过程

本试验采用的单条发射区的超高频中功率管,可以将这种结构的晶体管看成是由 $m \times n$ 个元晶体管面阵所组成(任何功率晶体管,都可以这样假设),虽然在功率晶体管有源区内各点温度和电流(功率)密度是不均匀分布的,但是在每个元晶体管,结温及电流(即功率)可认为是均匀分布的。这样,惯用的功率晶体管结温 T_j 及电流 I_c (或 P_c),就要用相应矩阵 $[T_{ij}]$ 及 $[I_{ij}]$ (或 $[P_{ij}]$) 表示了。

同时,表征结温 $[T_{ij}]$ 与 $[P_{c_{ij}}]$ 之间关系的热阻,显然就不能用一个单一的标量 R_T 表示了。这是因为每个元晶体管的结温升,不仅与其自身功耗有关,而且与其它元晶体管功耗有关。换言之,不仅有自热阻,而且有耦合热阻。任何元晶体管结温升可由下式给出

$$T_{ij} - T_c = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n R_{T_{ij,kl}} P_{c_{kl}} \quad (2)$$

或

$$= V_c \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n R_{T_{ij,kl}} \cdot I_{c_{kl}} \quad (3)$$

式中 T_{ij} 为第 i 行, j 列元晶体管的结温, $I_{c_{kl}}$ 及 $P_{c_{kl}}$ 分别为第 k 行, l 列元晶体管的收集极电流及收集结耗散功率。 $R_{T_{ij,kl}}$ 表示第 k 行, l 列元晶体管, 对第 i 行 j 列元晶体管的耦合热阻。显然 $R_{T_{ij,ij}}$ 为自热阻, 而且 $R_{T_{ij,kl}} = R_{T_{kl,ij}}$ 。可见, 功率晶体管热阻是具有 $(m \times n)^2$ 个元素的矩阵。

由于晶体管发射区表面有一层厚金属化覆盖, 所以元晶体管之间热耦合除了硅本体之外尚有一层高热导率的金属, 这两个热耦合通路是并联的。设想若金属化层足够厚, 而且热导率足够大的话, 则各元晶体管之间任何热差异是建立不起来的, 热斑就不可能形成。稳定热斑形成前阶段, 正是近于这种情况。虽然功率加上了, 但由于金属热导率高, 稳斑没有形成。而以后由于金属化的再结构晶粒长大, 表面结构粗糙, 凹凸不平。(由于电流密度 $j_c < 10^5$ 安培/厘米², 金属表面凹凸不平, 不是电徙动所致)。这时, 相当于元晶体管间热耦合大大减弱了, 而且随着时间的推移, 金属蠕变的加剧, 这种现象越发严重, 结温变的越发不均匀, 这相当于稳定热斑的酝酿阶段。以后, 在高温下, 多层金属化之间金属得相互扩散, 造成局部地区形成熔坑, 这个熔坑与周围近似为绝热状态。熔坑处结温最高, 形成稳定热斑。

2. 关于金属化的影响

金、铝两种金属化系统抗稳定热斑能力之所以有如此大的差异, 主要原因是: 金硅之间有一层阻挡膜, 金硅不能直接接触, 金硅不能共溶; 而铝硅直接接触 (即使中间有一层 NiCr 膜, 但由于铝的穿透能力很强, 所以铝硅近于直接接触), 硅向铝中发生固态溶解, 很易造成发射结特性蜕化; 其次金薄膜再结构温度高, 而铝再结构温度低, 在较高的温度下, 金薄膜不易球化, 而铝则反之, 这也就造成了金系统形成稳定热斑时相应结温要高一些的道理。

总之, 防止发射结蜕化的关键是防止金硅或铝硅直接接触。本实验采用 Cr-W-Pt 做为阻挡膜, 效果证明是相当好的。关于这方面的详细论述可参阅文献[7]。

3. 关于收集结偏压的影响

收集结偏压对功率晶体管结温及电流的非均匀分布具有强烈的影响, 这点笔者采用计算机曾进行过详细的理论计算和定量分析^[6]。这里从略。

感谢李志坚教授在本工作中给予的殷切指导和中肯的建议, 以及王长河, 唐建国同志在试验工作中的支持。

参 考 文 献

- [1] Smith, J. S., 9th Annual Proceedings Reliability Physics, pp. 163—171 (1971).
- [2] Navon, D. H. *Solid-State Electronics*, 12, 69(1963).
- [3] Hower, P. L., *IEEE Trans*, ED-21, 617(1974).
- [4] Hower, P. L., IEDM, pp. 147—150, (1976).
- [5] Lacombe, D. J. AD-A003643.
- [6] 高光渤, 电子学报, 1978, 第2期, pp. 52—62.
- [7] 高光渤, 国外电子技术, 1977, 第6期 pp. 50—58, 1977, 第7期, pp. 69—74.

STUDY OF THE PROCESS OF PRODUCING STABLE HOT SPOTS IN BIPOLAR POWER TRANSISTORS

Gao Guangbo

(Department of Radio-Electronics of Beijing Polytechnic University)

Abstract

This is an experimental investigation on the process of stable hot spots occurrence in bipolar power transistors, and the effects of metallization and collector bias voltage on this process.

This investigation has made a preliminary approach to the causes of the process on the basis of the nonuniform distribution of junction temperature and current.