

# 不同样式的高功率微波对双极晶体管的 损伤效应和机理\*

马振洋<sup>†</sup> 柴常春 任兴荣 杨银堂 乔丽萍 史春蕾

(西安电子科技大学微电子学院, 教育部宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071)

(2012年12月24日收到; 2013年2月27日收到修改稿)

结合 Si 基  $n^+ - p - n^+$  外延平面双极晶体管, 通过分析器件内部的温度分布变化以及电流密度和烧毁时间随信号幅值的变化关系, 研究了其在三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号等三种样式的高功率微波信号作用下的损伤效应和机理. 研究表明, 三种高功率微波信号注入下器件的损伤部位都是发射结, 在频率和信号幅值相同的情况下方波脉冲信号更容易使器件损伤; 位移电流密度和烧毁时间随信号幅值的增大而增大, 而位移电流在总电流所占的比例随信号幅值的增大而减小; 相比于因信号变化率而引起的位移电流, 信号注入功率在高幅值信号注入损伤过程中占主要作用. 利用数据分析软件, 分别得到了三种信号作用下器件烧毁时间和信号频率的变化关系式. 结果表明, 器件烧毁时间随信号频率的增加而增加, 烧毁时间和频率都符合  $t = af^b$  的关系式.

**关键词:** 双极晶体管, 高功率微波, 损伤机理, 信号样式

**PACS:** 85.30.Pq, 84.40.-x

**DOI:** 10.7498/aps.62.128501

## 1 引言

随着电磁环境的日益复杂, 现代半导体器件和集成电路极易受到高功率微波 (HPM) 的威胁, 耦合信号作用到器件管脚, 使其产生功能失效甚至永久性损伤, 进而导致电子系统瘫痪<sup>[1-9]</sup>. 针对器件与集成电路的微波损伤研究已有一些初步的研究报道. 文献 [10] 采用时域有限元分析法对横向双扩散金属氧化物半导体场效应晶体管 (LDMOSFET), 在周期性高斯脉冲和静电放电 (ESD) 引起的脉冲信号作用下的热积累效应进行了理论研究, 结果表明热积累效应随周期数和脉冲宽度的增加而更加明显. 文献 [11] 研究了双极晶体管在阶跃脉冲作用下的损伤效应和机理, 修正了器件损伤功率和脉宽的经验公式. Kim 和 Iliadis<sup>[12]</sup> 用高功率连续正弦波信号法实验研究了互补金属氧化物半导体反相器的电磁干扰效应, 对干扰信号作用前后反相器输出电压、增益和功耗等特性变化进行了探讨. 这些研究

工作结合了器件与电路的固有特性与应用背景, 得到了特定样式电磁信号作用下器件与电路的干扰效应和失效机理. 不足之处是注入信号样式比较单一, 没有针对典型敏感调制样式的电磁信号进行器件与电路电磁损伤效应和机理的对比分析研究. 研究不同调制样式电磁信号的损伤效应和损伤机理, 进而得到器件与电路的易损信号样式, 有助于针对性地获得器件与电路可靠性的加固措施和抗损伤的防护对策, 因此对可靠性研究具有积极意义.

我们已经研究报道了硅基  $n^+ - p - n^+$  外延平面双极晶体管在高功率正弦波信号作用下的损伤效应与机理, 利用器件与电路仿真软件 ISE-TCAD 建立了器件二维电热模型, 仿真结果和实验数据基本符合<sup>[13-15]</sup>, 证实建立的晶体管模型可以用来分析器件在微波注入下的损伤效应. 本文以三种典型信号样式三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号为研究对象, 利用已经建立的双极晶体管二维电热模型研究了其从集电极注入的损伤效应, 对比研究了三种样式的高功率微波信号位移电流和烧毁时

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60776034) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zyma@mail.xidian.edu.cn

间随信号电压幅值的变化规律, 获得了三种样式的微波信号烧毁时间和信号频率的变化关系.

## 2 仿真模型

### 2.1 器件结构与信号模型

器件模型采用典型 Si 基 n<sup>+</sup>-p-n-n<sup>+</sup> 外延平面双极晶体管. 由于器件结构的对称性, 本文只对双极晶体管 (BJT) 器件结构的一半进行了仿真 (图 1). 器件衬底厚度为 200 μm, 外延层厚度为 2 μm; 定义发射极中心为坐标原点, 从发射极到基极的水平方向为正 x 方向, 从半导体表面到衬底的垂直方向为正 y 方向, 器件默认厚度为 1 μm. B, C, E 分别代表晶体管的基极、集电极和发射极; N<sup>+</sup> 是 n 型重掺杂区, N 和 P 是 n 型轻掺杂区和 p 型轻掺杂区. 图 2 是器件掺杂浓度分布 (0 μm ≤ x ≤ 10 μm, 0 μm ≤ y ≤ 4 μm), 衬底下表面设定为 300 K 的理想热沉, 其他表面采用绝热边界条件.

注入电压采用易损的三种信号样式, 分别为正弦波信号、方波脉冲信号和三角波信号. 三种信号的数学表达式分别为

三角波信号

$$\begin{cases} U = \frac{4U_0}{T} \cdot t & (n-1/4)T < t \leq (n+1/4)T, \\ U = -\frac{4U_0}{T} \cdot \left(t - \frac{T}{20}\right) & (n+1/4)T < t \leq (n+3/4)T, \end{cases} \quad (1)$$

正弦波信号

$$U = U_0 \sin(2\pi t/T), \quad (2)$$

方波脉冲信号

$$\begin{cases} U = 10U_0/T \cdot t & (n-1/10)T < t \leq (n+1/10)T, \\ U = U_0 & (n+1/10)T < t \leq (n+2/5)T, \\ U = -U_0 & (n+3/5)T < t \leq (n+9/10)T, \\ U = -10U_0/T \cdot (t - T/2) & (n+2/5)T < t \leq (n+3/5)T, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $U_0$  是信号幅值,  $T$  是信号周期. 三种信号样式

如图 3 所示.

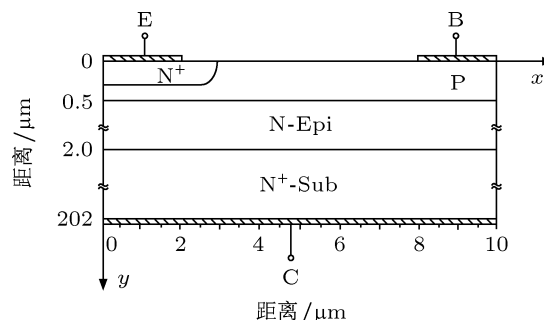


图 1 双极晶体管结构

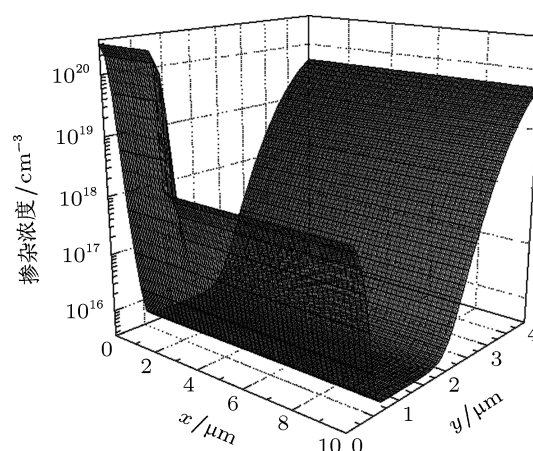


图 2 双极晶体管掺杂分布

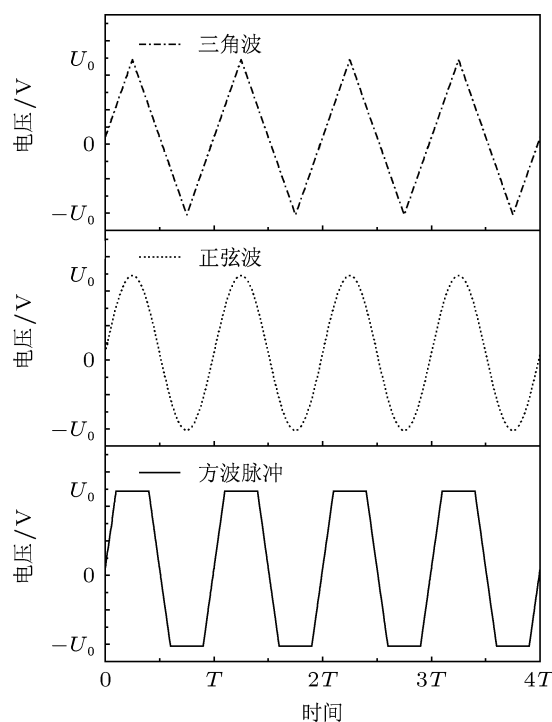


图 3 三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号样式

## 2.2 数值模型

高功率微波注入下器件偏置电压较高, 电流较大, 本文采用热力学模型模拟器件内部载流子的输运过程, 载流子和晶格处于热平衡状态. 考虑温度梯度对电流密度的贡献, 电子和空穴密度方程修正为 [16]

$$\mathbf{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\phi_n + P_n\nabla T), \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_p = -pq\mu_p(\nabla\phi_p + P_p\nabla T), \quad (5)$$

其中  $n$  和  $p$  分别为电子和空穴密度,  $\mathbf{J}_n$  和  $\mathbf{J}_p$  分别代表电子和空穴电流密度,  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别是电子和空穴迁移率,  $\phi_n$  和  $\phi_p$  分别为电子和空穴的准费米能级,  $P_n$  和  $P_p$  分别电子和空穴的绝对热电功率. 模拟 HPM 作用下 BJT 损伤效应需考虑自热效应. 考虑自热效应对器件内部温度扩散的影响需求解以下方程:

$$\begin{aligned} & c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \kappa \nabla T \\ &= -\nabla \cdot [(P_n T + \phi_n) \mathbf{J}_n + (P_p T + \phi_p) \mathbf{J}_p] \\ & - \left( E_C + \frac{3}{2} k_B T \right) \nabla \cdot \mathbf{J}_n - \left( E_V - \frac{3}{2} k_B T \right) \nabla \cdot \mathbf{J}_p \\ & + qR(E_C - E_V + 3k_B T), \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $c$  是晶格热容,  $\kappa$  是热导率,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $R$  为复合率.

## 3 仿真结果与分析

对如图 4 所示的处于放大状态的双极晶体管, 研究了由集电极分别注入三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号时器件的损伤过程. 由于外部电磁干扰信号的频率集中在 1 GHz 左右 [17,18], 因此本节以 1 GHz 信号频率为例, 在双极晶体管集电极注入频率为 1 GHz 的三种电压信号, 直至对器件内部任一点达到硅的熔点 1688 K, 此时判定器件烧毁.

图 5 是信号幅值为 45 V 时三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号注入时器件内部最高温度随时间的变化曲线. 由图 5 可知, 在三种信号的作用下峰值温度随时间变化的整体趋势基本相同, 呈现周期性“增加 - 减小 - 增加”的变化规律, 整体趋势随时间不断升高直至达到器件的烧毁温度; 方波脉冲信号作用下器件的烧毁时间最短, 只有 4.8 ns, 正弦波信号作用下器件烧毁时间为 8.7 ns, 三角波

信号作用下器件烧毁时间最长, 为 16.8 ns; 三种信号作用下器件温度升高都主要发生在负半周, 正半轴器件内部最高温度有所降低. 图 6 是在烧毁时刻

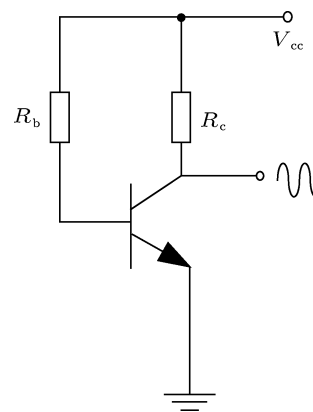


图 4 仿真电路示意图

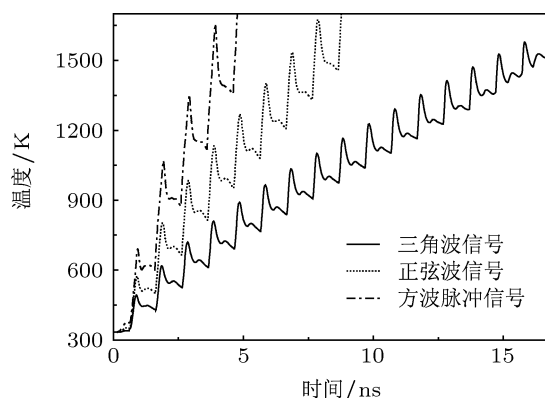


图 5 三种样式的信号作用下器件内部最高温度随时间的变化

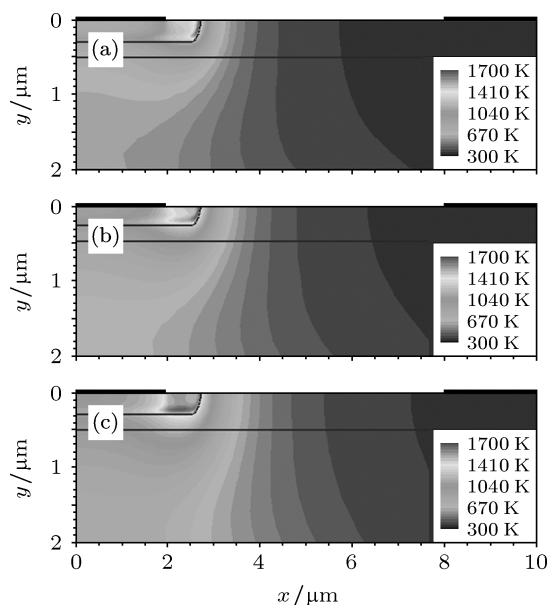


图 6 三种样式的信号注入下烧毁时刻的温度分布 (a) 方波脉冲信号; (b) 正弦波信号; (c) 三角波信号

器件内部的温度分布,可以看出器件内部温度分布基本相同.温度最高点都在发射结柱面处,发射极下面的外延层温度较高,而基极下面的外延层温度较低;与方波脉冲信号和正弦波信号的注入情况相比,三角波信号作用下器件内部温度分布更加分散,这与其损伤时间较长、损伤区域产生的热量向周围扩散有关.

三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号作用下器件内部峰值温度随时间的变化趋势相同,器件的损伤点和温度分布变化基本相同,由此可以推断三种信号对器件的损伤机理基本一致.文献[12]研究了双极晶体管在正弦波信号作用下的损伤效应和机理,三角波信号和方波脉冲信号作用下的失效机理应该与正弦波信号作用下的失效机理相同,损伤机理是在负半周击穿电压较低的发射结发生了雪崩击穿,导致发射结的电流密度和电场强度较高,从而使晶体管因热积累而烧毁.

### 3.1 烧毁时间随电压幅值的变化

图7是在方波脉冲信号、正弦波信号和三角波信号作用下器件烧毁时间随电压幅值的变化情况.图7表明随着信号幅值的增加,三种信号作用下器件烧毁时间都逐渐变短;在幅值相同的情况下,三角波信号注入下器件烧毁时间最长,其次为正弦波信号和方波脉冲信号.相对而言,三角波信号注入下器件烧毁时间随信号幅值变化更加显著,在幅值  $U_0 = 60 \text{ V}$  时烧毁时间为  $5.78 \text{ ns}$ ,而当信号幅值减小到  $U_0 = 40 \text{ V}$  时烧毁时间约为  $27.6 \text{ ns}$ ,是前者的5倍.对于正弦波信号和方波脉冲信号注入下该值分别为4.5倍和4倍.

采用曲线拟合的方法,分别得到了三种信号注入下器件烧毁时间  $t$  和信号幅值  $U$  之间的关系:

三角波信号

$$t = 5.1 \times 10^7 U^{-3.91}, \quad (7)$$

正弦波信号

$$t = 1.0 \times 10^7 U^{-3.68}, \quad (8)$$

方波脉冲信号

$$t = 4.1 \times 10^6 U^{-3.6}, \quad (9)$$

其相关系数  $R^2$  分别为 0.998, 0.997 和 0.99, 表明具有很好的拟合精度. (7)—(9) 式表明三种信号作用时器件烧毁时间和信号幅值都符合  $t = AU^{-B}$  的形

式.因此可以通过测几组烧毁时间和信号幅值的数据来确定公式常数  $A$  和  $B$  值的大小,进而采用该公式来大体预测不同信号样式和信号幅值条件下器件的烧毁时间.

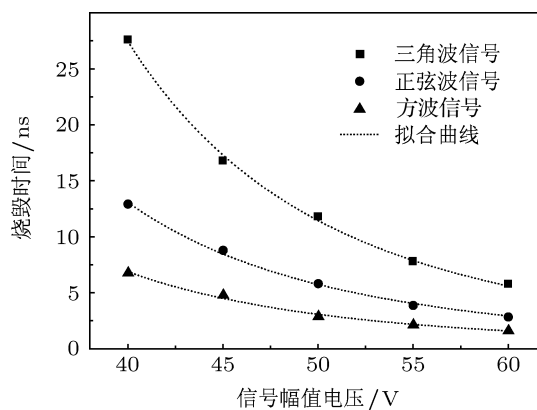


图7 三种样式的信号作用下器件烧毁时间随信号幅值的变化

### 3.2 位移电流随电压幅值的变化

位移电流与电压信号的变化率密切相关,对于高功率微波耦合信号,上升沿和下降沿的时间只有几百皮秒甚至几十皮秒,变化率较高.虽然位移电流不能产生热量,但是在有源区可以转化为传导电流而对器件升温产生间接影响,因此研究位移电流对器件损伤的影响显得尤为重要<sup>[19]</sup>.由于三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号上升沿和下降沿的陡峭程度不同,由此所产生的位移电流大小也不同.图8是三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号作用下器件内部峰值位移电流随信号幅值的变化曲线.曲线表明三种信号位移电流和信号幅值的变化趋势基本相同,位移电流大小随信号幅值的增加而增大;在相同的信号幅值条件下,方波脉冲信号的位移电流最大,其次为正弦波信号和三角波信号.由(1)—(3)式可知,三角波信号、正弦波信号和脉冲信号上升沿变化率的最大值分别为  $4U_0/T$ ,  $2\pi U_0 T$  和  $10U_0/T$ .对于频率为  $1 \text{ GHz}$  的三种信号,三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号的上升时间分别为  $0.25$ ,  $0.25$  和  $0.1 \text{ ns}$ ,在相同的电压信号幅值情况下信号变化率方波脉冲信号大于三角波信号和正弦波信号,而正弦波信号大于三角波信号.因此方波脉冲信号注入下器件位移电流最大,三角波信号注入下位移电流最小.当信号幅值增大时,由于信号上升沿和下降沿的时间不变,三种信号的变化率都会增大,因此三角波信号、正弦波信号和

方波脉冲信号的位移电流随信号幅值的增大而显著升高。

图 9 是三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号分别作用下器件内部位移电流在总电流中的比例随信号幅值的变化曲线。曲线表明随信号幅值的增加, 三种信号作用下器件内部位移电流占总电流的比例降低。幅值由 40 V 增加到 60 V 时, 三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号的位移电流比例分别降低了 11.2%, 10.5% 和 40.4%; 方波脉冲信号作用下器件内部位移电流在总电流中的比例最高, 其次为正弦波信号和三角波信号, 但三种信号位移电流在总电流的比例都不高, 方波脉冲信号作用下位移电流比例只有  $10^{-5}$  量级。

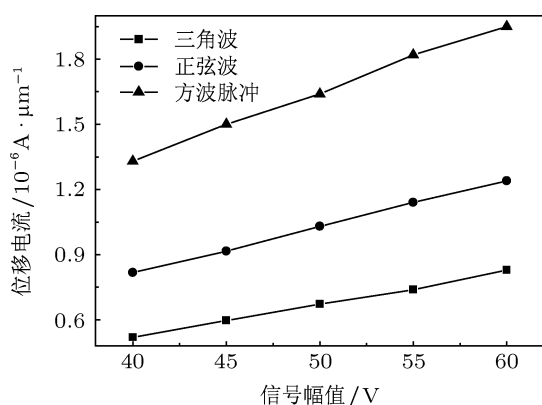


图 8 三种样式的信号作用下器件内部最高位移电流随信号幅值的变化

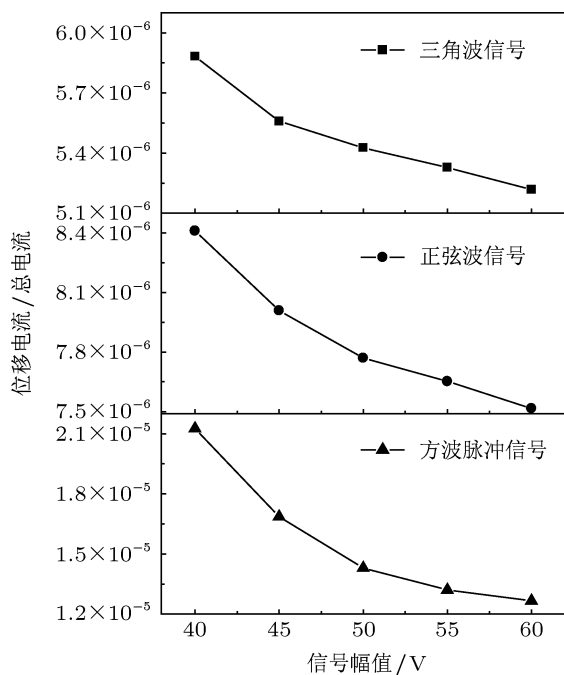


图 9 三种样式的信号作用下位移电流在总电流中所占比例随信号幅值的变化

从以上分析可知, 在信号电压较高时, 位移电流在总电流所占的比例较小, 但随信号幅值的减小其位移电流的比例逐渐升高, 因此当耦合信号的幅值较小时, 位移电流在器件损伤的作用将会比较显著。方波脉冲信号作用下, 随信号幅值的降低, 位移电流的比例下降最多, 表明方波脉冲信号作用下位移电流对器件损伤的影响不如信号幅值对其影响大。换言之, 在高幅值耦合信号作用下, 器件损伤过程中上升沿和下降沿的陡峭程度对方波脉冲信号而言作用并不明显。

### 3.3 峰值温度随时间的变化

图 10 是信号幅值  $U_0 = 45 \text{ V}$  三种信号作用下, 单个周期内器件峰值温度随时间的变化曲线, 表明三种信号作用下器件峰值温度随时间的变化趋势基本相同, 在正半周期峰值温度略有降低, 温升主要发生在负半周; 单个周期内三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号温度幅度分别为 93.2, 167.7 和 264.3 K。由文献 [12] 分析可知, 当信号电压绝对值增加到约 5.8 V 时使集电结正偏, 发射结反偏, 此时信号电压几乎全部加在发射结上, 此时发射结柱面处温度开始升高。在负半周电压绝对值大于 5.8 V 的时间段内 (图 10 阴影部分) 对注入电流和电压的乘积与时间积分, 进而求出三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号的有效注入损伤能量分别为 0.6, 1.0 和 1.6 nJ。

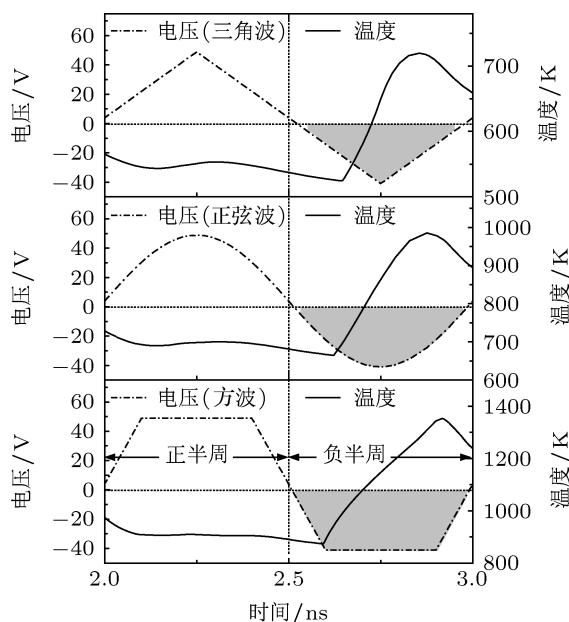


图 10 三种样式的信号作用下器件内部最高温度随时间的变化

通过对比可知,对于不同信号样式,其注入信号能量大小之间决定了器件内部升温幅度的大小,也就决定了器件是否更容易损伤.对于高幅值耦合信号而言,上升沿和下降沿的陡峭程度并不能对损伤时间起到决定性的作用;当耦合信号幅值较低时,不同样式的注入信号产生的位移电流对器件损伤起的作用越来越明显.由于高功率微波对器件的作用时间都较短,一个脉冲的时间只有几十纳秒甚至几个纳秒,因此只通过简单改变信号上升沿和下降沿的陡峭程度而不增加信号功率来使器件更容易损伤的方法是不可行的.

#### 4 损伤时间随信号频率的变化

采用如图 4 所示的电路图,由器件集电极分别注入信号幅值为 55 V,频率为 1—5 GHz 不等的三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号,直至器件烧毁.图 11 给出了三种信号作用下器件烧毁时间和频率的关系,结果表明三种信号作用下器件烧毁时间随频率的增加而增加,当信号频率由 1 GHz 增加到 5 GHz 时,三角波信号、正弦波信号和方波脉冲信号作用下器件的烧毁时间分别增加了 27.1%, 36.7% 和 37.6%.采用拟合的方法分别得到三种信号作用下器件烧毁时间和频率之间的关系:

三角波信号

$$t = 7.75f^{0.149}, \quad (10)$$

正弦波信号

$$t = 3.89f^{0.191}, \quad (11)$$

方波脉冲信号

$$t = 2.13f^{0.197}, \quad (12)$$

拟合系数分别为 0.995, 0.994 和 0.994,表明具有很好的拟合度.(10)—(12) 式表明三种信号作用时器件烧毁时间和频率都符合  $t = af^b$  的关系式.对比三种信号公式可知,方波脉冲信号的时间基数最小,其次为正弦波信号和三角波信号;方波脉冲信号的幂指数最大,其次为正弦波信号和三角波信号.可见在频率相同的情况下,方波脉冲信号的烧毁时间最短,其次为正弦波信号和三角波信号,这与前面

章节分析相对应.信号幅值和频率相同的情况下,相比于三角波信号和正弦波信号,方波脉冲信号更容易使器件损伤.

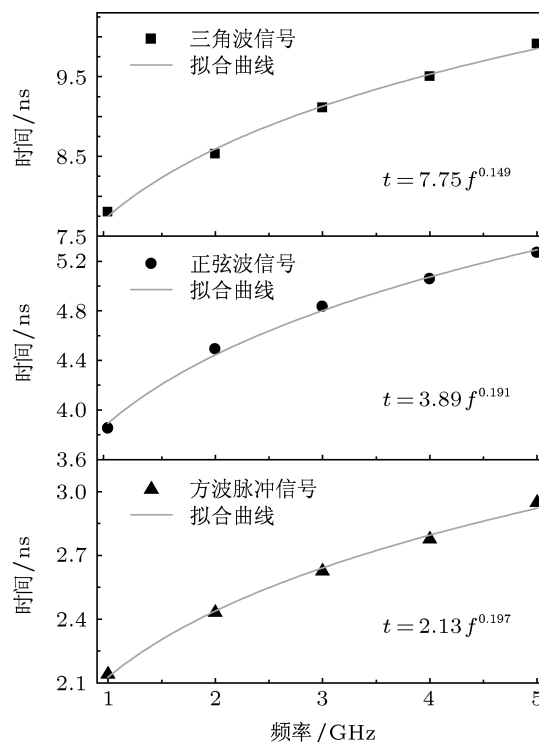


图 11 三种样式的信号作用下器件烧毁时间随信号频率的变化

#### 5 结论

本文采用 Si 基  $n^+p-n^+$  双极晶体管二维电热模型对三种典型样式的高功率微波进行了注入仿真研究.结果表明:在频率和信号幅值相同的条件下方波脉冲信号由于其注入功率较高而更容易使器件损伤,虽然方波脉冲信号引起的位移电流比三角波信号和正弦波信号高,但在总电流所占的比重较小并不是主要因素;由于位移电流随信号幅值的减小在总电流所占的比例升高,因此信号的幅值越低,位移电流对器件损伤过程的影响更显著;三种信号注入下器件烧毁时间和频率的变化趋势基本相同,都随频率的升高而降低.本文的研究结果对半导体器件与电路的抗微波加固设计具有参考价值.

- [1] Kim K, Iliadis A A 2010 *Solid-State Electronics* **54** 18
- [2] Iliadis A A, Kim K 2010 *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.* **10** 347
- [3] Chen X, Du Z W 2010 *Int. Rev. Electr. Eng. IREE* **5** 2500
- [4] Wang H Y, Li J Y, Zhou Y H, Hu B, Yu X Y 2009 *Electromagnetics* **29** 393
- [5] Nana R K, Korte S, Dickmann S, Garbe H, Sabath F 2009 *Adv. Radio Sci.* **7** 249
- [6] Wang H Y, Li J Y, Li H 2008 *Prog. Electromagn. Res.* **87** 313
- [7] Mansson D, Thottappillil R, Nilsson T, Lunden O, Backstrom M 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **50** 434
- [8] Mansson D, Thottappillil R, Backstrom M, Lunden O 2008 *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* **50** 101
- [9] You H L, Lan J C, Fan J P, Jia X Z, Zha W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 108501 (in Chinese) [游海龙, 蓝建春, 范菊平, 贾新章, 查薇 2012 物理学报 **61** 108501]
- [10] Ren Z, Yin W Y, Shi Y B, Liu Q H 2010 *IEEE Trans. Electron Dev.* **57** 345
- [11] Chai C C, Xi X W, Ren X R, Yang Y T, Ma Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8118 (in Chinese) [柴常春, 席晓文, 任兴荣, 杨银堂, 马振洋 2010 物理学报 **59** 8118]
- [12] Kim K, Iliadis A A 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **49** 329
- [13] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 078501 (in Chinese) [马振洋, 柴常春, 任兴荣, 杨银堂, 陈斌 2012 物理学报 **61** 078501]
- [14] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B, Zhao Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 058502
- [15] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B, Song K, Zhao Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 098502
- [16] Integrated Systems Engineering Corp. 2004 *ISE-TCAD Dessis Simulation User's Manual*, Zurich, Switzerland, 2004 p208
- [17] Radasky W A 2010 *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility* Beijing, China, April 12–16, 2010 p758
- [18] Kim K, Iliadis A A 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **49** 876
- [19] Li M Z, Guo C, Chen X B 2006 *J. Semicond.* **27** 1989 (in Chinese) [李梅芝, 郭超, 陈星弼 2006 半导体学报 **27** 1989]

# The damage effect and mechanism of the bipolar transistor induced by different types of high power microwaves\*

Ma Zhen-Yang<sup>†</sup> Chai Chang-Chun Ren Xing-Rong Yang Yin-Tang  
Qiao Li-Ping Shi Chun-Lei

(Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap, Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics,  
Xidian University, Xi'an 710071 China)

(Received 24 December 2012; revised manuscript received 27 February 2013)

## Abstract

By analyzing the variations of the internal distributions of the temperature with time and the current density and the burnout time with the signal amplitude, we study the internal damage process and mechanism of the typical silicon-based  $n^+ - p - n^+$  structure bipolar transistor induced by three kinds of high power microwaves such as triangular wave, sinusoidal wave and square wave. The results show that the base-emitter junction is the damage position and the device is more susceptible to damage under the injection of the square waves. The displacement current and the burnout time increase but the proportion of the displacement current in the total current decreases with signal amplitude increasing. The injected power plays a determinative role in the damage process compared with the displacement current. Adopting the data analysis software, the relation equation between the burnout time  $t$  and the signal frequency  $f$  is obtained. It is demonstrated that the burnout time increases with signal frequency increasing, and the equations of the three kinds of high power microwaves all agree with the formula  $t = af^b$ .

**Keywords:** bipolar transistor, high power microwave, damage mechanism, signal type

**PACS:** 85.30.Pq, 84.40.-x

**DOI:** 10.7498/aps.62.128501

\* Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60776034).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zyma@mail.xidian.edu.cn