

双极晶体管在强电磁脉冲作用下的 损伤效应与机理*

柴常春[†] 席晓文 任兴荣 杨银堂 马振洋

(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)

(2010 年 2 月 5 日收到; 2010 年 4 月 3 日收到修改稿)

针对典型 $n^+ - p - n - n^+$ 结构的双极晶体管, 从器件内部电场强度、电流密度和温度分布变化的分析出发, 研究了在强电磁脉冲 (electromagnetic pulse, EMP) 作用下其内在损伤过程与机理. 研究表明, 双极晶体管损伤部位在不同幅度的注入电压作用下是不同的, 注入电压幅度较低时, 发射区中心下方的集电区附近首先烧毁, 而在高幅度注入电压作用下, 由于基区-外延层-衬底构成的 PIN 结构发生击穿, 导致靠近发射极一侧的基极边缘处首先发生烧毁. 利用数据分析软件, 对不同注入电压下的器件损伤功率 P 和脉宽 T 进行拟合得出了 P 与 T 之间的关系式, 结果表明由于双极晶体管损伤能量的不确定性, 强电磁脉冲损伤的经验公式 $P = AT^{-1}$ (A 为常数) 对于双极晶体管应修正为 $P = AT^{-1.4}$.

关键词: 双极晶体管, 强电磁脉冲, 器件损伤, 损伤功率

PACC: 7340L

1. 引 言

电磁脉冲 (EMP) 是外界过电应力的主要形式之一, 其对微电子器件的破坏性很大, 已有 EMP 对微电子器件的损伤效应研究报道, Wunsch 和 Bell 基于实验数据和简单的热失效模型建立了器件的失效评估公式^[1]; Dobykin 等人^[2,3] 开展了 pn 结在大功率电磁脉冲作用下的热效应分析和模型研究, 获得了热传导方程以及结温与脉冲持续时间之间的关系. 这些研究都是建立在假设器件为一个热传导模型的基础上分析器件在电磁脉冲作用下的损伤效应, 这种研究方法虽然可以对微电子器件的可靠性评估提供一定的理论基础, 但模型脱离了器件的典型结构, 具有一定的局限性. 鉴于针对具体微电子器件结构的 EMP 损伤效应研究甚少, 并且随着集成度的提高和器件几何尺寸的进一步缩小, 器件内部电场强度、电流密度和温度的分布与变化在 EMP 对器件的作用过程中的影响越来越显著, 以往简单的热模型对微电子器件的 EMP 损伤评估的局限性

愈加明显, 因此结合典型微电子器件结构研究 EMP 作用下器件内部电场强度、电流密度和温度的分布与变化规律, 进而采用有针对性的措施提高其抗 EMP 损伤的能力^[4] 是非常必要的.

作者已经研究报道了硅基集成低噪声放大器 (LNA) 在脉冲调制射频信号作用下的损伤效应, 实验结果显示 LNA 内部的双极晶体管 (BJT) 最容易受到过电应力的影响而产生损伤效应^[5,6], 但文献^[5,6] 作为实验研究报道并未对 BJT 内部的电场强度、电流密度和温度的分布变化规律进行研究和分析. 为了深入探讨 BJT 的过电应力损伤机理, 本文利用器件仿真软件 Medici, 结合现代典型双极型器件 $n^+ - p - n - n^+$ 结构, 分析了双极器件在集电极注入脉冲电压作用下其内部电场强度、电流密度和温度随脉冲作用时间的分布变化规律. 讨论了不同脉冲电压幅度作用下双极晶体管的损伤部位, 获得了器件 EMP 损伤部位随着注入电压幅度的变化而变化的规律. 对现有的 EMP 损伤功率经验公式进行了修正, 给出了针对双极晶体管的损伤功率与脉宽之间修正后的关系.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60776034) 资助的课题.

[†] E-mail: ccchai@mail.xidian.edu.cn

2. 器件结构

本文采用现代典型双极晶体管结构. 由于器件结构的对称性, 图 1 只给出了 BJT 器件结构的一半, 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 Y 的正方向, B, C, E 分别表示双极晶体管基极、集电极和发射极; N^+ 是 n 型重掺杂发射区, P 是 p 型掺杂基区, N -Epi 是 n 型外延层, N^+ -Sub 是 n 型重掺杂硅衬底. 此处器件杂质分布与文献[7]中的器件杂质分布相同.

与文献[7]中对孤立器件的 EMP 损伤分析不同, 为了真实反映 EMP 作用下器件内部电场强度、电流密度和温度的分布变化情况, 此处注入电压与器件 C 极间串联了 50Ω 负载电阻 R_c (图 1). 在 E 极和 B 极接地情况下, 对 R_c 施加上升沿为 100 ps , 幅度为 50 V 的阶跃脉冲电压, 并维持至器件烧毁. 采用 2D-Medici 电热耦合模型对其进行仿真分析, 将器件中局部点温度达到 1688 K 的硅熔点作为器

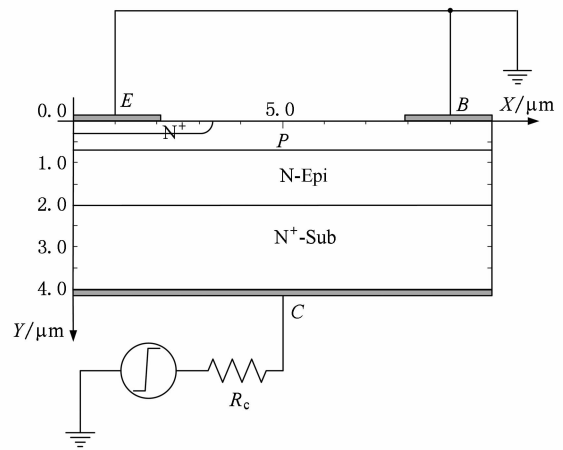


图 1 仿真结构示意图

件烧毁的判据.

3. 仿真结果与分析

3.1. 电场强度随脉冲作用时间的分布变化

图 2 给出了在阶跃脉冲作用下, 器件内部电场

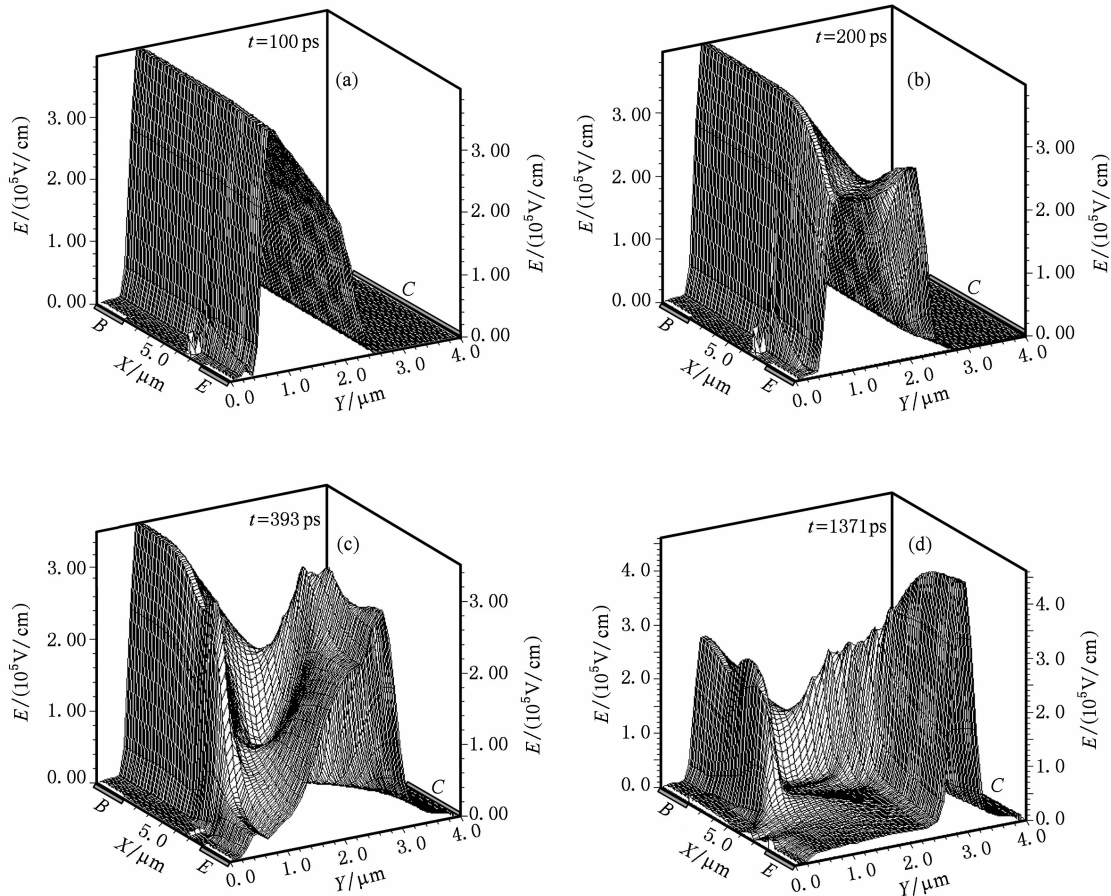


图 2 电场强度随脉冲作用时间的分布变化 (a) 100 ps; (b) 200 ps; (c) 393 ps; (d) 1371 ps

强度随脉冲作用时间的分布变化情况. 初始时较高的电场强度位于器件的 pn 结处, 其中集电区和基区的 pn 结处是器件中电场强度最集中的部位(图 2(a)). 由于发射区的重掺杂使其下面的 pn 结具有较低的雪崩击穿电压, 随着集电极电压增加达到一定强度之后, 雪崩击穿和导通现象首先在这个位置出现, 从而使该处的电场强度峰值逐渐减弱并消失(图 2(b)), 而集电极附近靠近发射极一侧的位置则会出现对应的电场强度峰(图 2(c)), 并且随着脉冲作用时间的持续峰值逐渐向集电极方向扩展(图 2(d)).

3.2. 电流密度随脉冲作用时间的分布变化

图 3 给出了在阶跃脉冲作用下, 器件内部电流密度随脉冲作用时间的分布变化情况. 刚开始当器件所加电压太小不足以使 $B-E$ 结正偏时, 发射区下面 PIN 结构的反偏电流只能沿着结下面横向流向基极, 导致靠近发射极一侧的基极边缘处出现最大电流密度(图 3(a)), 同时产生一个横向电势差^[8]. 随着脉冲电压幅度的增加, 横向电势差(图 4)将导致在发射结的中心($x=0$)处首先出现 $B-E$ 结正偏, 靠

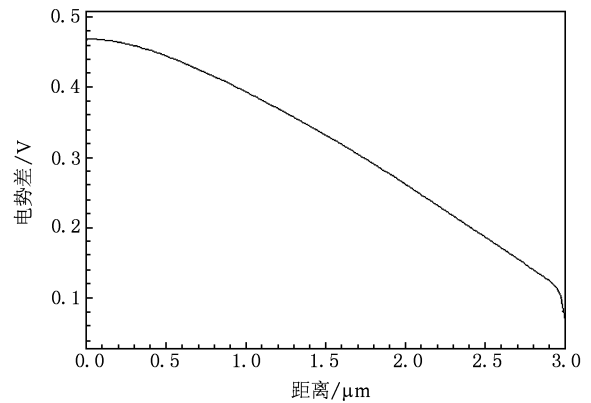


图 4 200 ps 时 $y=0.3 \mu\text{m}$ 处从发射结中心到边缘的横向电势差

近中心处的基区电子浓度增加, 从而导致进入集电结的电子数量增加, 雪崩电流增加, 在发射极中心和集电极之间出现导电通道(图 3(b)). 伴随脉冲作用时间的持续, 从雪崩区注入到基区的空穴越来越多, 将导致整个 $B-E$ 结正偏. 此时在 $x=2-3 \mu\text{m}$ 处的电流都将流向发射极边缘($x=2 \mu\text{m}, y=0$), 从而在此处产生一个电流密度峰值(图 3(c)), 并最

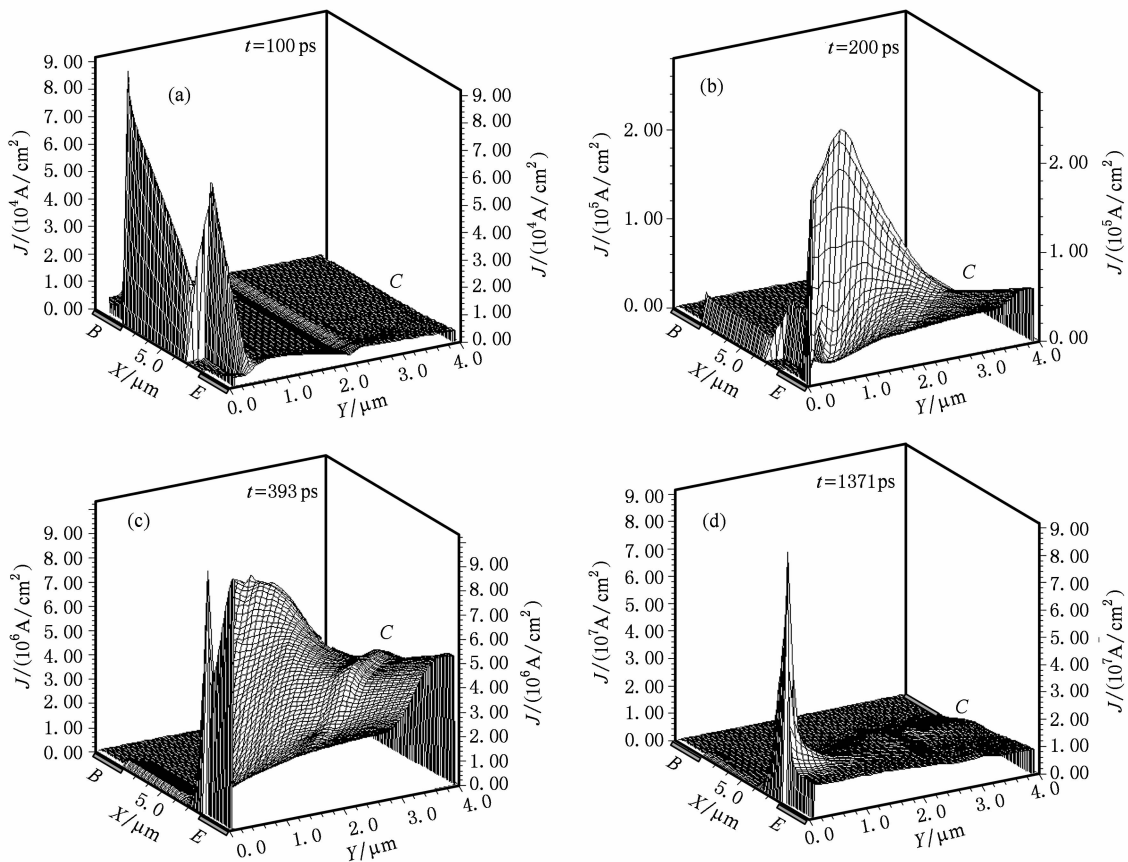


图 3 电流密度随脉冲作用时间的分布变化 (a) 100 ps; (b) 200 ps; (c) 393 ps; (d) 1371 ps

终成为器件的最大电流密度处(图 3(d)).

3.3. 温度随脉冲作用时间的分布变化

图 5 是阶跃脉冲作用下, 器件内部温度分布随脉冲作用时间不同的变化情况. 功率密度是 $Q = J \cdot E$, 所以温度由电流密度 J 和电场强度 E 两个参数共同决定. 在 $t = 200$ ps 时, 发射极中心和集电极之间出现导电通道, 此时功率密度 Q 的大小主要由电流密度 J 决定, 温度分布与电流密度分布相似, 峰值温度位于电流密度峰值处; 在 $t = 393$ ps 时, 发射区之下的集电区处出现电场强度峰值, 此时功率密度 Q 大小主要由电场强度 E 决定, 则温度分布相似于

电场强度分布, 峰值温度出现在电场强度峰值附近, 并且随着时间的持续一直增至器件烧毁. 从图 5(c) 明显看出, 在 $t = 1371$ ps 时, 发射极附近存在一个温度次极大值, 这是因为在此处电流密度很大(图 3(d)), 但其电场强度却很小(图 2(d)), 所以并非器件的首先烧毁部位. 可见, 由于电流密度和电场强度两者的分布共同决定了器件内部温度分布, 因此在器件结构的设计中, 如果设法改变器件的电流密度和电场强度的分布情况, 使其不在器件内部的同一位置同时出现极值, 则可以有效提高器件的抗 EMP 能力.

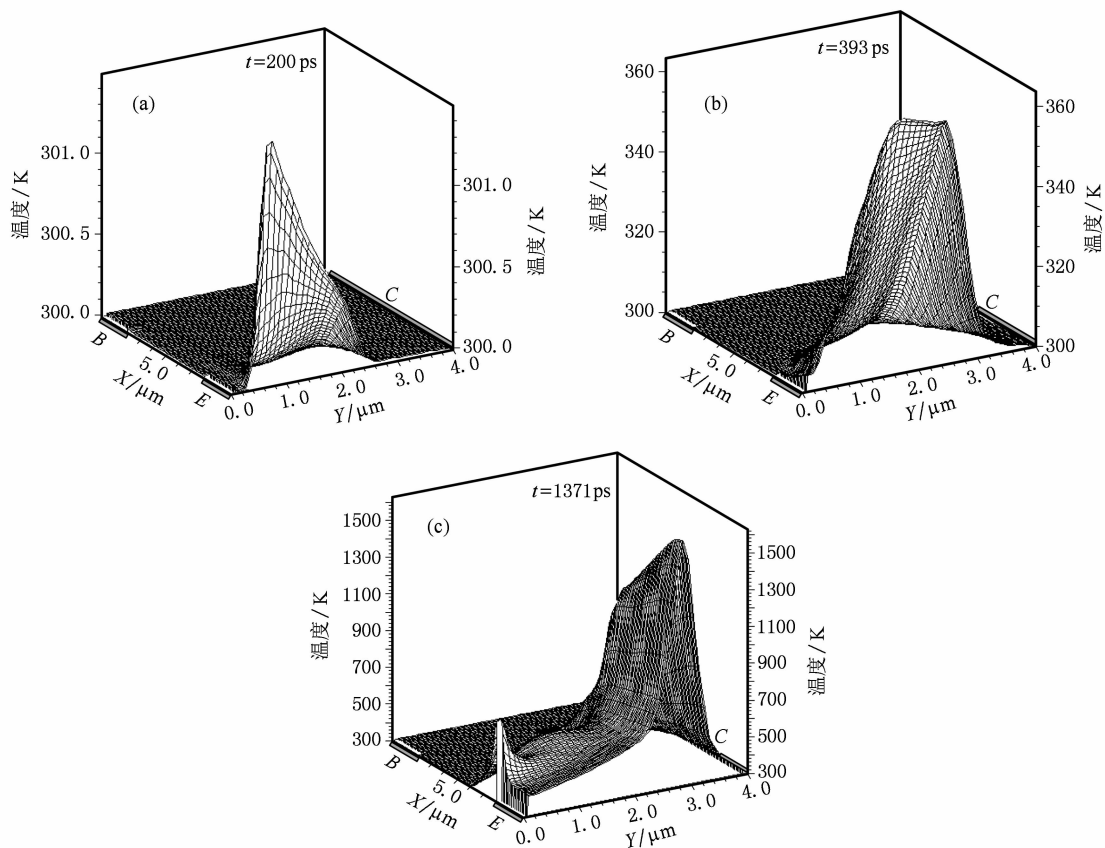


图 5 温度随脉冲作用时间的分布变化 (a) 200 ps; (b) 393 ps; (c) 1371 ps

3.4. 高幅度阶跃脉冲注入下的损伤效应

当注入电压足够大时, 由基区-外延层-衬底组成的 PIN 结构(图 1), 将出现“双峰电场”^[9]. 图 6 是器件在幅度为 130 V 的阶跃脉冲作用下的电场强度、电流密度和温度的分布情况. 在高幅度注入电压下, 双极晶体管内部的 PIN 结构将发生“雪崩电离”和“双注入”现象^[9], 从而导致靠近发射极一侧

的基极边缘处既是电场强度峰所在(图 6(a)) 同时又是电流密度密集之处(图 6(b)), 该处热量产生集中, 升温快, 且会迅速超过低幅度注入电压下的烧毁热点(发射区中心下方的集电区附近), 成为器件最先烧毁部位(图 6(c)). 由此可见, 双极晶体管在 EMP 作用下, 除发射区中心下方的集电区附近外, 靠近发射极一侧的基极边缘处也是易受 EMP 损伤的部位之一. 因此在双极晶体管的抗 EMP 损伤设

计中,针对不同的应用场合和不同幅度的阶跃脉冲,应采取不同的加固对策.

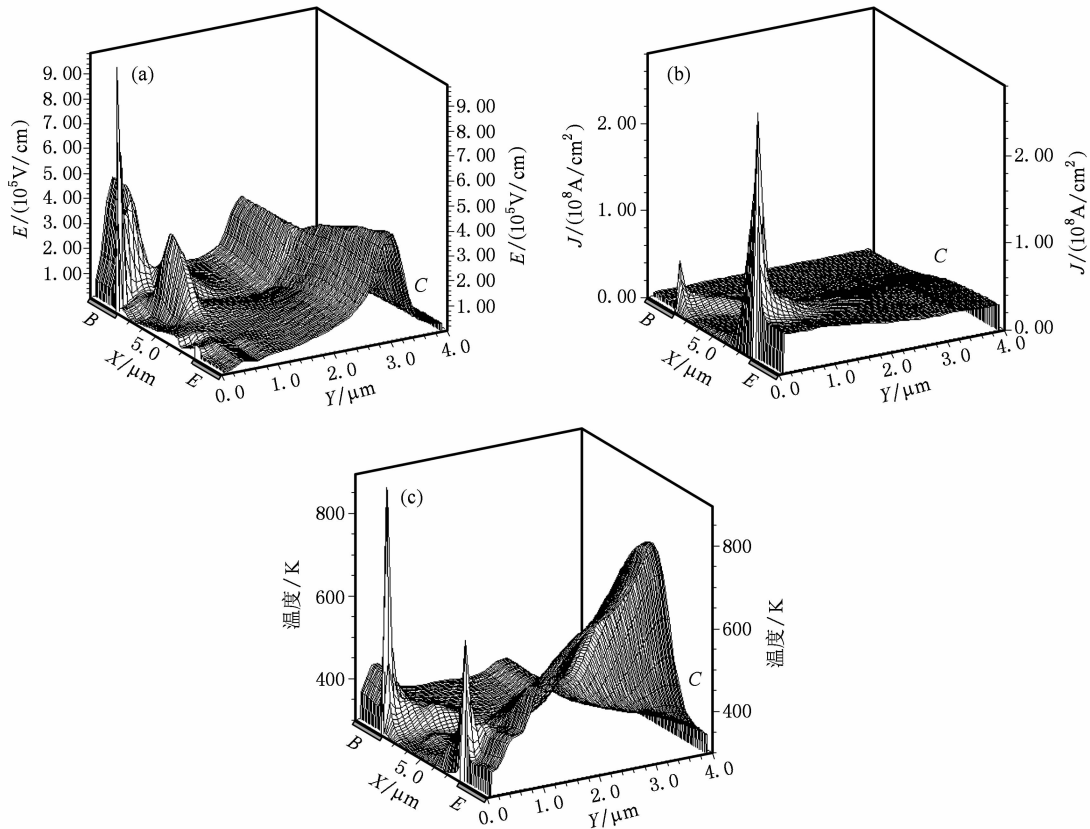


图6 注入电压为 130 V 下的电场强度、电流密度和温度的分布 (a)电场强度;(b)电流密度;(c)温度

3.5. 损伤功率与脉宽之间的关系

目前,电磁脉冲损伤功率的研究一般都假设器件为球形热源模型,根据脉冲宽度的不同,把器件的损伤分为三部分(短脉冲假设是绝热状态、长脉冲考虑散热、热产生和热传导之间达到平衡),其损伤功率随脉宽之间变化的规律如图 7 所示^[10],它也是业内普遍认同的规律之一.在强电磁脉冲(ns 量

级)作用下,器件处于短脉冲绝热状态,图 7 中其电磁脉冲损伤对应的经验公式为

$$P = AT^{-1}. \tag{1}$$

此处将双极晶体管 EMP 损伤过程中的最大功率值作为该器件的损伤功率阈值,将器件的烧毁时间作为电压脉冲的脉宽.通过对双极晶体管进行不同电压幅度作用下的注入损伤分析,获得了如图 8 所示的器件损伤功率 P 与脉宽 T 之间的关系.利用曲线拟合软件对其进行了拟合,得到 P 与 T 之间的关系式为

$$P = 13.7T^{-1.4}, \tag{2}$$

其相关系数 $R^2 = 0.98$ 表明具有很好的拟合精度.

传统上,利用球形热源模型分析获得的强电磁脉冲损伤的经验公式(1),都是基于器件在强电磁脉冲作用下的损伤能量为恒定值^[10],然而对于典型 $n^+ - p - n - n^+$ 结构的双极晶体管,在强电磁脉冲作用下其损伤能量并非恒定值^[11,12].由于器件的热点位置在不同的电磁脉冲强度作用下有所不同,从而导致了器件的损伤能量出现三个恒值区和一个上升区^[11],进而导致了图 7 所示的 $P-T$ 经验公式中指

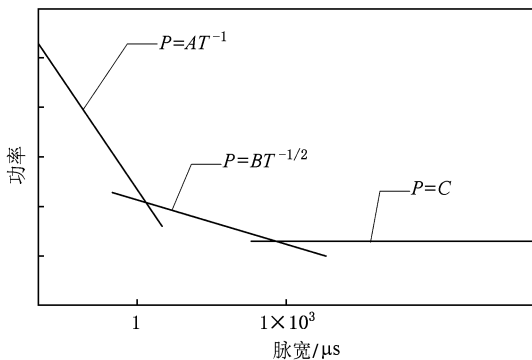


图7 损伤功率随脉宽变化规律示意图^[10](其中 A, B, C 为常数, P 为损伤功率, T 为脉宽)

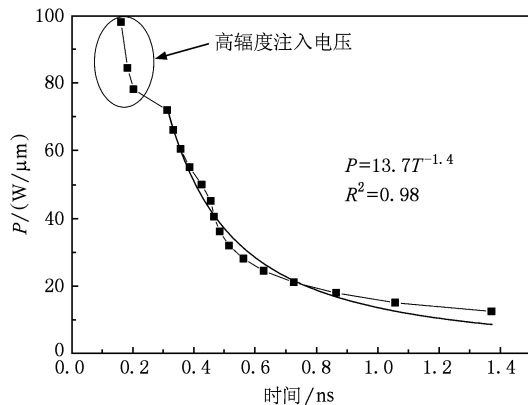


图8 双极晶体管损伤功率与脉宽之间的关系

数的修正. 图8同时表明, 器件的损伤功率在高幅度注入电压下存在跳变, 这是由于在高幅度注入电压下, 器件的基区-外延层-衬底组成的PIN结构发生了击穿^[9], 从而导致了器件的烧毁时间急剧下降, 在较小脉宽下就出现了损伤.

4. 结 论

在EMP对双极晶体管的损伤过程中, 温度是评

估器件损伤程度的重要依据之一, 它直接影响器件的性能参数和可靠性. 本文的研究表明, 器件的烧毁是由电场强度和电流密度两方面共同决定, 电场强度或电流密度的峰值部位也并非器件峰值温度所在处, 因此在分析器件的EMP损伤特性中, 必须同时兼顾电场强度和电流密度两个方面. 在注入电压幅度较低时, 发射区中心下方的集电区附近首先发生烧毁, 这与以往实验结果相符合, 由于实验都是通过逐渐增加注入电压来测量和判断器件的电磁脉冲损伤效应, 其损伤部位也是与最小损伤电压相对应, 但对于高幅度脉冲注入的损伤效应, 则未见相关研究报道. 本文的研究结果进一步揭示, 当注入电压幅度比较大时双极晶体管的损伤部位位于靠近发射极一侧的基极边缘处, 这就意味着在双极器件的抗EMP损伤设计中, 这一部位也应该是加固中需要加以考虑的部位. 由于双极晶体管在强电磁脉冲作用下的损伤能量并非恒定值, 强电磁脉冲损伤的经验公式 $P = AT^{-1}$ 其时间项指数应修正为 -1.4 , 从而更好的对其EMP损伤效应进行评估.

- [1] Wunsch D C, Bell R R 1968 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **15** 244
- [2] Dobykin V D, Kharchenko V V 2006 *Journal of Communications Technology and Electronics* **51** 231
- [3] Dobykin V D 2008 *Journal of Communications Technology and Electronics* **53** 100
- [4] Wang Y, Jia S, Sun L, Zhang G G, Zhang X, Ji L J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7243 (in Chinese) [王源、贾嵩、孙磊、张钢刚、张兴、吉利久 2007 物理学报 **56** 7243]
- [5] Chai C C, Yang Y T, Zhang B, Leng P, Yang Y, Rao W 2008 *Journal of Semiconductors* **29** 2403 (in Chinese) [柴常春、杨银堂、张冰、冷鹏、杨杨、饶伟 2008 半导体学报 **29** 2403]
- [6] Chai C C, Yang Y T, Zhang B, Leng P, Yang Y, Rao W 2009 *Semiconductor Science and Technology* **24** 035003
- [7] Xi X W, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Zhang B 2009 *Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, Suzhou, China, July 6—10, 2009 p443
- [8] Manck O, Engl W L 1975 *IEEE Transaction on Electron Device* **22** 339
- [9] Yu W, Cai X H, Huang W H, Liu G Z 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 355 (in Chinese) [余稳、蔡新华、黄文华、刘国治 1999 强激光与粒子束 **11** 355]
- [10] Li P, Fang J Y, Liu G Z, Huang W H 2000 *Experiment and Study* **23** 70 (in Chinese) [李平、方进勇、刘国治、黄文华 2000 试验与研究 **23** 70]
- [11] Xi X W, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Zhang B, Hong X 2010 *Journal of Semiconductors* **31** 044005
- [12] Zhou H A, Du Z W, Gong K 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1861 (in Chinese) [周怀安、杜正伟、龚克 2005 强激光与粒子束 **17** 1861]

The damage effect and mechanism of the bipolar transistor induced by the intense electromagnetic pulse^{*}

Chai Chang-Chun[†] Xi Xiao-Wen Ren Xing-Rong Yang Yin-Tang Ma Zhen-Yang

(School of Microelectronics, Xidian University, Key Lab of Ministry of Education for Wide Band-Gap

Semiconductor Materials and Devices, Xi'an 710071, China)

(Received 5 February 2010; revised manuscript received 3 April 2010)

Abstract

A study of the internal damage process and mechanism of the typical $n^+ - p - n^+$ structure bipolar transistor induced by the intense electromagnetic pulse (EMP) is carried out in this paper from the variation analysis of the distribution of the electric field, the current density and the temperature. Research shows that the damage position of the bipolar transistor is different with the different magnitude of the injecting voltage, when the magnitude of the injecting voltage is low the damage will appear firstly near the collector region under the center of the emitter region, and when the magnitude of the injecting voltage is sufficiently high the damage will appear firstly at the edge of the base near the emitter due to the breakdown of the PIN structure composed of the base-epitaxial layer-collector. Adopting the data analysis software, the relation equation between the device damage power P and the pulse width T under different injecting voltage is obtained. Owing to the variety of the device damage energy, it is demonstrated that the empirical formulas of the intense electromagnetic pulse $P = AT^{-1}$ (A is a constant) is modified to $P = AT^{-1.4}$ for the bipolar transistor.

Keywords: bipolar transistor, the intense electromagnetic pulse, device damage, damage power

PACC: 7340L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60776034).

[†] E-mail: ccchai@mail.xidian.edu.cn