

文章编号: 1001- 4322(2000)02- 0215- 04

二极管失效和烧毁阈值与电磁波参数关系*

余 稳, 蔡新华

黄文华, 刘国治

(常德师范学院电子学研究所, 湖南常德, 415000)

(西北核技术研究所, 西安市 69 信箱, 710024)

摘 要: 利用半导体 PN 结器件一维模拟程序 mPND ID, 计算了二极管在不同电磁脉冲电压源条件下的失效和烧毁时器件吸收的能量, 并对结果作了初步分析。

关键词: 电磁脉冲; 半导体器件; 失效和烧毁; 时域有限差分

中图分类号: O 475; O 472; O 241. 82

文献标识码: A

半导体结器件烧毁有热模式与电流模式^[1]两种: 热模式脉宽大于 100ns, 电流模式脉宽在几十纳秒以下, 本文主要讨论半导体器件的电流模式破坏。我们利用半导体 PN 结器件一维模拟程序 mPND ID^[2] (用时域有限差分方法, 求解载流子所满足的由载流子连续性方程、泊松方程、热流方程等 8 个方程组成的耦合、非线性、刚性方程组), 计算了二极管在不同电磁脉冲电压源、不同幅度、不同频率等条件下的失效和烧毁能量阈值。这里, 当器件内部某处温度达到 800K 时认为器件已不能正常工作, 即失效; 当器件内部某处温度达到 1680K 时, 由于已达到硅材料的熔点, 认为此时器件被烧毁。器件从加压到被烧毁过程中, 内部载流子浓度分布、电场分布及温度分布等的变化情况, 请参阅文献[3]。

1 计算条件

1.1 器件结构及掺杂分布

采用如下模型: PN 结为 p^+nn^+ 结构, 结两侧为欧姆接触。具体结构及参数为: 在 n^+ 基底硅材料上掺杂 10^{19}cm^{-3} 的施主杂质 (N_{sub}), 在其表面生长一层 $4.0 \mu\text{m}$ 厚的 n 型外延层 (掺杂受主浓度 $N_{\text{epi}} = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$), 此时的杂质分布可用余误差函数描述, 受主杂质扩散入外延层而形成 p 区, 杂质分布为高斯型, 其中: 表面浓度 $N_{\text{sur}} = 10^{19} \text{cm}^{-3}$, PN 结处 (深度 $D = 0.5 \mu\text{m}$) 浓度 $N_{\text{int}} = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。器件长度 $4 \mu\text{m}$, 面积 10^{-6}cm^2 , 少子寿命 10^{-6}s 。

1.2 边界条件和初始条件

边界条件: 假设器件两端均采用欧姆接触, 这样在器件两端便没有电流堆积。因此在边界上, 载流子浓度满足关系 $np = n_i^2$, $p - n + N = 0$ 。其中 n 、 p 、 n_i 及 N 分别表示电子浓度、空穴浓度、本征浓度及掺杂浓度。设器件两端均与温度为 300K 的热阱接触, 即边界上的温度始终是 300K。

初始条件: 器件内初始温度为 300K, 载流子浓度及电位分布为零偏压时的平衡载流子浓度及电位分布。

1.3 外电路

计算时所用电路由电压源 V_{source} 、二极管及其旁路电容 C 和串联电阻 R 组成。此处 C 取值 2pF , R 取值 50Ω 。

1.4 电压源

我们用了三种形状电磁脉冲电压源, 分别是: 常上升率 (上升时间 1ns) 形、方波和正弦波, 电压幅度均取负值。

* 国家 863 激光技术领域、湖南省高校科研青年项目资助课题
1999 年 9 月 3 日收到原稿, 2000 年 1 月 24 日收到修改稿。
余 稳, 男, 1966 年 3 月出生, 硕士, 副教授

2 计算结果及分析

计算结果如图 1 至图 5 所示。图 1 给出了不同形状电磁波在不同幅度下器件失效和烧毁时的吸收能量及所需时间。图例中,“800K”、“1680K”分别表示器件失效和烧毁;“const”、“squire”、“sine”分别表示对应的电磁波形状为常上升率形、方波、正弦波;“energy”、“time”分别表示器件失效或烧毁时所吸收的能量、所需时间。如:“1680K- energy- sine”表示电压源为正弦波时器件烧毁时所吸收的能量,图中,正弦波频率为 1GHz。从计算结果看,对不同形状电压源,失效和烧毁所需时间与电压幅度的关系曲线形状差不多,均为所需时间随电压幅度减小急剧增加,正弦波电压源所需时间最多,且时间随电压幅度变化最快。但对不同形状电压源,失效和烧毁吸收能量与电压幅度的关系曲线形状却不同,方波和常上升率形对应的曲线形状差不多,吸收能量值随电压幅度减小而减小,最终(在电流模式范围内)趋于常数,只是方波所需能量多且下降速度快,但正弦波所对应的曲线却具有极小值。方波与常上升率形电压源所对应曲线的差异由不同上升时间引起,因此只需分析方波和正弦波情形。

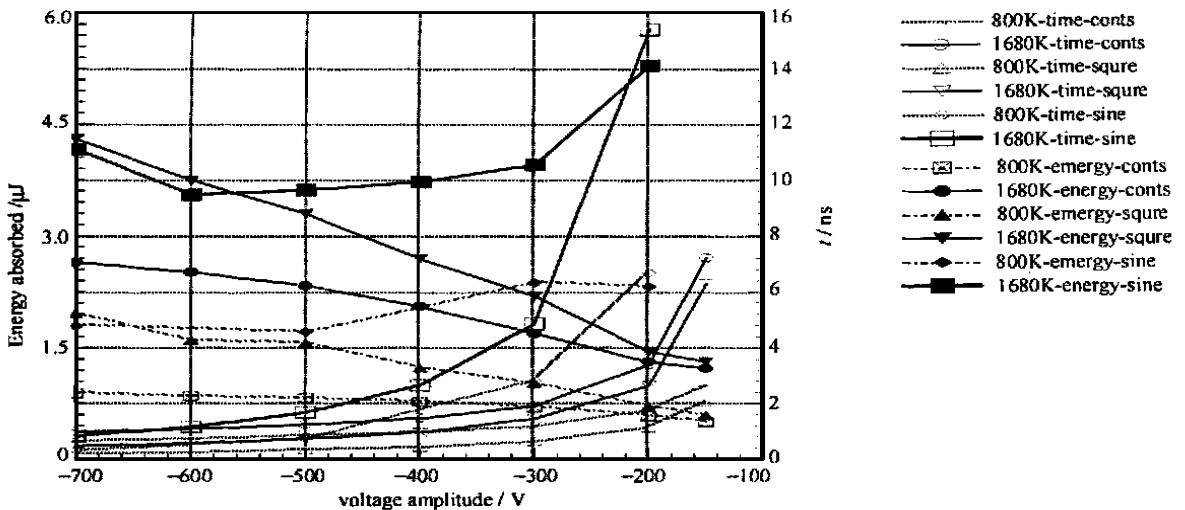


Fig 1 Energy absorbed and time needed for diode failure and burnout vs RF amplitude (with different shapes)

图 1 不同形状电磁波在不同幅度时器件失效和烧毁能量阈值及所需时间

方波引起器件烧毁时内部电场及温度分布如图 2 所示。由于是一维模拟,器件内部各处电流密度相同,因此器件中某点的电场强度将正比于其电阻率和加热速率,温度分布可表明热量沉积情况。从温度

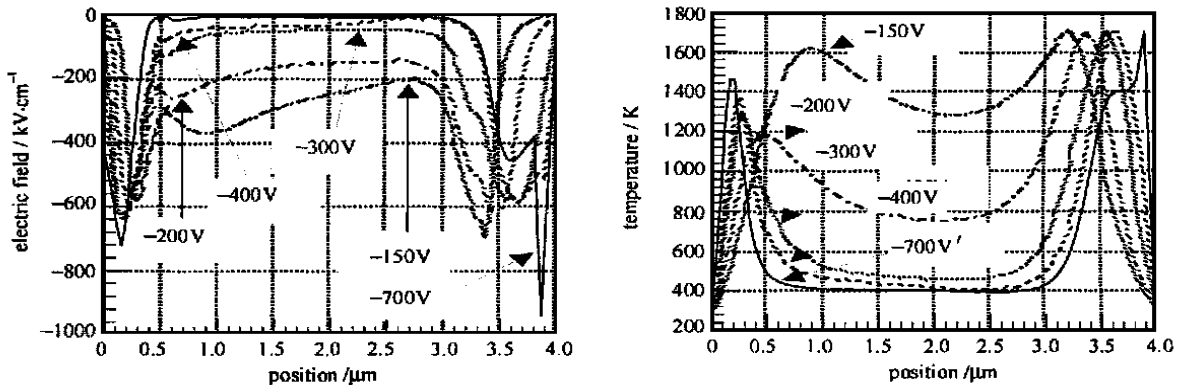


Fig 2 Electric field and temperature distributions for burned diode by square sources with different amplitudes

图 2 不同幅值方波源引起器件烧毁时器件内部电场强度及温度分布

分布曲线可看出,电压幅度减小到 150V 后,热量沉积主要集中在 PN 结及高低结之间,且与外界交换热量很少(器件两端温度梯度很小),中间温度分布趋于一致,因此烧毁能量值趋于常数,该值将近似等于加热该区域至烧毁所需热量,这符合 W unsch-Bell 模型^[4]的预言结果,W unsch-Bell 模型仅适用于器



件烧毁所需时间很长时的情形, 对于短脉冲(请注意, 此处所说长脉冲和短脉冲是与器件结构和外电路参数相关的相对量), 即电压幅度增大时的情形。从图 2 中温度分布看, 热量沉积主要集中在 PN 结区内, 且随着电压幅度增加(或脉冲时间缩短)热量沉积区向器件两端靠近, 而中间部分温度变化很小, 如果仅从这方面考虑, 此时器件烧毁所需能量应该减小。但从图 2 还可以看出, 此时器件两端温度梯度很大, 即向外界传递的热量很多, 因此此时所需能量实际上比长脉冲时多。从以上分析及图 1 曲线可知, 对于方波脉冲源, 器件烧毁能量阈值随电压幅度的增加而增加, 所需时间则随幅度的增加而减少。

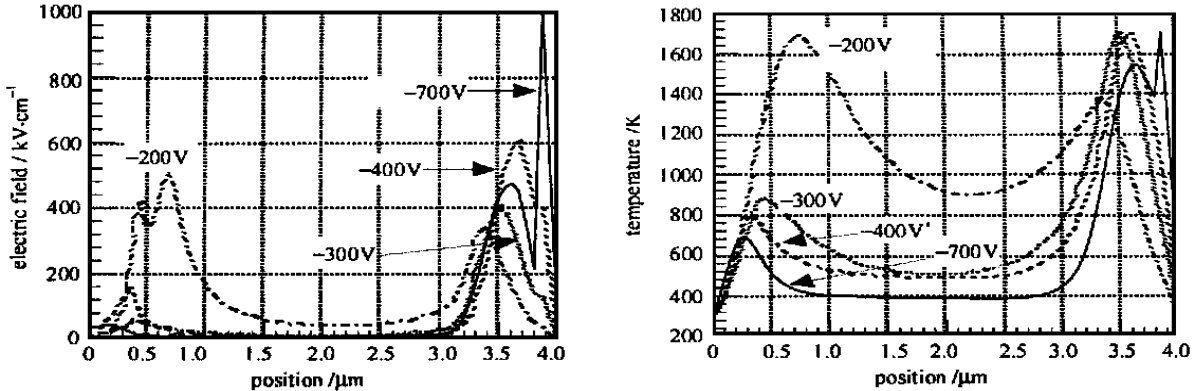


Fig 3 Electric field and temperature distributions for burnouted diode by sine sources with different amplitudes

图 3 不同幅值正弦波源(1GHz)引起器件烧毁时器件内部电场强度及温度分布

正弦波源引起器件烧毁时内部电场及温度分布如图 3 所示。正弦波源时温度分布随电压幅度的变化情况(图 3)与方波源时的(图 2)显著不同。从图 3 可看出, 随着正弦波振幅增加, PN 结区能量沉积明显减小, 而高低结区能量沉积增大, 靠近 PN 结区一端温度梯度有由大到小再到大的过程, 而靠近高低结一端温度梯度由小到大迅速增加, 多种机制综合作用的结果是: 器件烧毁时吸收能量值对源振幅存在极小值, 如图 1 中实正方形数据线所示。

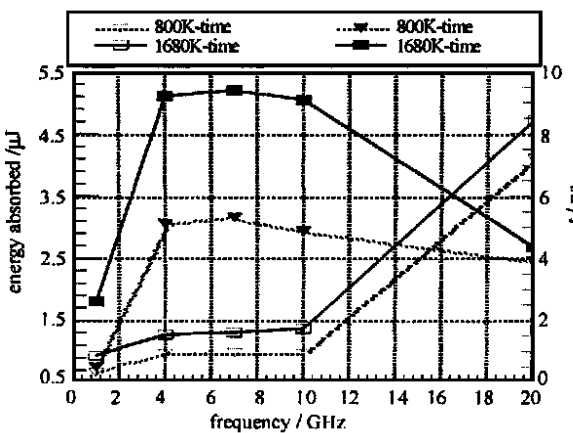


Fig 4 Energy absorbed and time needed for diode burnout with 600V sinusoidal wave stimulation vs frequency

4 正弦波源(振幅均为 600V)激励下, 器件烧毁吸收能量值及所需时间随频率的变化

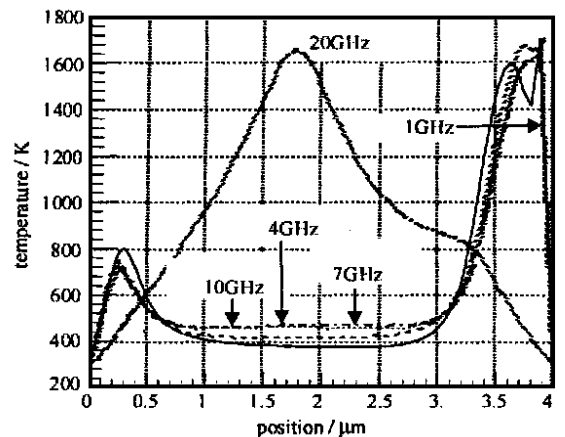


Fig 5 Temperature distribution for burnouted diode stimulated by 600V sinusoidal wave with different frequency

图 5 不同频率正弦波源(振幅均为 600V)激励下, 器件烧毁时温度分布随频率的变化

图 4 显示了不同频率正弦波源(振幅均为 600V)激励下, 器件烧毁时吸收能量值及所需时间的变化情况, 图 5 所示为器件烧毁时内部温度分布随正弦波源频率的变化情况。从图 4 可看出, 低频部分(相应于短脉冲)烧毁能量值随着频率增加而增加, 高频部分(相应于长脉冲)烧毁能量值随着频率增加而减小。低频部分随着频率增加, 二极管两端电压下降, 因而结区雪崩产生系数减小, 载流子浓度在复合作用下变小, 因而电场强度增加且强场区扩大, 从而能量值增大, 从温度分布曲线(图 5)可明显看出这点。但

随着频率继续增大将出现另一现象。以 20GHz 驱动源为例, 此时载流子在源驱动下半个周期内能移动的最大距离(设载流子饱和漂移速度为 $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$)为 $2.5 \mu\text{m}$ 。

本计算所用器件 PN 结到高低结间距离为 $3 \mu\text{m}$, 因此此时载流子只能在结间来回运动而无法逃逸, 加热将局限于结间区域, 且与器件两端热交换少, 及两端温度梯度很小, 如图 5 中曲线所示。

3 结论

通过计算电磁波激励源各参数对二极管失效和烧毁能量阈值的影响, 得出结论: 当用方波源激励时, 器件烧毁能量阈值随电压幅度而增加, 但所需时间却随之减少, 上升时间越小变化越明显。当激励源为正弦波时, 固定频率则烧毁能量阈值对电压振幅存在极小值, 烧毁所需时间随振幅增大而快速减小; 固定振幅则烧毁能量阈值对频率存在极大值, 烧毁所需时间随频率快速增加。另外, 器件烧毁部位也随激励源参数不同而变化。

参考文献

- [1] Orvis W J, et al A review of the physics and response models for burnout of semiconductor devices[C]. UCRL-53573(1984)
- [2] 余稳, 蔡新华, 黄文华, 刘国治 一维 PN 结二极管模拟程序 mPND ID [J]. 常德师范学院学报(自然科学版), 2000, 3: 18
- [3] 余稳, 蔡新华, 黄文华, 刘国治 电磁脉冲对半导体器件的电流模式破坏[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 355~ 358
- [4] Wunsch D C, Bell R R. Determination of the threshold failure levels of semiconductor diodes and transistors due to pulsed power voltages[C]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1968, NS-15, (6): 244

RELATIONSHIPS OF DIODE FAILURE AND BURNOUT ENERGY THRESHOLDS WITH RF PARAMETERS

YU Wen, CAIXin-hua

Institute of Electronics, Changde Normal College, Hunan 415000

HUANG Wen-hua, LI Guo-zhi

Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69, Xi'an 710024

ABSTRACT: By means of the program mPND ID (one-dimensional modeling for PN junction devices), the diode failure and burnout energy absorbed have been calculated for different EMP pulsed voltage sources, and the results are analyzed preliminarily.

KEY WORDS: EMP; semiconductor devices; failure and burnout; FDTD