

的激光极化<sup>129</sup>Xe.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Albert M S, Cates G D, Driehuys B *et al.* Nature, 1994, 370:199—201
- [ 2 ] Bifone A, Song Y Q, Seydoux R *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci., USA, 1996, 93:12932—12936
- [ 3 ] Zhao L, Venkatesh A, Balamore D *et al.* Proc. ISMRM 6, Sydney, Australia, 1998, 3:1908
- [ 4 ] 曾锡之, 孙献平. 物理, 1996, 25:414—419
- [ 5 ] Sakai K, Bilek A M, Oteiza E *et al.* J. Magn. Reson., 1996, B111:300—304
- [ 6 ] Wagshul M E, Button T M, Li H F *et al.* Magn. Reson. Med., 1996, 36:183—191
- [ 7 ] Mugler J P, Driehuys B, Brookeman J R *et al.* Magn. Reson. Med., 1997, 37:809—815
- [ 8 ] Driehuys B, Cates G D, Miron E *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69:1668—1670
- [ 9 ] Albert M S, Balamore D, Sakai K *et al.* Proc. SMR, 4th Annual Meeting, New York, USA, 1996, 3:1357
- [ 10 ] Schoenborn B P. Federation Proc., 1968, 27:888—894
- [ 11 ] Baldwin J, Chothia C. J. Mol. Biol., 1979, 129:175—220
- [ 12 ] Tilton Jr R F, Kuntz Jr I D. Biochemistry, 1982, 21:6850—6857
- [ 13 ] Pauling L, Coryell C D. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1996, 22:210—218
- [ 14 ] Swanson S D, Rosen M S, Agranoff B W *et al.* Magn. Reson. Med., 1997, 38:695—698
- [ 15 ] Rosen M S, Chupp T E, Coulter K P *et al.* ICAP 16, Windsor, Canada., August 1998, 514
- [ 16 ] Brookman J R, Mugler J P, Driehuys B *et al.* Proc. RSNA 82, 1996, 643
- [ 17 ] Peled S, Jolesz F A, Tseng C H *et al.* Magn. Reson. Med., 1996, 36:340—344
- [ 18 ] Gao J H, Lemerr L, Xiong J H *et al.* Magn. Reson. Med., 1997, 37:153—158
- [ 19 ] Albert M S, Balamore D. Nucl. Inst. Method. Phys. Research, 1998, 402:441—453
- [ 20 ] Zhao L, Mulkern R, Tseng C H *et al.* J. Magn. Reson., 1996, 113:179—183

## 半导体器件烧毁的物理机理\*

余 稳 蔡新华

(湖南常德师范专科学校电磁理论研究所 湖南常德 415000)

黄文华 刘国治

(西北核技术研究所 西安 710024)

**摘 要** 叙述了半导体器件烧毁的物理机理、目前的研究进展及作者正在开展的工作。

**关键词** 半导体器件, 烧毁, 高功率微波

## MECHANISM OF BURNOUT OF SEMICONDUCTOR DEVICES

Yu Wen Cai Xinhua

(Institute of EM Theory, Changde Teachers' College, Hunan 415000)

Huang Wenhua Liu Guozhi

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

**Abstract** The general mechanism of burnout of semiconductor devices is described, as well as recent progress and our present research.

**Key words** semiconductor devices, burnout, high power microwave (HPM)

\* 1998 - 11 - 10 收到初稿, 1999 - 03 - 08 修回

## 1 前言

大功率微波 (HPM) 对电子系统进行破坏, 可使系统暂时失灵或永久失效, 这直接涉及系统内部电子元器件的暂时失灵或永久失效. 因此要研究 HPM 对电子系统的破坏机理, 首先要研究半导体器件烧毁的物理机理. 另外, 从系统的抗辐射能力和加固方面看, 也需要对电子系统进行在电过应力 (EOS) 环境下的易损性评估. 以下几个问题使得评估很困难: (1) 对任意一个电子器件, 很难得到精确的理论或实验失效阈值; (2) 实际的 EOS 应力参数必须与用于理论或实验上确定失效阈值时使用的理想参数相比较, 过度保守的估计将导致系统的超加固, 增加不必要的成本, 拖延进度, 降低系统性能, 而过高的估计则可使系统易损; (3) 器件的复杂性问题 [不同的制造过程、不同种类的器件 (甚至同种器件间) 有变化]; (4) 产生 EOS 的电磁环境问题 [如电磁脉冲 (EMP)、核电磁脉冲 (NEMP)、光电磁脉冲 (LEMP)、电磁干扰 (EMI)、静电放电 (ESD)、系统电磁脉冲 (SGEMP)、微波 (MW) 等等]; (5) 同一批器件, 数据变化也很大, 不同一批器件和不同厂家的产品, 数据变化就更大. 因此, 从理论上探讨器件烧毁的物理机理, 找出大致规律, 很有意义.

## 2 器件烧毁的物理机理

半导体器件承受 EOS 测试时, 将表现出很多失效物理机理<sup>[1]</sup>, 几乎器件的每一部分都有可能失效: (1) 敷金属和引线能被熔化, 电迁移能使金属膜导体变薄, 甚至导致开路; (2) 在器件的绝缘材料或氧化区或器件表面, 可产生导致局部高温的电击穿; (3) 在有源结区, 可产生导致强流和高温的二次击穿.

根据研究, 对双极型器件, 90% 的失效是由结区击穿引起的, 敷金属失效仅占 10%, 但对 MOS 器件, 则 63% 的失效来源于敷金属失效,

27% 则属于氧化物击穿.

通常在局部温度升高到熔点时发生敷金属和引线失效, 该热量来自于金属中的强流密度或金属附近的热硅 (由其他地方的强流密度引起). 敷金属失效将因线路分开 (有点像保险丝烧毁) 而导致开路. 引起失效的强流可能来自于击穿或器件其他地方的失效, 所以敷金属和引线失效可能只是一种结果而不是器件失效的原因. 电迁移应用于强流密度情形下金属中的质量运输. 最近, 人们认为, 对金属膜导体截面不够的半导体器件, 电迁移可能是一种消耗失效模式, 该失效将导致电路开路. 当半导体或绝缘体两条蚀刻导电通道之间的电场超过中间介质击穿极限时, 将因产生电弧形成熔融金属通道而使电路短路, 器件线度越小, 该失效机制越重要.

PN 结的表面条件将影响其电特性. 依赖于表面条件的表面复合过程, 对自由载流子来说像一个阱. 强场表面击穿是表面损伤的原因之一. 对半导体器件, 该强场发生于靠近结区与表面的交界处. 器件绝缘区失效主要是高压击穿 (由材料中的强瞬间电场或硅材料附近热点的热损伤或机械损伤所致). 半导体器件有源结区的失效通常来自于局部熔化及随后的硅再结晶, 或来自于从结表面来的实际热注入, 该热量由通过结的强流密度引起, 反过来又导致热或电流二次击穿.

二次击穿模式有热模式和电流模式两种<sup>[2-4]</sup>. 随入射 EOS 功率不同而采取不同的模式, 并可根据其不同的发展速度区别不同的模式. 电流模式通常是 ns 量级, 而热模式则为  $\mu\text{s}$  量级. 二次击穿可因其负阻区而与其他 (如雪崩) 击穿相区别, 人们对二次击穿进行过不少研究<sup>[3-5]</sup>, 综合这些研究, 可得到二次击穿的物理机理如下: 通常认为热模式击穿占主导地位, 雪崩击穿产生的强流将器件加热到 600—800 K 时, 带电载流子的热产生变得很重要, 器件进入热 - 电流失控状态, 此时随着温度的升高, 载流子越来越多, 器件电阻率下降, 这样将

允许通过更大的电流,从而进一步提高器件温度.如果该失控得不到很快阻止,(通常停止对器件的功率输入),最终的高温将损伤或毁坏该器件.强场也能够通过欧姆加热而使敷金属带熔化.电流二次击穿模式则发生于较高的外加电压情形,并且其电流比热模式的要高得多.一般情况下,由于载流子浓度比掺杂浓度低得多,掺杂浓度控制着耗尽区的电场.当有高的外加电压时,由于雪崩撞电离而产生大量载流子,并注入到耗尽区.当载流子浓度超过掺杂浓度时,则是载流子浓度而不是掺杂浓度控制着耗尽区的电场.高载流子浓度将增加耗尽区的电场,这将导致在耗尽区的边缘产生雪崩,而产生所谓的“双重注入”.如果载流子注入的速度比传导过程移走它们的速度快,则从耗尽区中心到边缘的电场将得到进一步加强.最后,热-电流失控将使电流密度得到极大增加,在器件中产生大量热量.加热将抑制雪崩产生,并有可能关闭电流二次击穿模式,但是在足够高的功率水平下,将由于失控的增强高于热抑制而使二次击穿得以维持,最终将达到令器件烧毁的程度.和热模式一样,此时的强流亦可毁坏其他地方的敷金属带.

电流和热丝的形成,被认为是与二次击穿相关联并同时发生的另一种现象.当强流不再均匀流过结区而集中于一个小区域时,将形成丝.该电流的集中以及它所引起的加热将进一步增强上面描述的过程,并在器件中产生热斑.已有实验工作者观察到了这种热斑.当热斑温度达到 1000 K 时,由于熔化和杂质迁移,器件性能将极大地降低,当温度达到 1688 K 时,硅将熔化,导致结区短路.

### 3 失效分析模型

正常半导体的行为可用电子、空穴连续性方程和泊松方程描述,对高压瞬态情形,还必须考虑热流方程及方程系数(如迁移率、热导率等)对温度和电场的依赖关系,致使对器件的行为要用一组耦合、非线性、刚性偏微分方程来描

述.由于耦合和非线性,即使仅考虑一维情形,方程组也没有解析解,刚性方程组的数值解也太费时,因此人们便设法使其简化,以便能用解析或数值的方法解方程组.这里仅讨论二次击穿的分析模型.

通常有三种模型:解析模型、经验模型和数值计算模型.另外可以进一步分为热模型、电模型和热电模型,这主要根据模型所处理的方程来决定.热模型仅考虑热流方程而忽略其他,电模型则仅考虑电方程而忽略热方程,热电模型则考虑所有方程.

#### 3.1 解析二次击穿模型

由于方程组的复杂性,不经充分简化是无法得到解析解的.绝大多数模型都基于一维热流方程的解而忽略了所有其他方程(仅考虑了由于器件电流引起的热产生率因子).通常认为热产生于无限薄的结区,并流到一维无限介质,并假定热产生激发为单一电能方波脉冲,一般称这类模型为 Wunsch - Bell 模型.电模型则忽略热流方程,因此该模型仅能在低功率水平(或高功率水平的早期)给出合理的结果,对烧毁机理研究无应用价值,但对正常行为有效.

#### 3.2 经验二次击穿模型

主要由解析模型的作者进行,根据解析解形式,构造函数以拟合实验数据,因此本质上也属于热模式范畴.

#### 3.3 数值二次击穿模型

采用数值技术简化并求解方程组.它试图完整地模拟由于加有 EOS 而引起的依赖于时间的行为,而像是像解析模型和经验模型那样仅预测最终结果.因此数值二次击穿模型能预见半导体器件在 EOS 环境下所发生的具体行为,这种预见可产生器件和线路设计规则,并有可能使系统在 EOS 环境下的生存能力得到提高,有利于抗辐射加固.数值二次击穿模型一般又分为热模型、电模型和热电模型.

关于热模型, Kusnezov<sup>[6]</sup>等,利用显式有限差分法解一维和二维传导方程,忽略其他电效应,对电效应的处理完全依赖于稳态电阻率温度曲线.这种模型对热效应和热斑形成能产生

物理

令人感兴趣的结果,但却不能产生可靠的瞬态电效应效果,同时也无法模拟任何电流二次击穿效应。

电模型是对电效应方程进行详细计算,但完全忽略热效应。因此无法处理 EOS 环境下的强电场效应(包括依赖于场的迁移率、速度饱和及雪崩产生等)。

热电模型是同时考虑电方程和热流方程,有不少人开展了这方面的工作<sup>[5,7]</sup>。

#### 4 研究进展及将开展的工作

从 70 年代后期开始,有一些学者致力于半导体器件烧毁物理的数值模拟,到 80 年代后期基本进入高潮阶段。其中 Orvis 及 Word 等人的工作尤其具有代表性。Orvis 等人建立了半导体器件的一维和二维数值模型,并编制了相应的程序,同时用程序对失效机制作了分析研究,但未见任何与实验相结合的应用。而 Word 等人,则仅进行了一维模拟,但他们用程序进行了一系列的具体应用,对硅 PIN 二极管微波限幅器进行了全面系统的理论和实验研究<sup>[8]</sup>,包括直流正偏开关特性、正偏电导率、尖峰漏能、分离及损伤阈值等方面。从文献看,他们认为其程序也急待修改,但未见修改后的报道。

在提高计算精度方面,有一些学者考虑了诸如带宽变窄、杂质消电离、热电子及其他许多物理现象<sup>[9]</sup>;在提高计算速度方面,Osman 等人提出的“混合解法”<sup>[10]</sup>有其独特的功效。

从文献查阅情况看,除 Word 等人外,其他人都很少涉及实验,仅停留在理论阶段。而

Word 等人虽然和实验有比较,但计算程序较简单,且只有一维模拟,因此和实验符合不理想,目前他们正致力于完善该程序。另外,值得注意的是,以上理论研究所用的源均是阶跃电磁脉冲,没有涉及微波领域。

我们将在上述这些工作的基础上,建立半导体器件模拟的一维和二维模型及相应程序,并和实验工作配合进行,重点将放在微波对半导体器件的破坏机理研究上。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Orvis W J, Khanaka G H, Yee J H. A Review of the Physics and Response Models for Burnout of semiconductor Devices, 1984, UCRL - 53573
- [ 2 ] Yee J W, Orvis W J, Martin L C. Theoretical Modeling of EMP Effects in Semiconductor Junction Devices, 1982, AFWL - TR - 82 - 91
- [ 3 ] Orvis W J, Moconaghy C F, Yee J H *et al.* Modeling and Testing for second Breakdown Phenomena, 1983, UCRL - 89147
- [ 4 ] Koyanagi K, Hane K, Suzuki T. IEEE Trans. Elect. Dev., 1977, ED - 24(6) : 672 - 681
- [ 5 ] Word A L. Calculations of Second Breakdown in Silicon Diodes, 1982, HDL - TR - 1978
- [ 6 ] Kusuevov N. Electrical Overstress/ Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1980, EOS - 1 : 133 - 139
- [ 7 ] Orvis W J, Yee J H. Semiconductor Device Modeling with Burn42, 1985, UCID - 20602
- [ 8 ] Word A L, Tan R J, Kaul R. Spike Leakage and burnout of Silicon PIN diode Microwave Limiters, Harry Diamond Laboratories, 1991, HDL - TR - 2195
- [ 9 ] Barnes J J. IEEE Trans. Elect. Dev., 1976, ED - 23 : 1042
- [ 10 ] Osman. Solid state Electronics, 1984, 27(4) : 319 - 324