

# 高功率微波作用下半导体器件失效和防护分析

蔡志猛

厦门华夏学院

DOI: 10.12238/ems.v6i3.7089

**[摘要]** 高功率微波技术作为一种新型电磁武器系统,其应用领域涵盖军事、民用和科研等多个领域。在高功率微波系统中,半导体器件是至关重要的组成部分,但其在高功率微波作用下易受到电击穿、热失效等多种影响,导致性能下降甚至失效。因此,了解半导体器件在高功率微波作用下的失效机制并研究有效的防护技术显得至关重要。本文旨在探讨高功率微波作用下半导体器件的失效机制及防护技术,以为高功率微波系统的可靠运行提供理论支持和技术指导。

**[关键词]** 高功率微波作用; 半导体器件失效; 防护分析

**Analysis of semiconductor device failure and protection under high-power microwave irradiation**

Cai Zhimeng

Xiamen Huaxia University

**[Abstract]** High power microwave technology, as a new type of electromagnetic weapon system, has applications in multiple fields including military, civilian, and scientific research. In high-power microwave systems, semiconductor devices are a crucial component, but they are susceptible to various effects such as electrical breakdown and thermal failure under high-power microwave action, leading to performance degradation or even failure. Therefore, it is crucial to understand the failure mechanism of semiconductor devices under high-power microwave irradiation and study effective protection technologies. This article aims to explore the failure mechanism and protection technology of semiconductor devices under high-power microwave action, in order to provide theoretical support and technical guidance for the reliable operation of high-power microwave systems.

**[Key words]** High power microwave effect; Semiconductor device failure; Protection analysis

## 引言

高功率微波技术作为一种新型电磁武器系统,其在军事、民用和科研领域具有广泛的应用前景。高功率微波系统通过发射高能量的微波脉冲,可以实现对电子设备、通信系统甚至基础设施的干扰和破坏。在高功率微波系统中,半导体器件扮演着至关重要的角色,例如功率放大器、开关器件等,它们的稳定性和可靠性直接影响着整个系统的性能和运行。然而,高功率微波的强电磁辐射会对半导体器件产生不可忽视的影响,可能导致器件的电击穿、热失效以及辐射损伤等问题,进而降低系统的可靠性和使用寿命。因此,深入研究

半导体器件在高功率微波作用下的失效机制,并探索有效的防护技术对于确保高功率微波系统的稳定运行至关重要。

## 1 高功率微波的基本原理

### 1.1 高功率微波的基本概念:

高功率微波是指频率通常在 1GHz 至 300GHz 之间且功率水平超过数千瓦的电磁波。高功率微波的产生涉及通过诸如磁控管、速调管或固态放大器之类的专用设备将电能转换为电磁辐射。这些装置使用电子束或半导体结产生相干微波辐射。高功率微波的行为由麦克斯韦方程控制,该方程描述电磁波在真空或各种介质中的传播。在自由空间中,高功率微

波以光速传播,表现出偏振、波长、频率等特性。这些波可以被不同的材料聚焦、反射或吸收,这取决于它们的性质和相互作用的几何形状。高功率微波与物质的相互作用是通过吸收、反射、透射等机制产生的。当高功率微波与材料相互作用时,在材料内引起电流或热,从加热到电子设备的破坏产生各种影响。理解这些基本概念在降低在各种应用中利用高功率微波的潜在风险的同时是重要的。

### 1.2 生成和放大机制

高功率微波的产生主要取决于能够将电能转换成高功率微波辐射的装置。这样的装置是利用电子束和磁场的相互作用产生微波辐射的磁控管。由于其简单性和高功率,磁控管通常用于雷达系统和工业加热应用。高功率微波产生的另一个重要机制是通过利用谐振器中电子束的速度调制原理的速调管。通过向空腔施加交流电压,电子经过速度变化,放大微波信号。速调管高效、可调谐,适用于需要精确控制微波功率的应用。近年来,固体放大器成为高功率微波发电的替代品,利用氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)等半导体技术实现高功率微波放大。固态放大器具有紧凑、可靠、快速调制能力等优点,基于高功率微波的系统在定向能源武器、电子战等领域提供了新的机会。

### 1.3 不同媒体传播特性

高功率微波的传播受其传播介质特性的影响。在自由空间中,高功率微波以最小衰减直线传播,适用于远程通信和遥感应用。但实际上,高功率微波会产生各种障碍,如大气吸收、散射和表面反射。高功率微波与材料的相互作用取决于材料的介电性能、导电性和磁化率。金属等导电性高的材料有反射高功率微波的倾向,电介质材料根据其成分和频率表现出吸收和传输特性。了解高功率微波与不同介质之间的相互作用对于优化系统的性能并减轻不希望的影响,例如信号退化和意外暴露是重要的。除了均匀介质外,高功率微波还可以与天线、波导、介质透镜等复杂结构相互作用。这些结构可以通过聚焦、转向或阻抗匹配等机制来操纵高功率微波的传播,从而在雷达系统、无线通信、微波成像中实现各种应用。这种结构的设计和优化需要彻底了解电磁波传播原理与工程材料之间的相互作用。

## 2 半导体器件在高功率微波作用下的失效机制分析

### 2.1 热失效机制

接收到高功率微波辐射的半导体装置受到被吸收的电磁能量的热应力。高功率微波暴露引起装置故障的主要机制是热失控,局部加热超过装置的散热能力,导致温度升高和随

后的电性能恶化。在上升的温度下,半导体材料的电导率、载流子迁移率、复合率发生变化,导致漏电流的增加和击穿电压的降低。此外,器件结构中不同材料之间的热膨胀失配引起机械应力,导致分层、键合线分离或介电击穿。另外,随着时间的推移,由高功率微波脉冲产生的热循环促进材料疲劳,降低器件可靠性。了解暴露于高功率微波的半导体器件中的热动力学对于预测故障模式并实施有效的热管理策略以提高器件的鲁棒性和寿命是重要的。

### 2.2 电击穿现象

高功率微波辐射可以通过雪崩击穿、齐纳击穿、俘获电荷效应等机制在半导体器件中引起电击穿。当高能载流子通过冲击电离获得足够的动能并产生次级载流子时,发生雪崩击穿,导致电流快速增加和器件故障。另一方面,齐纳击穿发生在半导体的再掺杂区域,其中电场超过材料的临界击穿强度,导致电子隧道和传导。当存在高功率微波辐射时,局部加热可以增强载流子的产生,特别是在电场梯度高的区域加速击穿过程。捕获电荷效应如空间电荷积累和界面俘获也可引起高功率微波暴露下的电击穿。器件结构中的累积电荷可以改变电场分布,特别是在高频或高功率操作条件下提高击穿的容易性。

### 2.3 辐射损伤机制

暴露于高功率微波辐射的半导体器件容易受到包括电离效应和非电离效应的辐射的损伤。电离辐射如 $\gamma$ 射线或高能粒子在半导体晶格中产生电子-空穴对和位移损伤,导致电特性的变化和器件的劣化。非电离辐射如微波光子可通过光子吸收、声子激发、缺陷产生等过程与半导体材料相互作用。这些相互作用可导致局部加热、产生声子辅助载流子和形成缺陷,并最终影响器件的性能和可靠性。此外,由高功率微波引起的辐射损伤可以表示为长时间暴露的累积效应,其导致诸如增益、频率响应、噪声特性等设备参数的逐渐劣化。为了减轻辐射造成的损伤,需要全面了解半导体器件设计和制造中潜在的物理过程和辐射固化技术的实施。

### 2.4 脉冲特性的影响

包括脉冲持续时间、重复频率和峰值功率的高功率微波脉冲的特性对半导体器件中观察到的故障机制有着显著的影响。短持续时间的高能脉冲会引起快速的温升和热循环效应,热失控和电击穿等机制会导致设备瞬间发生故障。另一方面,长持续时间脉冲可以实现脉冲间隔间的热耗散和松弛,降低毁灭性故障的可能性,但在延长的暴露时间内仍存在累积损伤的风险。重复脉冲会对器件材料产生疲劳效应,加剧

与热应力和电应力相关的故障机制。峰值功率水平确定半导体器件经历的电磁场强度, 从而影响击穿和辐射损伤的可能性。较高峰值功率可能带来更严重的热效应和电效应, 因此, 在高功率微波系统设计和装置可靠性评估中应仔细考虑脉冲参数。

### 3 高功率微波作用下的半导体器件防护技术分析

#### 3.1 电磁屏蔽技术

电磁屏蔽技术在实际的发展中是一种常用的半导体器件防护方法, 其主要的目的在于进一步限制高功率微波辐射对器件的影响。这种技术通过在器件周围引入电磁屏蔽材料, 如金属盒、金属膜或导电涂层, 由此为基础, 能够有效的吸收或反射高功率微波辐射, 并且进一步的减少其进入器件内部的能量。在电磁屏蔽设计中, 关键要素包括材料选择、屏蔽结构设计和封装工艺。金属材料在实际的应用过程当中通常被优先考虑, 因其良好的电导率和反射特性, 能够更为充分的阻挡高功率微波辐射。屏蔽结构的几何形状和布局对屏蔽效果具有重要影响, 需要在实际的技术应用过程当中根据器件布局和高功率微波辐射方向进行优化设计。此外, 封装工艺要求密封性和耐高温性, 以此为基础确保屏蔽结构稳固可靠。尽管电磁屏蔽技术能够有效降低高功率微波辐射对半导体器件的影响, 但其防护效果受到频率、功率和材料特性等因素的影响。因此, 技术应用过程当中需要综合考虑不同因素并采取合适的屏蔽措施是确保器件可靠性的关键。

#### 3.2 集成防护电路设计

集成防护电路在实际的使用过程当中是一种针对半导体器件设计的专用保护装置, 旨在提高器件对高功率微波辐射的抵抗能力。相应的技术在应用中通过在器件内部集成特定的保护电路, 如过压保护电路、过流保护电路和温度保护电路, 能够更加有效的监测和限制器件的工作状态, 以此为基础防止其受到高功率微波辐射引起的损害。集成防护电路的设计考虑了器件的工作特性、高功率微波辐射的特点以及保护电路的响应速度和可靠性。常见的保护电路包括二极管、MOSFET 和 TVS (Transient Voltage Suppression) 等器件, 相应的技术在应用过程当中能够快速响应电压过载或过电流情况, 同时也能够进一步的将多余的能量导向地线或吸收电阻器, 以此为基础保护器件不受损坏。尽管集成防护电路可以提高器件对高功率微波辐射的抵抗能力, 但其设计和实现需要考虑到器件本身的特性和工作环境的变化。因此, 针对不同类型的半导体器件, 需要在实际的设计过程当中更加有

效地设计出定制化的防护电路, 以此为基础确保其在高功率微波环境下的稳定工作。

#### 3.3 材料优化和封装技术

材料优化和封装技术是另一种常用的半导体器件防护方法, 旨在改善器件的热稳定性和电性能, 以此为基础提高其对高功率微波辐射的耐受能力。这种技术通过选择高性能材料、优化器件结构和改进封装工艺, 通过相应的方式能够进一步的降低高功率微波辐射对器件的影响。在材料选择方面, 具有良好热导率和低介电损耗的材料被认为是有效的防护材料, 如氮化硅、氮化镓和碳化硅等。而相应的材料能够有效地散热并减少高功率微波辐射的吸收, 以此为基础保护器件免受过热和击穿等损害。封装技术方面, 采用高温耐受性和密封性良好的封装材料, 如环氧树脂或陶瓷, 能够更为充分的提高器件的环境适应能力和耐久性。此外, 采用特殊的封装结构和散热设计, 在一定程度之上能够有效地降低器件内部温度, 同时也能够进一步的增强其对高功率微波辐射的抵抗能力。

#### 结语

在高功率微波环境下, 半导体器件的稳定性和可靠性对于系统的正常运行至关重要。本文对半导体器件在高功率微波作用下的失效机制进行了深入分析, 并探讨了多种防护技术。电磁屏蔽技术通过限制高功率微波辐射对器件的影响, 集成防护电路设计通过内部保护电路监测和限制器件工作状态, 材料优化和封装技术通过选择优质材料和改进封装工艺来提高器件的抗辐射能力。这些技术的应用为提高半导体器件的稳定性和可靠性提供了重要的途径。

#### [参考文献]

- [1] 陈自东, 秦风, 赵景涛, 等. 高功率微波作用下限幅器尖峰泄漏特性[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32 (10): 100-106. DOI: 10.11884/HPLPB202032.200097.
- [2] 李志刚, 程立, 袁忠才, 等. 高功率微波作用下等离子体中的雪崩效应研究[J]. 物理学报, 2017, 66 (19): 208-216. DOI: 10.7498/aps.66.195202.
- [3] 林江川, 陈自东, 陈小群, 等. 高功率微波作用下光电转换器的抗干扰特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30 (1): 27-32. DOI: 10.11884/HPLPB201830.170158.

作者简介: 蔡志猛 (1982—), 男, 汉, 福建省厦门市, 硕士研究生, 副教授, 研究方向半导体光电器件。