

高功率微波频率对 PIN 限幅器的影响分析



张 兵¹, 方子璇¹, 彭 帅^{1*}, 陆凤波², 高文泽³, 赵银峰³, 王树龙³

(1. 中国船舶集团有限公司系统工程研究院, 北京 100094; 2. 海军研究院, 北京 100161; 3. 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

摘要 通过 TCAD 器件建模, 建立了 PIN 二极管的电热耦合模型, 搭建 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路以进行高功率微波效应仿真。仿真得到了不同频率下 PIN 限幅器瞬态电压响应以及 PIN 二极管内部电场、载流子、结温分布。仿真结果表明, 在 HPM 耦合电压作用下, PIN 限幅器平顶泄漏负向电压随频率增大而降低, PIN 限幅器平顶泄漏正向电压随频率增大而降低。PIN 二极管内部 PIN 限幅器的限幅能力随微波频率增加先增强后减弱。HPM 频率较低时 PIN 二极管内部晶格温度积累集中于 I 层界面处, 随着频率升高, 晶格温度积累集中于 I 层中间位置, 因此频率变化会造成 PIN 限幅器的 HPM 损伤敏感位置变化。

关键词 高功率微波; PIN 限幅器; 电热耦合模型; 平顶泄漏电压

中图分类号 TN385

文献标志码 A

DOI 10.12178/1001-0548.2022358

Effect Analysis of High Power Microwave Frequency on PIN Limiter

ZHANG Bing¹, FANG Zixuan¹, PENG Shuai^{1*}, LU Fengbo², GAO Wenzhe³, ZHAO Yinfeng³, and WANG Shulong³

(1. CSSC Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China; 2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China;

3. The School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract In this paper, a PIN diode model is established through Technology Computer Aided Design (TCAD) device modeling, and a High-Power Microwave (HPM) coupling simulation circuit is built on a PIN limiter to simulate effects of HPM. The transient voltage response of the PIN limiter under different HPM frequencies are obtained by simulation, as well as the internal electric field, carrier and junction temperature distribution of the PIN diode. The simulation results show that the flat-top leakage negative voltage of PIN limiter decreases with the increase of HPM frequency, and the flat-top leakage forward voltage of PIN limiter decreases with the increase of HPM frequency. The limiting capability of the PIN limiter inside the PIN diode first increases and then decreases with the increase of the microwave frequency. When the HPM frequency is low, the internal lattice temperature accumulation of the PIN diode is concentrated at the interface of layer I. Therefore, the HPM damage sensitive position of the PIN limiter varies with frequency.

Key words HPM; PIN limiter; electrothermal coupling model; flat-top leakage voltage

高功率微波 (High-Power Microwave, HPM) 是一种功率可达吉瓦量级, 频率范围覆盖 L、S、C、X 频带。可以通过多种途径耦合进入雷达接收机, 对功率敏感器件如低噪声放大器、混频器等造成损伤。前门耦合路径中, HPM 的功率直接通过暴露在空气中不设屏蔽的天线耦合进入接收机。相比通过屏蔽外壳缝隙等后门耦合途径, 前门耦合到的功率为总耦合功率的主要部分^[1]。

PIN 限幅器是一种具有微波限幅能力的微波控制元件, 广泛用于接收机前端, 为接收机前端提供防护。PIN 二极管是其中的关键器件, 对 PIN 二极

管在 HPM 影响下产生的高功率微波效应的研究对限幅器电路器件选型、HPM 防护技术十分关键。

文献 [2] 利用自行开发的一维器件模拟程序仿真分析了不同 HPM 条件下器件发生损伤的能量、HPM 频率、脉冲宽度、器件载流子寿命的关系。文献 [3] 基于 PIN 二极管的电热耦合模型建立多级 PIN 限幅器高功率微波仿真电路, 分析了 HPM 功率、脉宽等 HPM 波形参数对多级 PIN 限幅器内 PIN 二极管的影响。文献 [4] 利用器件数值模拟工具分析了 PIN 二极管在不同功率、频率、脉宽 HPM 条件下的瞬态响应, 得到了 PIN 二极管损伤

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2023-10-15

基金项目: 部级基金

作者简介: 张兵, 研究员, 主要从事舰载武器方面的研究。

*通信作者 E-mail: 282574490@qq.com

阈值与脉冲宽度的关系。文献 [5] 基于 PIN 二极管的电热耦合模型进行 PIN 限幅器电路仿真, 总结了 PIN 限幅器在 HPM 耦合电压作用下毁伤脉宽阈值与耦合功率间的 Wunsch-Bell 经验公式。文献 [6] 基于器件物理模拟分析法研究了 PIN 二极管厚度对限幅器微波脉冲热效应的影响。文献 [7] 基于一种混合方法来研究 HPM 照射下 PIN 限幅器电路的瞬态响应, 分析了 HPM 电场强度与 PIN 限幅器输出电压的关系。文献 [8] 基于 PIN 限幅器等效电路研究了 PIN 限幅器在 HPM 与正常工作信号同时注入条件下的单级、双极限幅器的瞬态响应, 获取了限幅器毁伤功率阈值与 HPM 脉宽间的关系以及 PIN 限幅器从限幅状态到低插入损耗状态的恢复时间。文献 [9] 基于 PIN 二极管的电热耦合模型分析了 HPM 功率、频率等参数对 PIN 限幅器毁伤脉宽阈值的影响, 还总结了 PIN 限幅器电路的无源器件参数对限幅能力的影响。文献 [10] 基于搭建的 HPM 注入实验平台和电路仿真, 研究了 HPM 作用下 PIN 限幅器的尖峰泄漏电压和平顶泄漏电压与 HPM 参数的关系。文献 [11-12] 通过搭建损伤积累效应测量电路研究了 HPM 造成的 PIN 二极管损伤机制, 并通过仿真分析了更符合实际实验情况的器件毁伤标准。

当前研究中针对 HPM 频率与 PIN 限幅器 HPM 效应关系的解释尚不充分。本文基于 TCAD 搭建了 PIN 器件模型, 并建立了 HPM 效应仿真电路。以 HPM 频率为自变量设计了仿真实验, 分析微波频率对 PIN 限幅器高功率微波效应的影响。

1 器件建模

本文基于 Sentarurs TCAD 建立 PIN 二极管的器件结构掺杂分布模型, 器件参数参考 Skyworks CLA 系列限幅器产品手册。器件结构及其掺杂分布如图 1 所示。其 P 层厚度为 $2\ \mu\text{m}$, I 层厚度为 $7\ \mu\text{m}$, N 层厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 。本文根据实际生产工艺经验, 根据手册提供的结构参数尝试了几组实验参数, 选定 I 层掺杂浓度为 $2 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 。

为分析 PIN 限幅器的 HPM 效应, 需要考虑 HPM 耦合条件下器件内部高电场、热积累对载流子输运、迁移率、晶格温度传导等物理模型的影响, 搭建符合 HPM 耦合环境的电热耦合数值模型。考虑到晶格热积累和温度梯度导致的电热功率选取热力学输运模型。该模型耦合求解了晶格温度方程和载流子输运方程, 模型的电子空穴输运方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\phi_n + P_n\nabla T) \\ \mathbf{J}_p = -pq\mu_p(\nabla\phi_p + P_p\nabla T) \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{J}_n 和 \mathbf{J}_p 分别为电子电流密度和空穴电流密度; n 和 p 分别为电子和空穴的浓度; q 为电子电量; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; ϕ_n 和 ϕ_p 分别为电子和空穴的准静电势; P_n 和 P_p 分别代表空穴和电子的绝对热电功率。

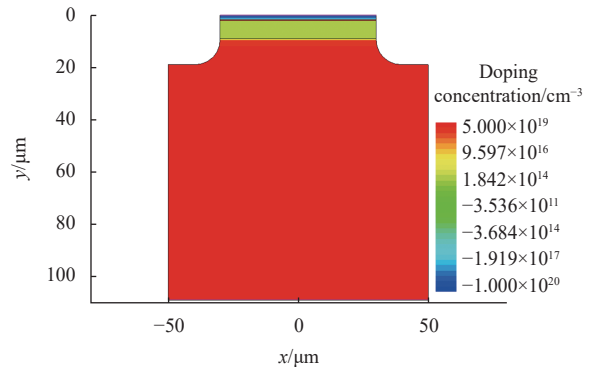


图 1 PIN 二极管器件结构与掺杂分布图

高电场需要引入高场速度饱和模型, 模型修正后的迁移率公式为:

$$\mu(E) = \frac{\mu_{low}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{low}E}{v_{sat}}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (2)$$

式中, μ_{low} 代表修正前的迁移率; v_{sat} 代表载流子的饱和漂移速度; β 是常数, 与工艺相关, 由模型给定。

高场下需要考虑 PIN 二极管的雪崩击穿, 引入雪崩离子化模型, 其雪崩产生模型为:

$$G = a_n n v_n + a_p p v_p \quad (3)$$

式中, n 和 p 分别是电子与空穴的浓度; v_n 和 v_p 分别是电子与空穴的饱和速度; a_n 与 a_p 分别是电子与空穴的碰撞电离系数。

2 仿真实验

2.1 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路

基于 Sentarurs TCAD 的混合模式, 模拟 HPM 通过前门耦合到 PIN 限幅器电路, 进行 PIN 限幅器 HPM 效应的瞬态仿真。利用 PIN 二极管数值模型和基本电路单元搭建 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路, 如图 2 所示。利用正弦脉冲电压源产生不同频率、功率的前门耦合 HPM 电压, 内阻 $50\ \Omega$ 。隔直电容大小为 $100\ \text{pF}$, 射频扼流电感为 $100\ \text{nH}$, 选择 $100\ \text{nH}$ 的扼流电感在保证将电流低频分量滤去的同时, 正常工作状态下, 将高频的有效信号载

波尽量完整传递给负载, 有利于本文对于毁伤机制的研究。PIN 二极管与 50 Ω 的负载并联。

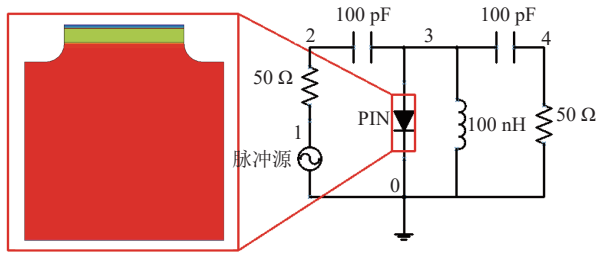


图2 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路

2.2 模型验证

基于 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路, 设定正弦脉冲电压源产生频率为 2.6 GHz, 上升时间为 1 ns, 耦合功率分别为 0~40 dBm, 间隔 5 dBm 取值的电压信号。进行瞬态仿真实验, 获取 PIN 限幅器输出电功率, 获得了所建立模型的输入功率-插入损耗曲线, 将曲线与 Skyworks CLA 系列限幅器产品手册上的曲线进行对比, 如图 3 所示。可以看出, 模型与实际产品测量的输入功率-插入损耗曲线基本吻合, 绝对误差不超过 3 dB。可以验证器件建模可以仿真实际 PIN 限幅器在 HPM 耦合条件下的限幅特性。

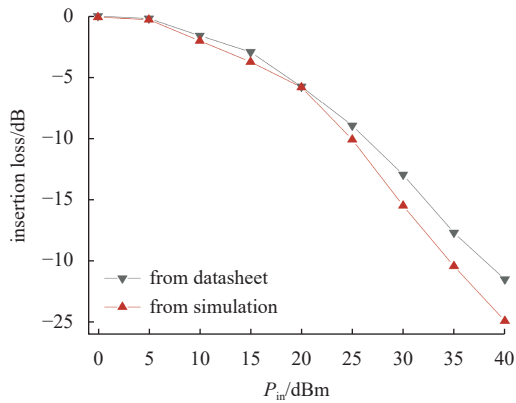


图3 PIN 限幅器输入功率-插入损耗曲线仿真对比

2.3 不同频率 HPM 对 PIN 限幅器的影响仿真

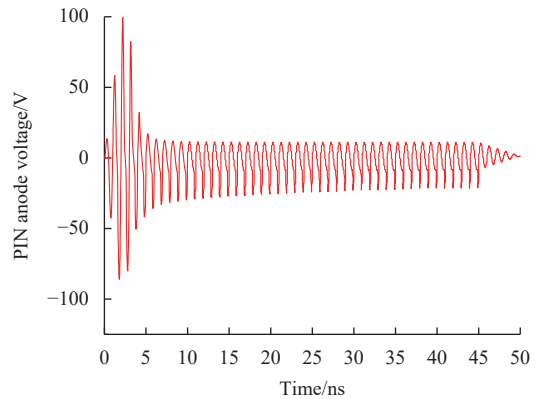
基于 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路, 进行了不同频率 HPM 耦合条件下的瞬态电热仿真。HPM 参数主要为功率、上升时间、脉宽、频率。以控制变量法设置 HPM 参数, 其中耦合到限幅电路的功率设置为 65 dBm, 上升时间设置为 5 ns, 下降时间设置为 5 ns, 脉宽设置为 50 ns。频率设置为 1~11 GHz, 间隔 1 GHz 取值。

3 结果与分析

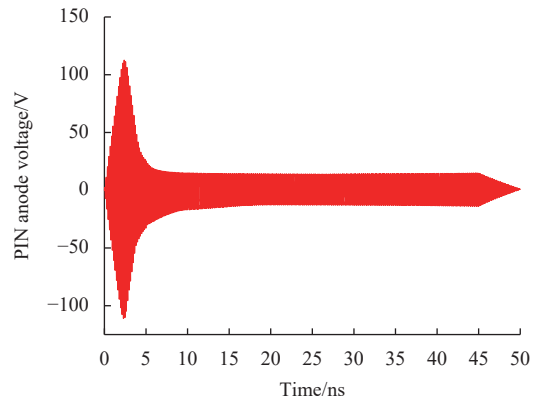
通过对 HPM 耦合仿真电路进行瞬态仿真, 求

解其电压输出响应。HPM 频率为 1、6、11 GHz 条件下的 PIN 二极管限幅器输出电压曲线如图 4 所示。图 4a 是 HPM 频率为 1 GHz 时的 PIN 限幅输出电压, 尖峰泄漏电压为 83.6 V, 平顶泄漏电压正负峰值分别为 10.6 V、-24.0 V, 二极管在正负电压峰值响应出现的不对称性, 是由于 PIN 二极管 $I-V$ 关系的非线性引起的, 器件在正电压激励时表现出更低的阻值, 而在负电压激励时表现出更低的阻值。图 4b 是 HPM 频率为 6 GHz 时的 PIN 限幅输出电压, 尖峰泄漏电压为 94.8 V, 平顶泄漏电压正负峰值分别为 13.6 V、-12.2 V。图 4c 是 HPM 频率为 11 GHz 时的 PIN 限幅输出电压, 尖峰泄漏电压为 94.8 V, 平顶泄漏电压正负峰值分别为 15.6 V、-14.5 V。不同 HPM 频率下 PIN 限幅器均在 10 ns 左右达到稳定限幅。

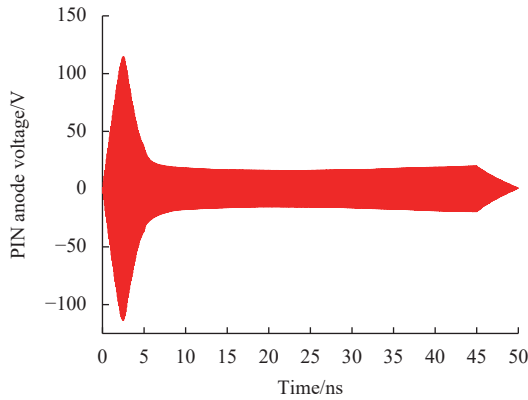
图 5 为 HPM 频率在 1~11 GHz 时输出电压的包络曲线。从中可以看到不同频率下, 尖峰泄漏大小相近, 而平顶泄漏阶段的输出电压幅值存在差距, 随着 HPM 脉宽增加。正向导通期间, 输出电压幅值随着频率增加而增加, 反向导通期间, 输出电压幅值随着频率增加而减小。



a. HPM 频率为 1 GHz



b. HPM 频率为 6 GHz



c. HPM 频率为 11 GHz

图 4 PIN 限幅电路输出电压曲线

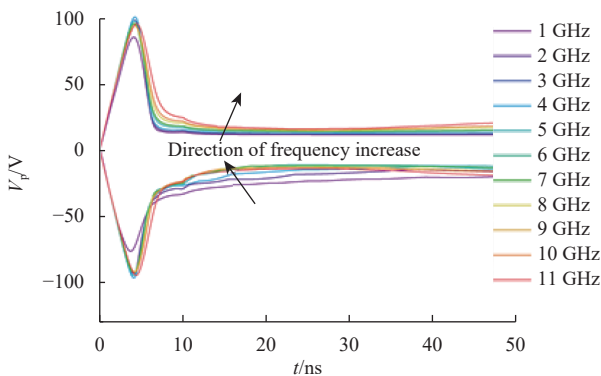


图 5 PIN 限幅电路输出电压包络曲线

在高频大功率信号输入时, PIN 二极管的 I 层载流子浓度会随着电压偏置的变化而涨落。由于 I 层掺杂浓度低, 载流子具有较高寿命, 载流子的渡越时间小于高频大功率信号的周期, 从而使 I 层载流子浓度增加。经过一定周期后, I 层载流子浓度将维持在一个较高水平, 从而使 PIN 二极管可以等效为一个交流小电阻。根据 Leenvo 模型^[13], 此时的 PIN 二极管等效电阻值可以表示为:

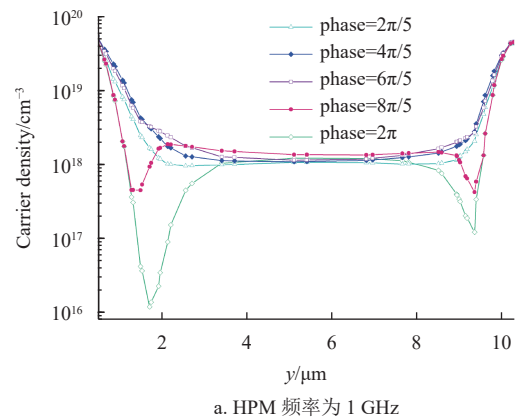
$$R_s = \frac{qW}{kT I_f \sqrt{\frac{D}{\omega}}} \quad (4)$$

式中, q 为元电荷量; ω 为微波角频率; W 为 I 层宽度; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; I_f 为微波电流; D 为载流子扩散常数。

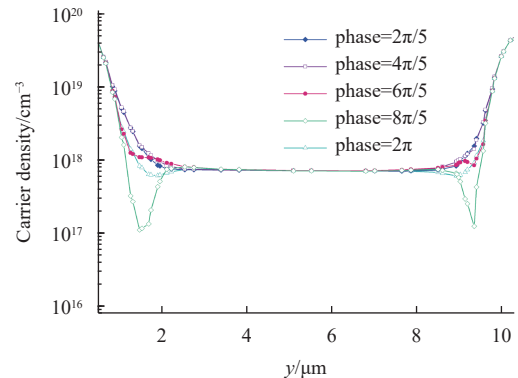
通过 PIN 二极管并联接入接收机前端以在高频大功率信号输入时形成阻抗失配, 将大功率反射出接收机前端, 避免烧毁敏感元件。Leenvo 模型可以解释随着 HPM 频率增加而增加的平顶泄漏电压: 随着频率增加, PIN 二极管在稳定限幅后的等效电阻增加了, 导致阻抗失配程度变小, 则耦合到的 HPM 电压会更多地施加在接收机上。

为验证上述解释, 并进一步分析反向导通期间输出电压幅值与频率的关系, 仿真提取一个周期内 PIN 二极管内部载流子分布变化。选取 HPM 频率为 1、6、11 GHz 时 HPM 上升时间后的第一个周期, 提取其内部载流子沿 y 轴分布的涨落, 如图 6 所示。从图中可以看出, 频率为 1、6、11 GHz 时, 脉冲正半周期时 PIN 二极管 I 层载流子浓度分别为 1×10^{18} 、 8×10^{17} 、 $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 与通过 Leenvo 模型分析的结果一致。而在脉冲负半周期, 存在明显的反向恢复过程, 载流子被抽取, 这一现象随着频率减小而显著, I 层载流子浓度最低点在 1、6、11 GHz HPM 脉冲下分别为 1.1×10^{16} 、 1.1×10^{17} 、 $1.9 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。

图 7 为 PIN 二极管 I 层载流子最小值在一个周期内的变化。从图中可以看出, 频率小于 4 GHz 时, 在输入电压负半周期存在明显的反向恢复过程, I 层载流子最小值变化大于 1 个数量级。载流子被抽取, 导致 I 层电阻增大, 从而增加 PIN 限幅器所承受的 HPM 电压。当频率大于 4 GHz, I 层载流子最小值变化小于 1 个数量级, 且随频率变化不明显。这也解释了 PIN 限幅电路输出电压的负包络曲线随频率变化的趋势。



a. HPM 频率为 1 GHz



b. HPM 频率为 6 GHz

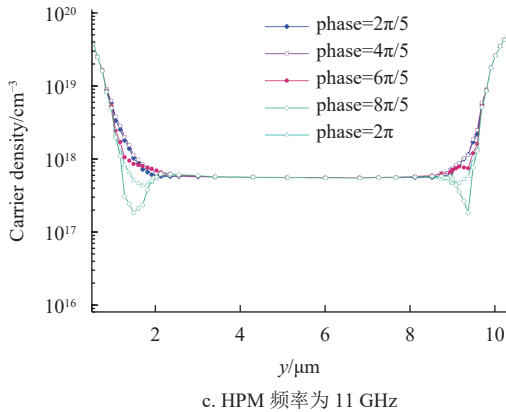


图 6 PIN 二极管内部载流子沿 y 轴分布脉冲周期内涨落

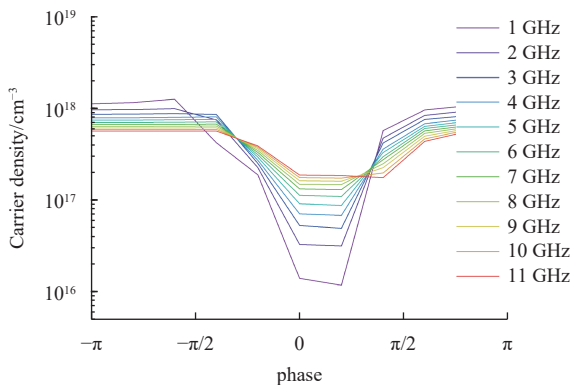


图 7 PIN 二极管 I 层载流子最小值随脉冲相位变化

图 8 为 PIN 二极管在不同频率 HPM 耦合条件下的最大结温瞬态变化曲线。可以观察到, 当频率小于 4 GHz 时, 温升曲线随 HPM 周期波动较大。HPM 正半周期晶格温度基本不变甚至降低, HPM 的负半周期晶格温度存在较陡峭的温升。陡峭温升所处的相位与反向恢复过程末尾载流子被抽取的相位相吻合。随着频率增加, 温升曲线逐渐变平缓, 不再出现陡峭温升阶段, 而是在 HPM 的正负峰值处温升, 且温升速度随频率增加。

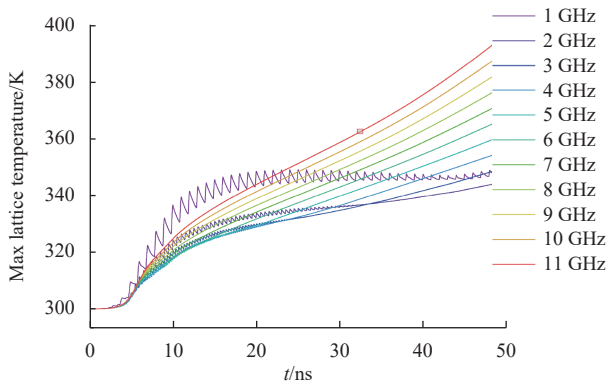


图 8 PIN 二极管最大结温瞬态变化曲线

基于以上仿真实验与分析, PIN 限幅器在 HPM 耦合电压影响下的晶格温度上升速度随频率

先减小后增加, 温升速度的最小值对应频率值主要取决于 PIN 二极管的反向恢复时间。当 HPM 脉冲周期大于反向恢复时间, 晶格温度上升主要发生在载流子被抽取的 HPM 负半周期。当 HPM 脉冲周期小于反向恢复时间, 晶格温度上升发生在 HPM 脉冲峰值附近。

PIN 限幅器的 HPM 效应主要由器件内部耗散功率导致晶格温度上升, 最终烧毁器件。耗散功率可以表示为电场强度与电流密度的点积。图 9 为 HPM 频率为 1、11 GHz 时 PIN 二极管内部电场强度沿 y 轴分布在一个脉冲周期内的变化。对比发现, 频率较低时, 脉冲负半周期电场峰值更高, 而频率提高时, 电场峰值不明显, 但脉冲正半周期具有更高的电场强度。

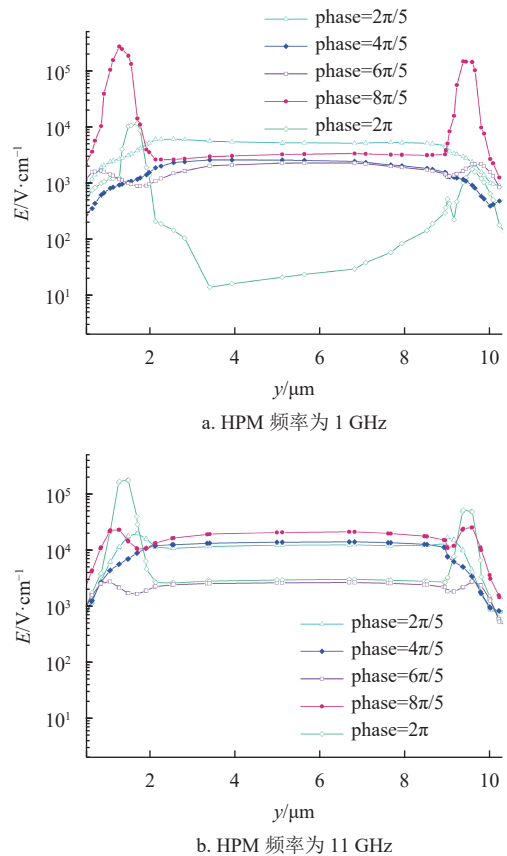


图 9 PIN 二极管内部电场强度沿 y 轴分布脉冲周期内涨落

由不同的 HPM 频率导致的载流子分布、电场强度分布变化, 造成了 PIN 二极管敏感位置的不同。图 10 为 HPM 频率在 1、11 GHz 条件下 HPM 脉冲上升时间结束后的结温分布图。当 HPM 脉冲周期大于反向恢复时间, PIN 二极管的 I 层上下界面温度升高更快, 如图 10a, PIN 二极管 I 层界面处温度将首先超过晶体熔融温度, 使器体烧毁。当 HPM 脉冲周期小于反向恢复时间, PIN 二极管

在 I 层中间温度升高更快, 如图 10b, PIN 二极管 I 层中间位置温度将首先超过晶体熔融温度, 使器件烧毁。

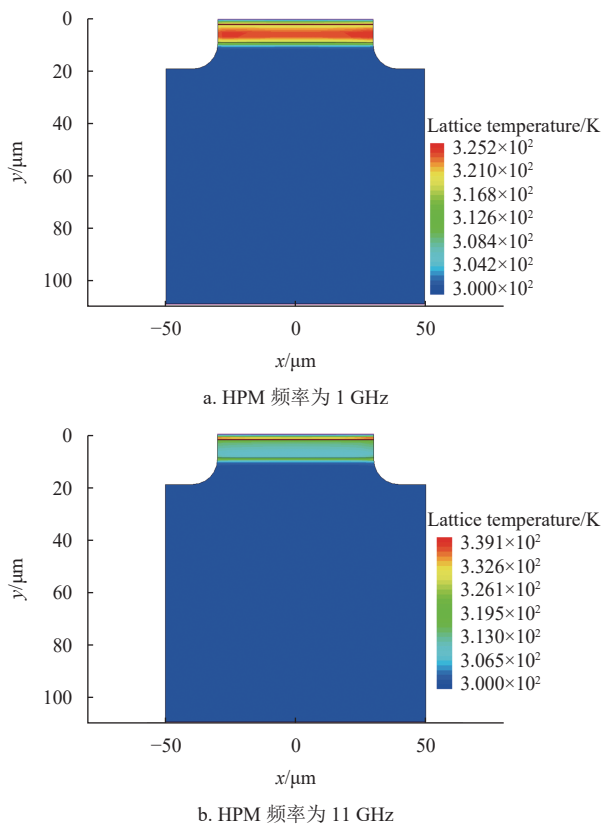


图 10 PIN 二极管内部晶格温度分布

4 结束语

本文基于 TCAD 器件建模, 搭建了 PIN 限幅器 HPM 耦合仿真电路。将仿真得到的 PIN 限幅特性与参考器件的数据手册进行对比, 验证了模型的可信度。仿真分析了微波频率对 PIN 限幅器高功率微波效应的影响。通过对仿真获得的 PIN 限幅器输出电压、载流子分布、结温变化、电场分布进行分析, 得出以下结论。

PIN 限幅器的限幅能力与频率相关。当 HPM 脉冲周期大于反向恢复时间, 平顶泄漏电压的负包络随频率降低显著增加, 当 HPM 脉冲周期小于反向恢复时间, 平顶泄漏电压正包络随频率增加而负包络基本不变。

PIN 限幅器的晶格温升速度和敏感位置与频率有关。当 HPM 脉冲周期大于反向恢复时间, 晶格温升主要在脉冲负半周期, 温升速度随频率降低而加快; 随着 HPM 脉宽增加, 其 I 层上下界面首先烧毁。当 HPM 脉冲周期小于反向恢复时间, 晶格温升主要在脉冲正负峰值附近, 温升速度随频率提

高而加快; 随着 HPM 脉宽增加, 其 I 层中间位置首先烧毁。

参考文献

- [1] RAO G V, ROY A, PAITHANKAR A S, et al. Electromagnetic interference by high power microwaves [C]//Proceedings of the Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. New York: IEEE, 2002: 20-22.
- [2] 余稳, 聂建军, 郭杰荣, 等. PIN 二极管的高功率微波响应 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 299-301.
- [3] YU W, NIE J J, GUO J R, et al. Response of the PIN diode to the high power microwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(2): 299-301.
- [4] HU K, LI T M, WANG H Y, et al. High power microwave effect of multi-stage PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(6): 63015.
- [5] 高川. PIN 二极管的高功率微波损伤机理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [6] GAO C. Research on the damage mechanism of PIN diode induced by high power microwave[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [7] WANG H Y, ZOU H, ZHOU Y H, et al. Electro-thermal coupled modeling of PIN diode limiter used in high-power microwave effects simulation[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015, 29(5): 615-625.
- [8] 张永战, 孟凡宝, 赵刚. I 层厚度对限幅器热损伤效应的影响[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(9): 74-78.
- [9] ZHANG Y Z, MENG F B, ZHAO G. Influence of I layer thickness on thermal damage process of PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(9): 74-78.
- [10] XIE H Y, LI Y, XUAN C, et al. Study of HPM nonlinear effect on circuit system consisting of pin limiter by using hybrid method[C]//Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. New York: IEEE, 2017: 1-3.
- [11] 袁月乾, 陈自东, 马弘舸, 等. PIN 限幅器的高功率微波单脉冲效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(6): 57-62.
- [12] YUAN Y Q, CHEN Z D, MA H G, et al. High power microwave effect of PIN limiter induced by single pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(6): 57-62.
- [13] 李赞. 具有 PIN 限幅器的低噪声放大器的 HPM 扰乱效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [14] LI Y. Interference effect of HPM on a low noise amplifier with a PIN limiter[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [15] 陈自东, 秦凤, 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): 105-111.
- [16] CHEN Z D, QIN F, ZHAO J T, et al. Spike leakage characteristic of limiter irradiated by high power microwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(10): 105-111.
- [17] ZHAO J T, CHEN Q Y, ZHAO G, et al. Damage accumulation mechanism in PIN diode limiters induced via multiple microwave pulses[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1709.
- [18] ZHAO J T, CHEN Q Y, CHEN Z D, et al. Impact of the structure on the thermal burnout effect induced by microwave pulses of PIN limiter diodes[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 3230.
- [19] LEENOV D. The silicon PIN diode as a microwave radar protector at megawatt levels[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1964, 11(2): 53-61.