

射频前端组件强电磁辐射场效应预测方法*

魏子鹏, 范丽思[†], 周行, 赵强

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 通过对限幅器、低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)等射频前端组件及模块的物理和数值建模, 分析高功率微波和电磁脉冲场对典型器件作用的物理过程与干扰、损伤机理, 实现电磁辐射效应场线-器件协同仿真, 为射频前端电路端口等敏感部位强电磁辐射效应预测提供技术支撑. 论文利用理论分析、ADS仿真分析、注入实验以及失效分析方法开展了微波脉冲对双极型晶体管和低噪声放大器的效应研究. 通过实验详细分析后可以确定低噪声放大器输出波形随注入功率增加的变化特性与仿真结果相符, 获得了不同脉冲参数(包括脉宽、频率和脉冲个数)以及器件不同工作状态对LNA损伤功率的影响规律. 最后, 对比分析了半导体器件损伤前后的电特性.

关键词: 强电磁脉冲; 射频前端; 仿真; 注入实验; 效应分析

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2019.09.01.0001

中图分类号: TN386.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)01-0112-05

引文格式: 魏子鹏, 范丽思, 周行, 等. 射频前端组件强电磁辐射场效应预测方法[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(1): 112-116.

英文引文格式: WEI Z P, FAN L S, ZHOU H, et al. Prediction method of strong electromagnetic radiation field effect for RF front-end components[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(1): 112-116.

Prediction Method of Strong Electromagnetic Radiation Field Effect for RF Front-end Components

WEI Zipeng, FAN Lisi, ZHOU Hang, ZHAO Qiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: Through the physical and numerical modeling of RF front-end components and modules such as limiters and low noise amplifiers, the physical process and interference and damage mechanism of high power microwave and electromagnetic pulse fields on typical devices are analyzed, and the field-line-device co-simulation of electromagnetic radiation effects is realized, which provides technical support for the prediction of strong electromagnetic radiation effects in sensitive parts such as RF front-end circuit ports. The effects of microwave pulse on bipolar transistors and low noise amplifiers are studied by theoretical analysis, ADS simulation analysis, injection experiment and failure analysis. After detailed analysis of the experiment, it can be determined that the output waveform of LNA changes with the increase of injection power, which is consistent with the simulation results. The effects of different pulse parameters (including pulse width, frequency and number of pulses) and different working states of the device on the damage power of LNA are obtained. Finally, the electrical characteristics of semiconductor devices before and after damage are compared and analyzed.

Key words: strong electromagnetic pulse; RF front end; ADS simulation; injection experiment; effect analysis

0 引言

随着科学技术的发展, 空间中的电磁环境日益复杂, 除雷电、静电等自然危害源之外, 还有通信、雷达、电子战装备和定向能电磁脉冲武器、电磁脉冲炸弹等人为电磁危害源. 这些复杂多变的电磁环境, 尤其是静电放电和高功率微波等快上升沿脉冲电流形成的电磁脉冲场, 对射频前端组件的安全性构成了严重的威胁. 因此, 研究电磁环境效应及其防护对策, 已成为当今各工业发达国家研究的重要课题之一^[1]. 强电磁脉冲不会引起射

* 收稿日期: 2019-09-01

基金项目: 电磁环境效应国家级重点实验室基金项目(614220503030517).

作者简介: 魏子鹏(1995-), 男, 硕士生, 从事装备电磁环境效应仿真、高电压技术的研究, E-mail: 1291077527@qq.com.

[†] 通讯作者: 范丽思(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事牵引供电及其自动化、高电压试验技术和高铁电磁兼容方面的研究, E-mail: 184628396@qq.com.

射频前端立刻失效、瘫痪,但会影响射频前端的接收能力,减少射频前端的寿命,使可靠性下降.如文献[2]研究了微波脉冲对低噪声放大器的效应机理,得出了低频时低噪声放大器更容易损伤.文献[3]研究了几种典型半导体的EMP损伤效应与机理,得出了当注入信号功率超过一定值时,LNA的噪声系数明显增加,增益下降,当信号功率达到某一临界值时,LNA噪声系数、增益严重恶化,功能丧失.文献[4]研究了强电磁环境电子器件效应阈值,得出了电子系统的性能下降或损伤由其薄弱环节决定,得到的数据和规律为电子系统敏感度分析和电子设备抗强辐射加固提供参考数据,并可预估电子系统的效应阈值.

本文基于ADS射频前端仿真软件,在搭建低噪声放大器的物理模型基础上结合Silvaco-TCAD电路联合仿真,研究在强电磁辐射场作用下,电磁脉冲场对典型器件的物理过程与干扰、损伤机理^[5].

1 理论分析

射频前端目的是保证有用的射频信号能完整不失真地从空间拾取出来,并输送给后级的变频、中频放大等电路,在半导体仿真过程中,需要利用泊松方程、电流连续性方程、运输方程进行求解^[6].

1.1 泊松方程

$$\nabla(\varepsilon \cdot \nabla \varphi) = -q(p - n + N_D - N_A) \quad (1)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算符(哈密顿算符的平方), ε 为介电常数, $\nabla \varphi$ 为静电势, q 为单个电子的电荷量, p 和 n 分别表示空穴和电子密度, N_D 和 N_A 分别表示电离施主和电离受主密度,通过泊松方程可以求得器件内部的静电势分布^[7].

1.2 电流连续性方程

在有电荷流动的导体内任取一闭合曲面 S , dt 时间内通过 S 向外净流出的电荷量应等于同一段时间内 S 内电荷量的减少,这称为电流连续性方程^[8].

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = qR_{\text{net}} + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \vec{J}_p = qR_{\text{net}} + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

式(2),式(3)表示电子和空穴的连续性方程,用来描述电荷守恒, R_{net} 表示净的复合率, n 与 p 分别代表电子与空穴的浓度.

1.3 运输方程

低噪声放大器核心部件是BJT半导体^[9],强电磁脉冲与BJT热力的仿真模型主要用运输方程式(4)~(7)进行描述, μ_n 和 μ_p 分别表示电子和空穴迁移率, Φ_n 和 Φ_p 分别表示电子和空穴准费米势, P_n 和 P 表示绝对热电功率:

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\Phi_n + P_n\nabla T) \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = -nq\mu_p(\nabla\Phi_p + P_p\nabla T) \quad (5)$$

$$P_n = -k_n \frac{k}{q} \left[\left(\frac{5}{2} - s_n \right) + \ln \left(\frac{N_c}{n} \right) \right] \quad (6)$$

$$P_p = -k_p \frac{k}{q} \left[\left(\frac{5}{2} - s_p \right) + \ln \left(\frac{N_v}{p} \right) \right] \quad (7)$$

2 仿真模型

2.1 器件工艺仿真

本文选用射频前端核心组件低噪声放大器进行仿真,器件采用P型单晶硅衬底,通过离子注入进行n型掺杂,浓度为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$,结深为 $0.4 \mu\text{m}$.设置器件厚度为 $50 \mu\text{m}$,宽度为 $20 \mu\text{m}$,其掺杂分布如图1所示.

本文器件电路联合仿真采取上述的器件结构,仿真利用ADS软件模拟强电磁脉冲条件下对低噪声放大器电路所产生的效应,用TCAD进行器件的工艺仿真,器件宽度设置为 $5 \times 10^6 \mu\text{m}$,可以算出半导体内部的热量分布情况.以Avago公司的ATF54143为仿真对象,对此进行建模,模型参数如表1所示.

使用Avago公司的ATF54143晶体管,设计的低噪声放大器的电路图如图2所示. 频率范围为2.4 GHz左右,其性能指标为:噪声系数小于1 dB,增益大于13 dB,输入输出驻波比小于2,输入输出反射系数小于-12 dB.

表 1 模型的参数

Tab 1 Model parameters

参数名称	数值
栅极长度/ μm	1.0
栅极宽度/ μm	400
沟道厚度/ μm	0.03
沟道掺杂浓度/ m^{-3}	1×10^{23}
源极和漏极掺杂浓度/ m^{-3}	1×10^{24}

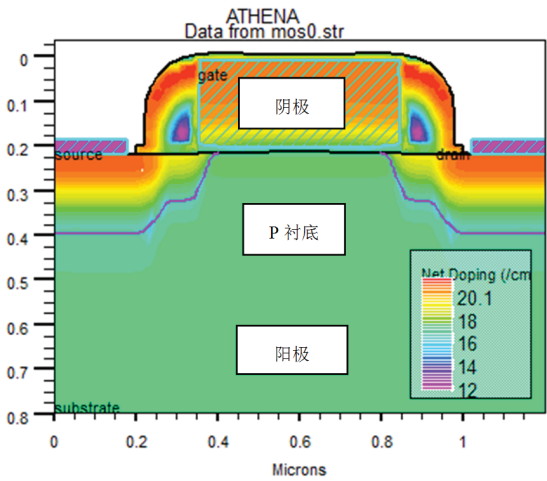


图 1 半导体掺杂分布图

Fig 1 Doping distribution map of semiconductor

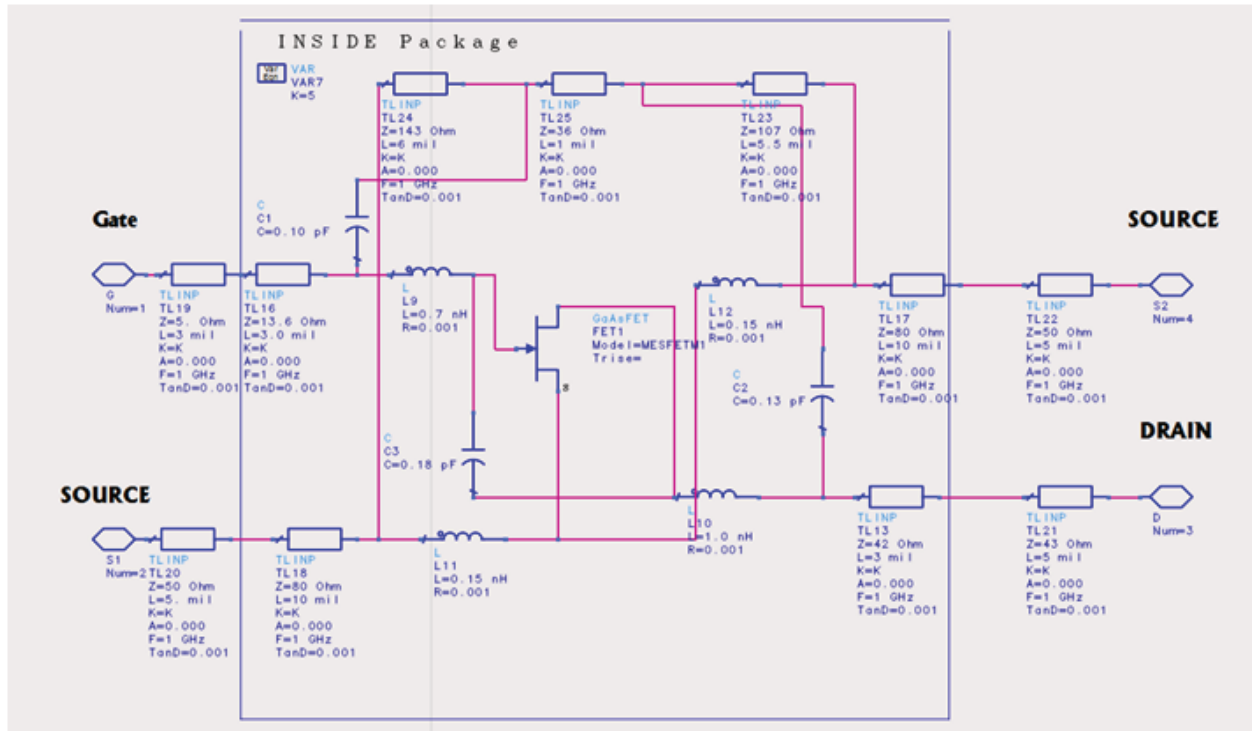


图 2 低噪声放大器电路图

Fig 2 Low noise amplifier circuit diagram

2.2 强电磁脉冲模型

本文采用的强电磁脉冲波形采用国标IEC61000-2-9方波脉冲波形^[10],方波波形有利于获得半导体器件的非线性效应,容易计算半导体器件的损伤机理,上升时间2.5 ns,峰值50 kv/m,半宽高取23 ns,电场强度可以用双指数函数进行表示:

$$E(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ E_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) & t \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_0 为峰值场强; α , β 分别为下降沿和上升沿的数学参数; k 为修正系数. 强电磁脉冲波形的参数: 上升时间 t_r 为2.5 ns, 下降沿 α 为 $4 \times 10^7 \text{S}^{-1}$, 上升沿 β 为 $6 \times 10^8 \text{S}^{-1}$, 修正系数 k 为1.3, 峰值时间 t_{max} 为4.83 ns.

强电磁脉冲波形是对电场强度的描述,入射到电路中需要转换成电压^[11].仿真中将强电磁脉冲等效为一个电压源,电场强度的1 V/m对应于这个电压源的1 V电压,因此,入射强电磁脉冲的电场强度和这个电压源的电压在数值上是相等的.强电磁脉冲波形如图3所示.

3 场效应管仿真

射频前端的主要器件是低噪声放大器,低噪声放大器受到强电磁波易被击穿,主要有两种情况容易击穿,一种是栅极击穿;另一种是栅源两极击穿;仿真时判断是否击穿的标准是两极能否达到熔点,然后分析场效应管与强电磁脉冲之间的关系^[12].

3.1 栅极的击穿

强电磁脉冲是一种场强急速上升的波,给场效应管注入强电磁脉冲时,当波场强达到一定程度时,栅极首先达到熔点,然后被击穿熔化.经测量此时的场强阈值,烧毁时间为6.63 ns,此时的场强阈值为4 989 V/m.

在仿真过程中,当低噪声放大器注入强电磁脉冲时,栅极、源极、基极电压立刻上升,之后保持稳定,持续的注入过程中,栅极的沟道内产生大量电子,使得电场越来越大^[13].因为电子中带有能量且大量分布在电极上,所以两极所带的能量越来越高,达到一定程度时可导致器件被击穿,栅极击穿时刻场效应管内部热量分布如图4所示.

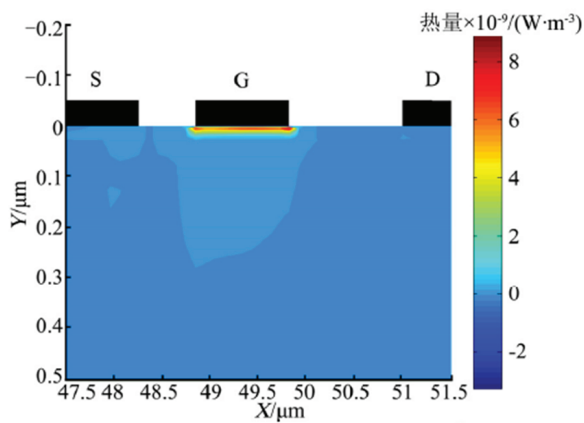


图4 栅极击穿时刻场效应管内部热量分布图

Fig 4 Heat distribution map in FET at gate breakdown time

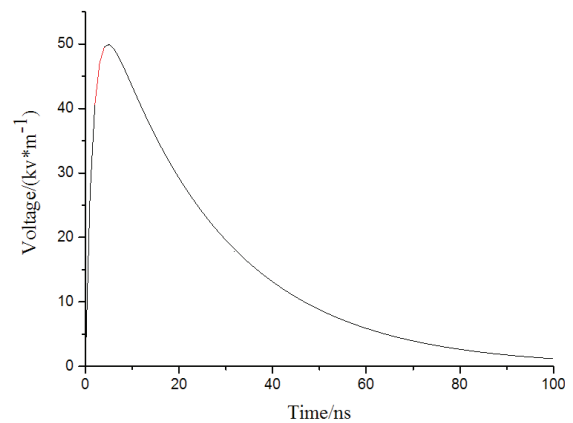


图3 强电磁脉冲波形图

Fig 3 Strong electromagnetic pulse waveform

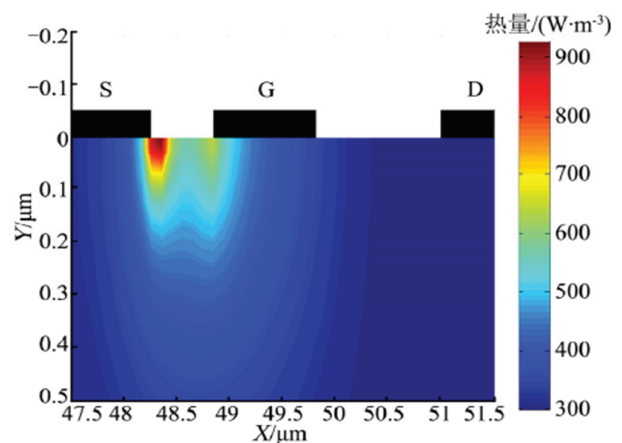


图5 源栅极击穿时刻场效应管内部热量分布图

Fig 5 Heat distribution map in FET at breakdown time of source gate

3.2 源栅极的击穿

强电磁脉冲给场效应管注入时,栅极被击穿后依然保持注入,当波场强小于栅极击穿时的场强阈值时,栅源极有可能达到熔点,然后被击穿熔化.经测量此时的烧毁时间为12.86 ns,场强阈值为1 550 v/m.在仿真过程中,栅极温度上升到一定的程度之后,开始有所减退,当注入脉冲时间在13秒左右,即场强从峰值开始降下来的时候,栅源极之间仍有大量剩余电子流向源极,使源极充满能量,靠近源极的地方产生大量的热量,使得温度迅速上升,最终场效应管击穿^[14].源栅极击穿时刻场效应管内部热量分布如图5所示.

4 结论

强电磁脉冲从栅极注入时,可以在栅极和源极之间产生脉冲,脉冲所带来的瞬时能量可使栅极和源极温度

升高,强电磁脉冲就会击穿导电通道,导致低噪声放大器的热损伤,同时两极还存在被击穿的可能。

参考文献:

- [1] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(1): 1-6.
LIU S H. Electromagnetic environmental effect of weapons and equipment and its development trend[J]. Journal of College of Equipment Command Technology, 2005, 16(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 张存波. 微波脉冲对低噪声放大器的效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
ZHANG C B. Effect of microwave pulse on low noise amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 任兴荣. 半导体器件的电磁损伤效应与机理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
REN X R. Research on electromagnetic damage effect and mechanism of semiconductor devices[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 许黎明, 闰二艳, 马弘舸. 强电磁环境下电子元器件效应实验研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 28-31.
XU L M, RUN E Y, MA H G. Experimental research on the effects of electronic components in strong electromagnetic environment[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 164-168. (in Chinese)
- [5] 吴文珏. 电磁脉冲对MOSFET的热效应分析与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
WU W J. Analysis and research on thermal effect of EMP on MOSFET[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 居培凯, 曹兵. 电磁脉冲对太阳电池的损伤效应研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 164-168.
JU P K, CAO B. Research on damage effect of electromagnetic pulse on solar cells[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 164-168. (in Chinese)
- [7] 袁乾臣, 杨欢, 杨秀山, 等. 强电磁脉冲对微波场效应管影响的仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017, 5: 89-92.
YUAN Q C, YANG H, YANG X A, et al. Simulation study on the effect of strong electromagnetic pulse on microwave field effect transistor[J]. Missile and Space Launch Technology, 2017, 5: 89-92. (in Chinese)
- [8] 徐兴福. ADS2011射频电路设计与仿真实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
XU X F. ADS2011 RF circuit design and simulation example[M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [9] QI Z M, ZHANG J, ZHONG H H. Influence of high-frequency characteristic of a cavity on the phase locking in the relativistic klystron amplifier[J]. IEEE Trans, Electron Devices, 2015, 62(4): 1306-1311.
- [10] 范菊平. 典型半导体器件的高功率微波效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
FAN J P. High power microwave effect of typical semiconductor devices[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] BENFORD J, SWEGLE J A, SCHAMILOGLU E. Highpower crowaves[M]. Norwood, Mass: Artech House, 1992.
- [12] MCDERMOTT D B, LIN A T, CHU K R. The ninth special issue on high-power microwave generation[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2002, 30(3): 731.
- [13] 张天成, 丁大志, 樊振宏, 等. 核爆电磁脉冲对射频前端作用机理分析[J]. 微波学报, 2018, 34: 443-445.
ZHANG T C, DING D Z, FAN Z H, et al. Analysis of the action mechanism of nuclear explosion electromagnetic pulse on radio frequency front end[J]. Journal of Microwave Science, 2018, 34: 443-445. (in Chinese)
- [14] 李亚南, 谭志良, 宋培姣, 等. 射频前端强电磁脉冲防护模块设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 1-6.
Li Y N, TAN Z L, SONG P H, et al. Design of strong electromagnetic pulse protection module for RF front end[J]. Strong Laser and Particle Beam, 2018, 30(1): 1-6. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科