

外界条件在电磁脉冲对 GaAs 赝高电子迁移率晶体管损伤过程中的影响

席晓文 柴常春 刘阳 杨银堂 樊庆扬

Influence of the external condition on the damage process of the GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor induced by the electromagnetic pulse

Xi Xiao-Wen Chai Chang-Chun Liu Yang Yang Yin-Tang Fan Qing-Yang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 078401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.078401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.078401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[GaN 高电子迁移率晶体管强电磁脉冲损伤效应与机理](#)

[Damage effects and mechanism of the GaN high electron mobility transistor caused by high electromagnetic pulse](#)

物理学报.2016, 65(3): 038402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038402>

[基于无源超高频射频识别标签的湿度传感器设计](#)

[Complementary metal-oxide-semiconductor humidity sensor design for passive ultra-high frequency radio-frequency identification application](#)

物理学报.2014, 63(18): 188402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.188402>

[基于离散粒子群算法的频率选择表面优化设计研究](#)

[Study on the optimal design of frequency selective surfaces based on the discrete particle swarm optimization](#)

物理学报.2014, 63(13): 138401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.138401>

[具有陡降特性的新型混合单元频率选择表面](#)

[A novel frequency selective surface of hybrid-element type with sharply decreased stop-band](#)

物理学报.2014, 63(7): 078402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.078402>

[近地面三阵子天线估计电磁波到达角和极化参数](#)

[Direction of arrival of EMW and polarization parameter estimation using tripole near the earth surface](#)

物理学报.2013, 62(19): 198402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.198402>

外界条件在电磁脉冲对GaAs 赝高电子迁移率晶体管损伤过程中的影响*

席晓文[†] 柴常春 刘阳 杨银堂 樊庆扬

(西安电子科技大学微电子学院, 教育部宽禁带半导体材料与器件国家重点实验室, 西安 710071)

(2016年11月16日收到; 2017年1月10日收到修改稿)

结合器件仿真软件Sentaurus TCAD, 建立了GaAs 赝高电子迁移率晶体管器件的电磁脉冲损伤模型. 基于此模型, 从信号参数和外接电阻两个方面出发讨论了外界条件对器件电磁脉冲损伤效应的影响. 结果表明, 信号参数的改变能够显著影响器件的损伤时间: 信号幅度通过改变器件的吸收能量速度来影响器件的损伤效应, 其与器件损伤时间成反比; 信号上升时间的改变能够提前或延迟器件的击穿点, 其与器件损伤时间成正比. 器件外接电阻能够减弱器件的电流沟道, 进而延缓器件的损伤进程, 且源极外接电阻的影响更加明显.

关键词: GaAs 赝高电子迁移率晶体管, 电磁脉冲, 外界条件, 损伤过程

PACS: 84.40.-x, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.66.078401

1 引言

低噪声放大器 (low noise amplifier, LNA) 通常位于电子系统的前端, 易受到外界电磁脉冲 (electromagnetic pulse, EMP) 的影响而失效甚至烧毁, 从而导致整个系统瘫痪^[1]. GaAs 赝高电子迁移率晶体管 (PHEMT) 作为 LNA 的主要器件, 研究其在外界 EMP 作用下的损伤效应和机理对于电子系统和电路的抗电磁脉冲损伤加固设计具有重要的意义. 目前, 对于半导体器件电磁脉冲损伤效应和机理的研究, 基本都是围绕电磁脉冲直接作用于器件的情况^[2-13], 而考虑外界条件的影响则少见报道^[14,15]. 然而, 实际中 EMP 往往不直接作用于器件, 而是先通过天线或孔缝等途径耦合进入系统, 然后再经过外电路注入到器件上. 因此, 最终施加到器件上的 EMP 信号由于耦合路径和外电路的消耗具有一定程度的变化. 同时, 器件在电子系统中也并非孤立存在, 其各电极都接有不同的功能电路. 为了真实反映 EMP 对器件的损伤效应和机

理, 研究外界条件在器件损伤过程中的影响则十分必要.

我们在文献^[16-18]中报道了孤立 GaAs PHEMT 器件在电磁脉冲作用下的损伤效应. 本文首先结合器件仿真软件 Sentaurus TCAD 建立了 GaAs PHEMT 器件在 EMP 作用下的损伤模型, 并通过实验结果对该模型进行了验证; 然后分别从信号参数和外接电阻两个方面出发讨论了外界条件在器件 EMP 损伤过程中的影响, 获得了外界条件对器件损伤效应的影响规律.

2 损伤模型

2.1 器件模型

图 1 为本文所采用的 GaAs PHEMT 器件模型, 基本结构为 AlGaAs/InGaAs 异质结, 其中 δ -掺杂为 InGaAs 沟道层提供二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG). 为了减小电离施主与沟道层中电子之间的库仑散射, 在 δ -掺杂层与 InGaAs 沟道层之间生长一层 AlGaAs 隔离层,

* 中国工程物理研究院复杂电磁环境科学与技术重点实验室开放基金 (批准号: 2015-0214.XY.K) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xixw841003@163.com

从而获得更高的电子迁移率和饱和速度. G, D, S 分别代表器件的栅极、漏极和源极. 器件栅长为 $0.25\ \mu\text{m}$, 肖特基势垒高度为 $0.9\ \text{eV}$. GaAs 衬底层下表面设定为 $300\ \text{K}$ 的理想热沉, 器件其他表面采用绝热边界条件 [19].

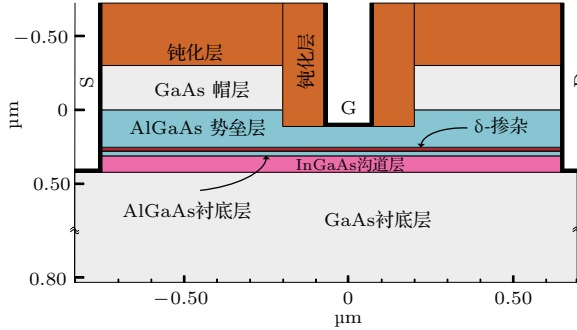


图1 GaAs PHEMT 器件结构
Fig. 1. Device structure of GaAs PHEMT.

2.2 仿真模型

研究半导体器件在 EMP 作用下的损伤过程, 需要考虑器件的电热效应. 本文利用器件仿真软件 Sentaurus TCAD 中的流体动力学模型模拟器件内部载流子的输运过程. 除了求解泊松方程和载流子连续方程外, 还要求解载流子温度和热流方程. 仿真电路示意图见图 2, 漏极和源极分别外接 $150\ \Omega$ 电阻, 从栅极对器件注入 EMP 信号, 并维持至器件烧毁(这里定义器件峰值温度达到 $1511\ \text{K}$ 作为器件烧毁的判据). 由于 EMP 信号波形的复杂性, 目前对于器件 EMP 损伤效应的研究多用阶跃脉冲来模拟 EMP 信号 [4,6,10], 这里我们仿真使用上升时间为 $0.1\ \text{ns}$, 幅度为 $7\ \text{V}$ 的阶跃脉冲信号.

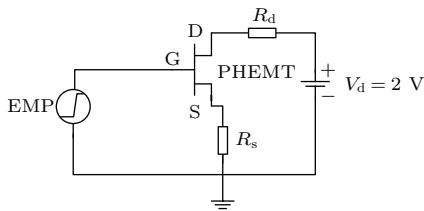


图2 仿真电路示意图
Fig. 2. Schematic diagram of simulation circuit.

2.3 仿真结果与分析

图 3 为器件峰值温度随着脉冲作用时间的变化关系, 可以看出, 随着脉冲作用时间的持续, 器件温度持续升高并在 $2.3\ \text{ns}$ 到达器件的烧毁点. 在脉冲信号作用下, 器件在栅极与沟道层之间形成电流沟道(图 4(a)). 由于 AlGaAs 势垒层为低掺杂区域,

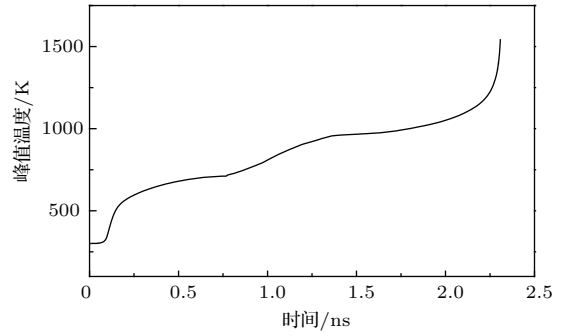


图3 器件峰值温度随着时间的变化
Fig. 3. Variation of the device peak temperature with time.

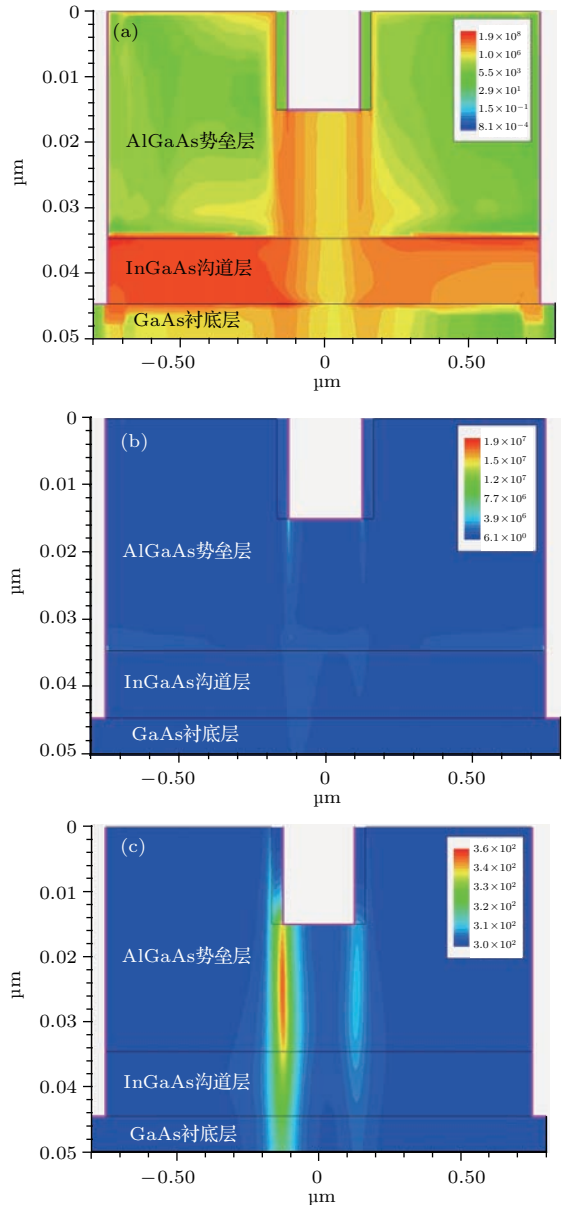


图4 (网刊彩色) $0.1\ \text{ns}$ 时刻器件内部参数分布情况 (a) 电流密度 (A/cm^2); (b) 电场强度 (V/cm); (c) 温度分布 (K)
Fig. 4. (color online) Distribution of the device internal parameters at $0.1\ \text{ns}$: (a) The current density (A/cm^2); (b) the electric field (V/cm); (c) the temperature (K).

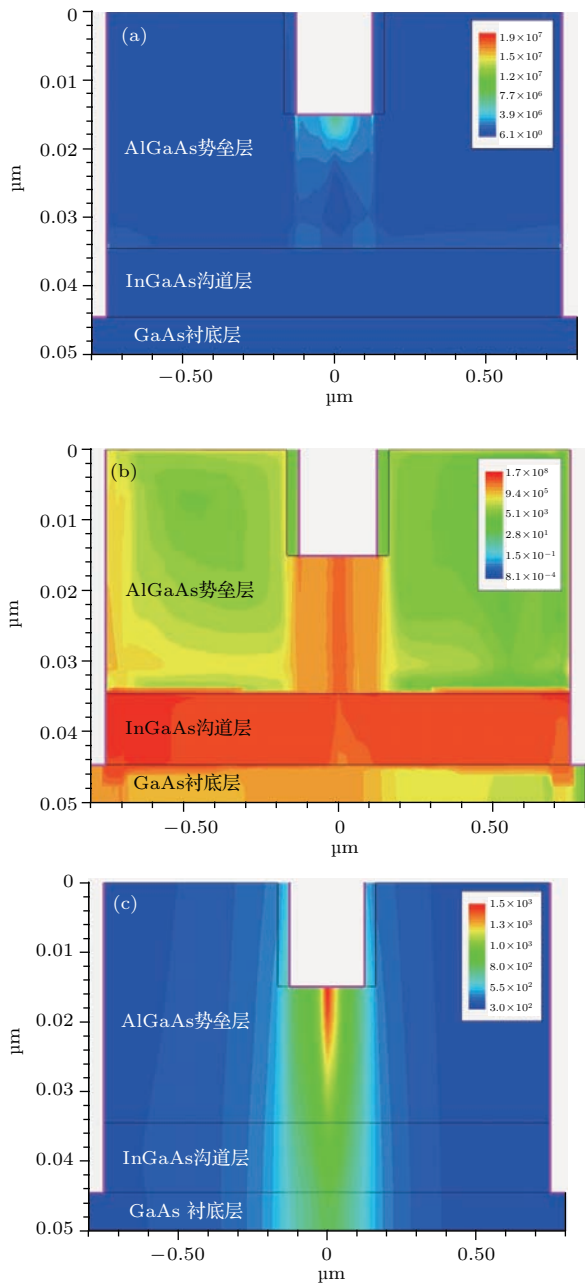


图5 (网刊彩色) 烧毁时刻器件内部参数分布情况 (a) 电场强度 (V/cm); (b) 电流密度 (A/cm²); (c) 温度分布 (K)
 Fig. 5. (color online) Distribution of the device internal parameters at burnout: (a) The electric field(V/cm); (b) the current density (A/cm²); (c) the temperature (K).

外加信号电压主要降落在势垒层上. 图4(b)为0.1 ns时刻器件的电场强度分布, 栅极下方两侧形成电场强度峰值, 且其最大值靠近源端. 基于功率密度 $Q = J \cdot E$, 温度主要由电流密度 J 和电场强度 E 的分布决定, 器件温度的最大值位于栅极下方靠近源端(图4(c)). 随着脉冲时间的持续, 当器件获得一定能量后热击穿发生, 载流子迅速增加. 栅极下方两侧的载流子在高电场下被及时输运走, 而栅极下方中间区域的空穴来不及被输运而开始积

累, 导致此处的空穴密度高于栅极下方其他地方的空穴密度, 电场强度峰值转移到此处(图5(a)). 相应的电流密度分布也开始向中间扩散, 并最终在栅极下方中间区域形成峰值电流沟道(图5(b)). 电场强度和电流密度的分布, 决定了器件的最终烧毁点位于栅极下方中间区域(图5(c)).

文献[20]对GaAs PHEMT器件进行了高功率微波(HPM)注入实验. 研究结果显示栅极下方是器件的易损部位, 图6是HPM注入下损伤GaAs PHEMT器件的电子显微镜扫描(scanning electron microscope, SEM)照片, 其损伤位置与本文的仿真结果基本符合. 值得注意的是, 虽然本文仿真使用的EMP信号与实验采用的HPM信号样式有所不同, 但两者对器件的损伤类型都属于能量型损伤. 在注入位置相同的条件下, 其损伤结果具有一定的相似性. 仿真结果和实验结果的一致性表明本文建立的损伤模型能够很好的模拟器件的EMP损伤效应.

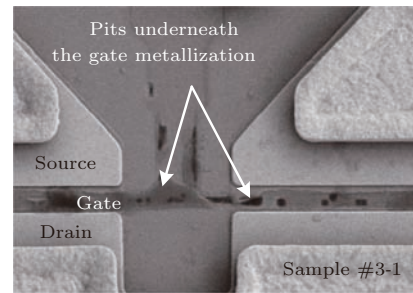


图6 损伤GaAs PHEMT器件的SEM照片[20]
 Fig. 6. SEM photo of damaged device[20].

3 外界条件对器件损伤效应的影响

为了分析方便, 本文利用器件损伤时间的快慢来表征外界条件对器件损伤效应的影响程度. 由于外界条件建模的复杂性, 这里用信号参数的变化来模拟注入信号在耦合路径和外电路上的消耗, 用漏极外接电阻和源极外接电阻来模拟器件外部的功能电路, 研究了两种典型外界条件对器件损伤效应的影响.

3.1 信号参数对器件损伤时间的影响

对于脉冲信号, 其信号参数主要有信号幅度和上升时间. 图7为相同上升时间不同信号幅度器件损伤时间的变化趋势, 可以看出, 器件的损伤时间随着信号幅度的增加而减小. 由于器件在电磁脉

冲下的损伤类型为能量型损伤, 随着信号幅度的增加, 在相同时间内器件所吸收的能量增加, 从而导致器件更容易损伤.

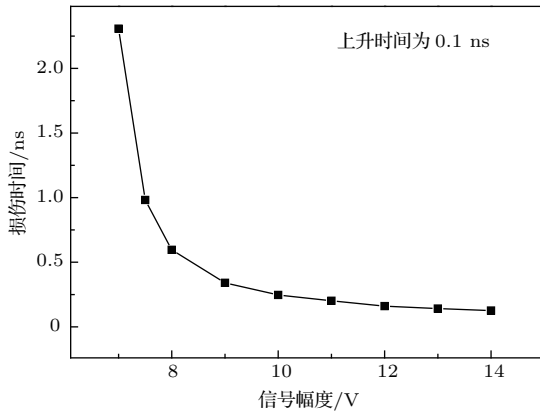


图7 损伤时间随信号幅度的变化

Fig. 7. Variation of the damage time with signal amplitude.

图8显示了相同幅度作用下器件损伤时间与信号上升时间的关系, 可以看出, 器件的损伤时间随着信号上升时间的增加而变长, 且基本成线性关系. 信号上升时间的增加, 导致器件雪崩击穿以及热击穿时间都延缓, 进而导致器件损伤时间也相应地延长.

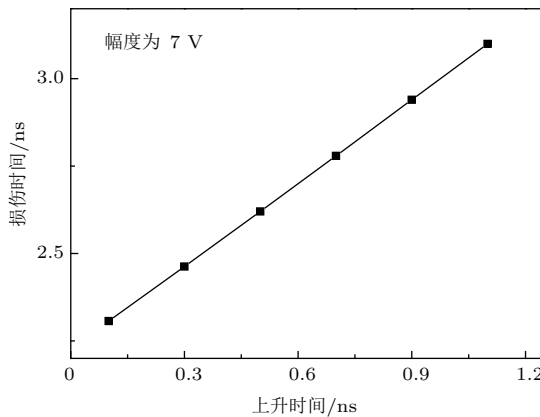


图8 损伤时间随上升时间的变化

Fig. 8. Variation of the damage time with signal rising time.

信号上升时间的变化能够影响注入信号的电压变化率, 进而影响器件的位移电流. 图9为信号电压上升过程中器件峰值位移电流及其在总电流的比重随信号上升时间的变化趋势. 从图9可以看出, 位移电流随着上升时间的增加而减小, 这是因为上升时间越长, 电压变化越缓慢. 同时, 位移电

流在总电流中的比重也随着上升时间的增加而减小, 且其比重整体都较小, 在上升时间为0.1 ns时该值最大才为0.06. 位移电流相比于总电流而言较小, 对器件损伤热积累的贡献基本可以忽略. 因此, 器件损伤时间变长的原因应该不是由位移电流所导致, 而是由于器件的击穿时间延缓所引起, 这与文献[21]中的分析相一致. 这里需要注意的是, 尽管位移电流对器件的损伤热积累影响不大, 但因其产生的瞬时高电流, 会对电路中的信号产生相当强的干扰, 使逻辑器件产生误激发.

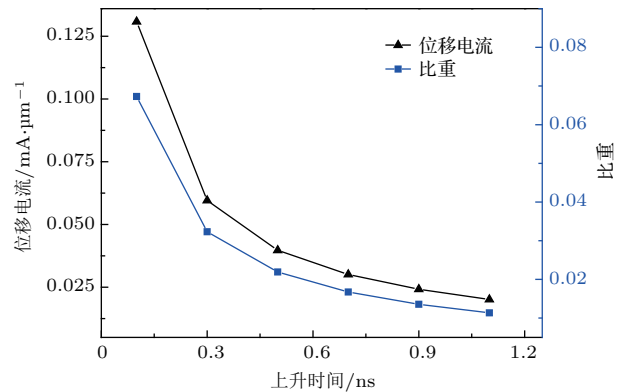


图9 位移电流和位移电流在总电流的比重随上升时间的变化

Fig. 9. Variation of the displacement current and its proportion in the total current with time.

3.2 外接电阻对损伤时间的影响

图10为器件损伤时间与外接电阻的关系. 无论源端外接电阻 R_s 还是漏端外接电阻 R_d , 都能够延缓器件的损伤进程. 当器件外接电阻时, 注入信号的能量将有一部分消耗在外接电阻上, 从而导致在相同时间内器件获得的能量减小, 损伤时间变长. 同时, 从图10可以看出, 在相同阻值的条件下 R_s 对器件损伤时间的影响幅度要比 R_d 大, 这是由器件的内部损伤机理所决定的. 实际中, 器件栅极的电流主要来源于源极. 当源极和漏极被外接相同阻值的电阻时, 源极外接电阻能够阻挡更多的栅极电流产生, 使器件难以烧毁. 图11是 $R_d = 400 \Omega$ 和 $R_s = 400 \Omega$ 条件下器件烧毁时刻的内部电流密度分布. 相比图5(b), 外接电阻的增加能使器件的电流沟道变窄. R_d 的增加减弱了栅极下方靠近漏端的电流沟道, 而 R_s 的增加使栅极下方两端的电流沟道都有所减弱. 因此, 在相同阻值的条件下, 源极外接电阻对器件的损伤效应影响更大.

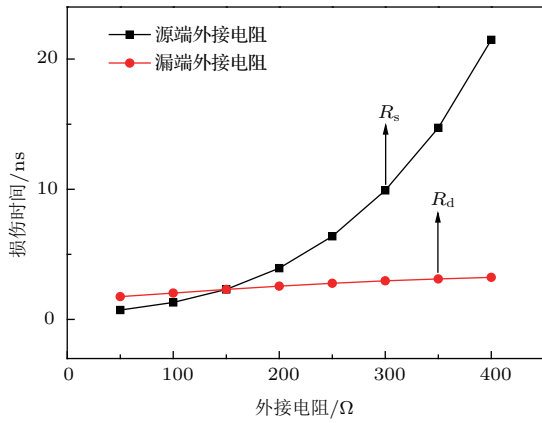


图 10 损伤时间随外接电阻的变化

Fig. 10. Variation of the damage time with external resistance.

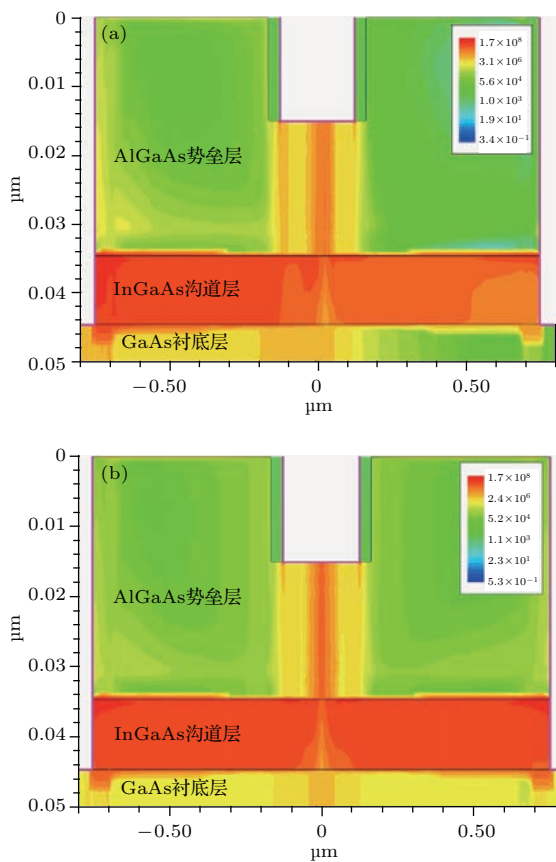


图 11 (网刊彩色) 器件烧毁时刻的电流密度分布 (A/cm^2) (a) $R_d = 400 \Omega$; (b) $R_s = 400 \Omega$

Fig. 11. (color online) Distribution of the current density (A/cm^2) at device burnout: (a) $R_d = 400 \Omega$; (b) $R_s = 400 \Omega$.

4 总 结

半导体器件是电子系统中的薄弱构成元件, 易受到外界 EMP 的影响而失效甚至烧毁. 由于 EMP 耦合途径的客观存在性以及电子系统的复杂性, 实

际中 EMP 信号并非直接作用到器件的端子上, 其对器件的损伤效应受到各种因素的影响. 本文从注入信号和器件外部电路两个方面出发, 研究了这些外界因素在器件 EMP 损伤效应中的影响. 研究结果显示, 器件的损伤进程受到注入信号参数变化的影响, 其损伤时间与信号幅度成反比, 与信号上升时间成正比. 器件外接电阻能够延缓器件的损伤进程, 相比于漏端外接电阻, 源端外接电阻对器件损伤效应的影响更大. 本文的研究结果能使我们更加真实地了解器件的 EMP 损伤过程与效应, 对于器件抗电磁脉冲损伤能力的设计具有重要的参考价值. 在外电路的设计中, 可研究构造能够减弱注入信号幅度、使信号上升时间变得缓慢的保护电路单元; 在器件的设计中, 可以在保证器件性能参数达标的前提下折衷增加源端的串联电阻.

本文利用电阻模拟器件的外部电路, 研究了这些电路对器件 EMP 损伤效应的影响. 实际中器件的外部电路并非纯电阻, 也可能存在电感和电容元件. 这些阻抗负载对于器件损伤效应的影响涉及到频率效应, 相比纯电阻的影响更加复杂, 目前正在对于器件的频率损伤敏感参数进行研究.

参考文献

- [1] Mansson D, Thottappillil R, Backstrom M, Lunden O 2008 *IEEE Trans. Electronmagn. Compat.* **50** 101
- [2] Hattori Y, Tadano H, Nagase H 2001 *Electron. Commun. Japan, Part 1* **84** 18
- [3] Kim K, Iliadis A A, Granatstein V L 2004 *Solid-State Electron.* **48** 1795
- [4] Zhou H A, Du Z W, Gong K 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1861 (in Chinese) [周怀安, 杜正伟, 龚克 2005 强激光与粒子束 **17** 1861]
- [5] Kim K, Iliadis A A 2010 *Solid-State Electron.* **54** 18
- [6] Chai C C, Xi X W, Ren X R, Yang Y T, Ma Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8118 (in Chinese) [柴常春, 席晓文, 任兴荣, 杨银堂, 马振洋 2010 物理学报 **59** 8118]
- [7] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 078501 (in Chinese) [马振洋, 柴常春, 任兴荣, 杨银堂, 陈斌 2012 物理学报 **61** 078501]
- [8] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B, Zhao Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 058502
- [9] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Zhao Y B, Qiao L P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 028502
- [10] Ren X R, Chai C C, Ma Z Y, Yang Y T, Qiao L P, Shi C L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 068501 (in Chinese) [任兴荣, 柴常春, 马振洋, 杨银堂, 乔丽萍, 石春蕾 2013 物理学报 **62** 068501]

- [11] Zhao Z G, Ma H G, Zhao G, Wang Y, Zhong L Q 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 1741 (in Chinese) [赵振国, 马弘舸, 赵刚, 王艳, 钟龙权 2013 强激光与粒子束 **25** 1741]
- [12] Zhang C B, Wang H G, Zhang J D 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 063014 (in Chinese) [张存波, 王弘刚, 张建德 2014 强激光与粒子束 **26** 063014]
- [13] Zhang C B, Zhang J D, Wang H G, Du G X 2015 *Microelectr. Reliab.* **55** 508
- [14] Xi X W, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Ma Z Y, Wang J 2010 *J. Semicond.* **31** 074009
- [15] Chen X, Du Z W, Gong K 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1197 (in Chinese) [陈曦, 杜正伟, 龚克 2007 强激光与粒子束 **19** 1197]
- [16] Yu X H, Chai C C, Liu Y, Yang Y T, Xi X W 2015 *Chin. Phys. B* **24** 048502
- [17] Xi X W, Chai C C, Zhao G, Yang Y T, Yu X H, Liu Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 048503
- [18] Xi X W, Chai C C, Liu Y, Yang Y T, Fan Q Y, Shi C L 2016 *Chin. Phys. B* **25** 088504
- [19] Ren X R 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [任兴荣 2014 博士学位论文(西安: 西安电子科技大学)]
- [20] Yu X H, Chai C C, Liu Y, Yang Y T, Fan Q Y 2015 *Microelectr. Reliab.* **55** 1174
- [21] Guo H X, Zhou H, Chen Y S, Zhang Y M, Gong R X, Guan Y, Han F B, Gong J C 2002 *Microelectr. Comput.* **19** 17 (in Chinese) [郭红霞, 周辉, 陈雨生, 张义门, 龚仁喜, 关颖, 韩福斌, 龚建成 2002 微电子学与计算机 **19** 17]

Influence of the external condition on the damage process of the GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor induced by the electromagnetic pulse*

Xi Xiao-Wen[†] Chai Chang-Chun Liu Yang Yang Yin-Tang Fan Qing-Yang

(Ministry of Education Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 16 November 2016; revised manuscript received 10 January 2017)

Abstract

Electronic system and device are vulnerable under intensive electromagnetic pulse (EMP) environment, where low noise amplifier (LNA) is a typical sensitive instance for electromagnetic energy. This work focuses on the EMP-induced damage effect of GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor (PHEMT), which is the core part of LNA. Using the simulation software Sentaurus TCAD, an EMP-induced damage model of the GaAs PHEMT is established in this paper, and verified through the experimental result. It is shown that the damage position of the device under the injection EMP exists in the center area under gate terminal. Based on this model and aiming at EMP parameters and external resistances, the influence of the external conditions on the damage effect of the device is investigated. The results indicate that the damage time is related to EMP parameters obviously: 1) the damage time is inversely proportional to EMP amplitude since higher power density is absorbed under a stronger EMP; 2) the damage time is in direct proportion to signal rising time since the breakdown time is postponed under EMP with a slower rising edge. Furthermore, it is found that a load resistor is able to weaken current channel which is effective in delaying the damage process, and this effect is more obvious, with load resistor connected with source terminal. It should be noted that the results are beneficial to and valuable in hardening method against EMP of semiconductor devices. It is feasible to design external circuit protection units, aiming at attenuating signal amplitude and increasing the rising time of injected pulse. Another effectual approach is to enlarge the source series resistance under the premise of the performance meeting the requirements.

Keywords: GaAs PHEMT, electromagnetic pulse, external condition, damage process

PACS: 84.40.-x, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.66.078401

* Project supported by the Open Fund of Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Science and Technology, China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2015-0214.XY.K).

[†] Corresponding author. E-mail: xixw841003@163.com