

电磁脉冲与单粒子效应对SOI MOSFET电学特性的影响

宋沛洋 郝建红 张志远 赵强 张芳 范杰清 董志伟

Effects of electromagnetic pulse and single event effect on electrical characteristics of SOI MOSFET

Song Peiyang, Hao Jianhong, Zhang Zhiyuan, Zhao Qiang, Zhang Fang, Fan Jieqing, Dong Zhiwei

引用本文:

宋沛洋, 郝建红, 张志远, 赵强, 张芳, 范杰清, 董志伟. 电磁脉冲与单粒子效应对SOI MOSFET电学特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 096006. doi: 10.11884/HPLPB202537.250047

Song Peiyang, Hao Jianhong, Zhang Zhiyuan, Zhao Qiang, Zhang Fang, Fan Jieqing, Dong Zhiwei. Effects of electromagnetic pulse and single event effect on electrical characteristics of SOI MOSFET[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 096006. doi: 10.11884/HPLPB202537.250047

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.250047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雪崩管Marx电路波形振荡影响因素分析

Analysis of factors causing waveform oscillation in avalanche transistor-based Marx circuit

强激光与粒子束. 2024, 36: 115024-1-115024-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240330>

车辆线缆瞬态电磁脉冲耦合仿真与抑制技术

Vehicle cable electromagnetic pulse coupling simulation and suppression

强激光与粒子束. 2021, 33: 123019-1-123019-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210227>

快上升前沿电磁脉冲下片上静电放电防护电路的效应与机理

Effect and mechanism of on-chip electrostatic discharge protection circuit under fast rising time electromagnetic pulse

强激光与粒子束. 2024, 36: 103005-1-103005-9 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240231>

国内典型地区地面大气中子能谱测量与仿真

Measurement and simulation of terrestrial atmospheric neutron spectrum in typical regions of China

强激光与粒子束. 2023, 35: 059001-1-059001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220353>

车辆发动机管理系统线缆强电磁脉冲耦合与防护仿真研究

Research on cable strong electromagnetic pulse coupling and protection simulation of vehicle engine management system

强激光与粒子束. 2024, 36: 043006-1-043006-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230327>

重频超宽带电磁脉冲对GPS导航接收机的效应研究

Influence of repeated frequency UWB electromagnetic pulse on GPS navigation receiver

强激光与粒子束. 2024, 36: 033011-1-033011-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230324>



·第 5 届 HPLPB 前沿学术研讨会专栏·

电磁脉冲与单粒子效应对 SOI MOSFET 电学特性的影响^{*}

宋沛洋¹, 郝建红¹, 张志远¹, 赵 强², 张 芳², 范杰清¹, 董志伟²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: SOI MOSFET 器件广泛应用于航天电子设备中, 但它们容易受到空间中电磁脉冲及粒子辐照效应的影响, 进而影响航天器的稳定性。通过建立二维的短沟道 SOI MOSFET 器件模型, 探究电磁脉冲和重离子辐照引起的单粒子效应对器件电学特性的影响。研究结果表明, 在电磁脉冲作用下, 随着电磁脉冲电压幅值的增大, SOI MOSFET 会发生雪崩击穿, 雪崩击穿现象导致 PN 结内建电场的电场强度和电流密度的增加, 继而导致晶格温度上升; 器件发生雪崩击穿的阈值电压随着栅极电压的增加而降低, 同时也随着源极和漏极之间沟道长度的减小而降低。重离子入射会使 SOI MOSFET 器件的瞬态漏电流激增, 随着电子-空穴对的复合和扩散, 电流逐渐减小。电磁脉冲和重离子协同作用于器件时, 重离子辐照降低了器件发生雪崩击穿的阈值电压。

关键词: MOSFET; 电磁脉冲; 单粒子效应; 雪崩击穿; 仿真模拟

中图分类号: TL72

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202537.250047

Effects of electromagnetic pulse and single event effect on electrical characteristics of SOI MOSFET

Song Peiyang¹, Hao Jianhong¹, Zhang Zhiyuan¹, Zhao Qiang², Zhang Fang², Fan Jieqing¹, Dong Zhiwei²

(1. Faculty of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: [Background] In space environments, electronic systems are vulnerable to various adverse effects, including electromagnetic pulses (EMP) and particle radiation, which can significantly degrade device performance and reliability. Silicon-on-insulator (SOI) MOSFETs are widely used in aerospace applications due to their excellent electrical characteristics, but their response to the combined radiation effects needs further investigation. [Purpose] This study aims to analyze the effects of electromagnetic pulses and heavy-ion induced single-particle events on the electrical characteristics of short-channel SOI MOSFETs. It also explores the synergistic impact of when both effects occur simultaneously, providing insights for improving the device robustness in harsh space conditions. [Methods] A two-dimensional TCAD-based numerical model of short-channel SOI MOSFETs was developed, incorporating impact ionization, carrier generation and recombination, heat transfer, and thermodynamic effects. Electromagnetic pulses were modeled as transient voltage pulses with varying amplitudes, while heavy-ion effects were simulated through charge deposition profiles characterized by linear energy transfer (LET) parameters. The influence of gate voltage, channel length, and LET on device behavior was systematically studied. [Results] Simulation results indicate that EMP-induced voltage transients can cause avalanche breakdown in the drain PN junction, with the breakdown voltage decreasing as gate bias increases or channel length shortens. The internal electric field, current density, and device temperature intensify during breakdown. Heavy-ion irradiation generates electron-hole pairs, causing transient increases in drain current, which lowers the avalanche breakdown threshold when combined with EMP. Higher LET values further exacerbate device degradation by increasing ionization effects and reducing breakdown voltages. The combined effects produce more severe electrical deterioration compared to single effects. [Conclusions] The research

* 收稿日期: 2025-03-18; 修订日期: 2025-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12205024)

联系方式: 宋沛洋, 1292006448@qq.com。

通信作者: 赵 强, zhaq@iapcm.ac.cn。

demonstrates that both EMP and heavy-ion irradiation can markedly weaken the electrical stability of short-channel SOI MOSFETs. These findings underscore the importance of designing radiation-hardened devices for space applications. The study provides a theoretical basis for future investigations into the synergistic effects of radiation phenomena on power semiconductor devices.

Key words: MOSFET, electromagnetic pulse, single event effect, avalanche breakdown, simulation modeling

在太空复杂环境中, 电子系统容易受到包括电磁脉冲和粒子辐射效应在内的多种不利因素的影响^[1]。金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)作为电子系统的关键组件, 尤其易受到这些效应的影响。探究电磁脉冲和单粒子效应对 MOSFET 的电学特性影响具有重要意义, 以便深入理解其在辐射环境中的性能表现。已有许多研究探讨了电磁脉冲作用下 MOSFET 的电学特性变化。林金福和刘红霞等人分析了电磁脉冲诱导的 MOSFET 损伤效应和降解机理^[2]。范菊平和游海龙等人人在实验中发现器件内部峰值温度出现在漏端 PN 结附近, 且具有累积效应^[3]。李万银和张晨阳等人研究发现电磁脉冲作用下长沟道 NMOS 管主要发生雪崩击穿, 雪崩击穿电压随栅极电压的增大而增大^[4]。T. Toyabe 等人提出了 MOSFET 中雪崩击穿的准确数值模型。该模型适用于在 P-MOSFET 中观察到的正常击穿, 以及在短沟道 N-MOSFET 中观察到的负电阻击穿^[5]。除了电磁脉冲效应外, 太空中的粒子辐照效应同样会对器件造成显著的损伤。张鸿等人对 SIC 器件进行单粒子效应研究, 研究发现重离子从源极入射器件时, 具有更短的单粒子翻转发生时间和更低的单粒子翻转阈值电压^[6]。高婷婷等人对 MOSFET 器件进行重离子辐照实验, 发现高能量的重离子入射器件时, 会产生径迹效应。产生的电荷能够引起电流和电压变化, 漏极电流明显增大, 器件性能退化严重^[7]。值得注意的是, 电磁脉冲和辐照效应常常不是单独作用的, 研究显示两者之间可能存在相互影响。Nicholas A. Estep 等人研究了电磁干扰和伽马辐射对 CMOS 集成电路的影响, 研究发现与电磁脉冲干扰和电离辐射单独作用于电路相比, 两者协同作用会对电路产生更严重的影响^[8]。吴文斌等人建立了 NMOS 器件的总电离剂量(TID)和电磁脉冲效应(EMP)协同仿真模型。在协同作用时, NMOS 出现更严重的漏电流增加和亚阈值退化^[9]。然而, 目前关于单粒子效应与电磁脉冲在功率器件中协同作用的研究仍然相对匮乏。与传统的 MOSFET 相比, 短沟道绝缘体上硅(SOI)结构的 MOSFET 通过在硅层与基底之间引入绝缘层, 有效降低了寄生电容。这一结构改进显著提升了器件的整体性能^[10]。由于其独特的优点, SOI MOSFET 被广泛应用于航天设备中。本研究将深入分析短沟道 SOI MOSFET 在电磁脉冲和单粒子效应作用下的电学特性。此外, 还将探讨这两种效应的协同作用对 SOI MOSFET 电学特性的影响。这些研究将有助于更好地理解 SOI MOSFET 在复杂辐射环境中的性能表现。

1 仿真模型

1.1 器件模型

本文使用半导体工艺模拟及器件模拟工具(TCAD)对 SOI MOSFET 模型进行建模, 器件的结构和掺杂浓度情况如图 1 所示。器件的各个结构厚度和各个区域的掺杂的具体参数, 如表 1 所示。该器件为短沟道 SOI MOSFET, 为了解决 MOSFET 沟道长度缩短所导致的电场增大问题, SOI MOSFET 源极和漏极采用轻掺杂源漏(LDD)技术。漏极和源极的磷原子掺杂方式采用高斯掺杂(DGD)。基于所建立的短沟道 SOI MOSFET 器件模型, 采用准静态扫描法获取了器件的输出特性曲线和转移特性曲线。随后, 将所得曲线数与文献中的相关数据^[11]进行比较。如图 2 所示, 曲线数据之间的吻合度较高, 这表明我们所建立的器件模型具有良好的有效性。

1.2 物理模型

1.2.1 电磁脉冲模型

电磁脉冲是一种瞬态的电磁干扰, 主要通过电场或磁场的形式传递能量。然而, 由于实际空间电磁脉冲具有极为复

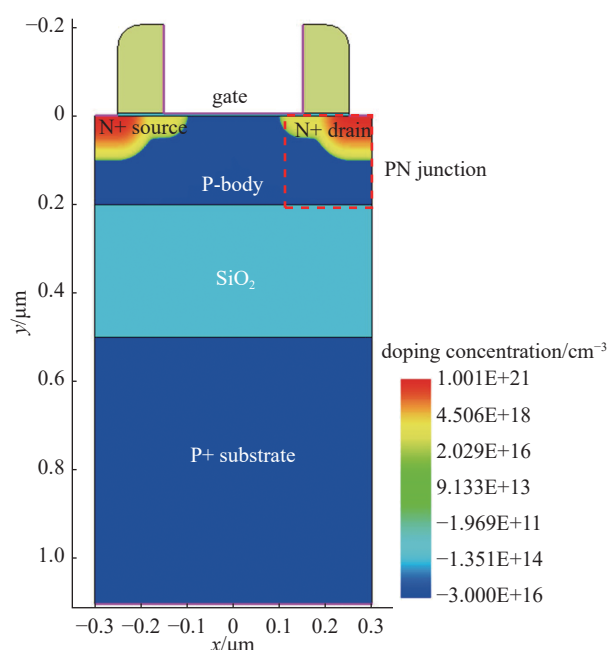


Fig. 1 SOI MOSFET model

图 1 SOI MOSFET 模型

表 1 SOI MOSFET 器件结构参数
Table 1 SOI MOSFET device structure parameters

structure	thickness/ μm	material	dopant type	dopant concentration/ cm^{-3}
substrate	0.6	Si	B	3×10^{15}
body	0.2	Si	B	3×10^{16}
drain	0.1	Si	P	1×10^{21}
source	0.1	Si	P	1×10^{21}
buried oxide	0.3	SiO_2		
gate oxide layer	0.003	SiO_2		
gate	0.2	poly silicon		

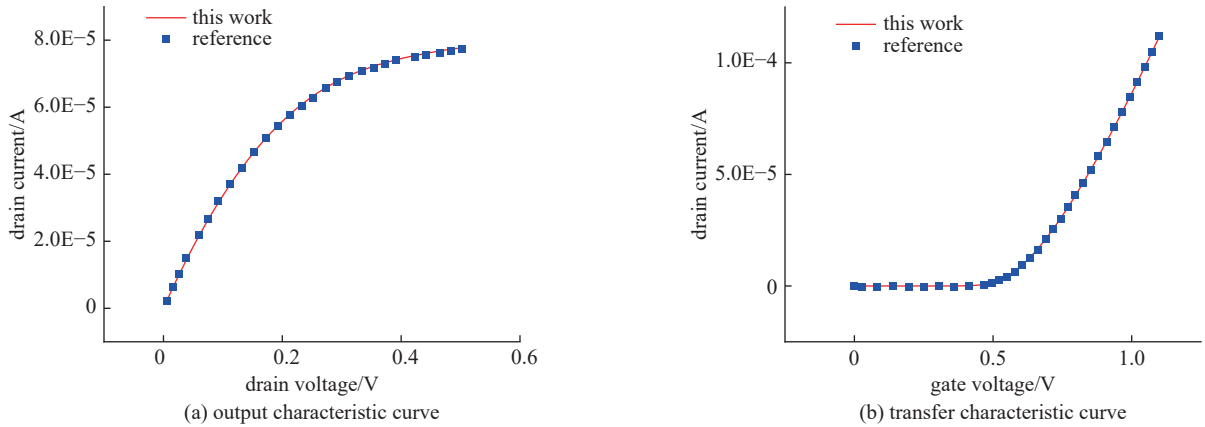


Fig. 2 Output and transfer characteristic curves of MOSFET

图 2 MOSFET 输出特性曲线与转移特性曲线

杂的波形特性,包括多频段振荡和非线性变化,直接进行空间场的全面模拟成本高、难度大。因此,在相关研究中通常采用简化的模型进行近似模拟。常见的 EMP 简化波形如矩形波、双指数波和阻尼正弦波^[12]。其中,矩形波的最大优势在于其具有快速上升沿,能够在极短的时间内将能量释放到系统中,其突发性、宽频谱特性及实现简便性,使其成为广泛应用的近似模型。通过调节矩形波的幅值、持续时间和上升时间,可以在频域上有效等效表达 EMP 的主要激发特性,充分反映瞬态高能量突变对微电子器件的影响。本研究采用脉冲电压源对矩形脉冲进行简化,旨在有效反映 EMP 的瞬态冲激效应,从而深入分析电磁脉冲对 SOI MOSFET 电学性能的影响。

当 N 沟道增强型 MOSFET 的漏极受到电磁脉冲作用时,掺杂磷原子的漏极与掺杂硼原子的体区构成了一个反向的 PN 结,当电磁脉冲的峰值电压大于 PN 结雪崩击穿的阈值电压时, MOSFET 可能会发生雪崩击穿^[13]。雪崩击穿会影响器件内部的载流子分布。为了探究载流子变化情况,在半导体器件仿真软件中选择使用 van Overstraeten 雪崩击穿模型,并将驱动力模型设置为准费米能级梯度(Grad Quasi Fermi)。在引入雪崩击穿模型时,还需要考虑费米能级模型、肖克莱-里德-霍尔(SRH)复合模型及迁移率模型。

雪崩击穿发生时往往伴随着载流子倍增,雪崩倍增现象需要具备一定的阈值电场强度和加速条件,这通常要求存在一个较宽的空间电荷区。当这个空间电荷区的宽度大于两个电离碰撞之间的平均自由程时,便会发生电荷倍增,可能导致电击穿^[14]。平均自由程的倒数被称为电离系数,用于描述材料中电子与空穴的电离能力。雪崩击穿时雪崩产生率(即单位体积内每单位时间生成的电子-空穴对的数量)为

$$G = \frac{1}{q}(\alpha_n |J_n| + \alpha_p |J_p|) \quad (1)$$

式中: α_n 和 α_p 表示电子和空穴的电离系数; J_n 和 J_p 分别为电子和空穴的电流密度; q 表示电子的电荷。

在研究电磁脉冲对器件的损伤时,当强电磁脉冲施加到器件上时,会发生雪崩击穿,产生瞬态电流,导致器件温度升高。这种温度变化会影响载流子的迁移率,从而影响电流密度和 MOSFET 的性能。因此,在分析过程中,需要考虑温度变化对 MOSFET 造成的影响。物理模型中不仅需要引入雪崩击穿模型,还需要引入热力学模型。

通过热力学模型分析,晶格温度计算公式如下^[15]

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_L T) - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = -\nabla \cdot [(P_n T + \Phi_n) \mathbf{J}_n + (P_p T + \Phi_p) \mathbf{J}_p] - \left(E_C + \frac{3}{2}kT\right) \nabla \cdot \mathbf{J}_n - \left(E_V - \frac{3}{2}kT\right) \nabla \cdot \mathbf{J}_p + qR(E_C - E_V + 3kT) \quad (2)$$

式中: κ 表示热导率; k 表示波耳兹曼常数; C_L 代表晶格的热容量; E_C 和 E_V 分别是导带能级和价带能级; R 是复合率; P_n 和 P_p 是电子和空穴的绝对热电功率; T 为晶格温度; Φ_n 和 Φ_p 是电子和空穴的准费米势。

Si 的热导率方程为

$$\kappa(T) = \frac{1}{a + bT + cT^2} \quad (3)$$

式中: $a = 0.03 \text{ cm} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; $b = 1.56 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1}$; $c = 1.65 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

在热力学模型中, 漂移扩散模型用来描述载流子在器件中运动的情况。该模型不仅考虑电子和空穴的电流密度, 还包含了温度梯度对其影响。该模型能够准确捕捉在器件温度分布不均的条件下载流子的行为, 因为温度的变化会显著影响载流子的生成、复合过程及迁移率等特性。电子和空穴的电流密度表示为

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

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

式中: n 和 p 为电子和空穴密度; μ_n 和 μ_p 是电子和空穴的迁移率。

1.2.2 单粒子效应模型

在空间环境中存在大量粒子, 其中重离子的能量较高。当重离子照射到半导体器件上时, 容易与器件材料瞬间发生相互作用, 引发单粒子效应, 从而影响器件的正常工作。

由于重离子的质量和速度较大, 重离子具有相对较高的动能。重离子入射 MOSFET 源极时, 与材料中的原子发生碰撞, 重离子释放能量, 产生大量的电子空穴对^[16]。重离子入射模型如图 3 所示, 其中 $w_i(l)$ 为重离子入射的轨迹半径, $l_{\max}$ 表示重离子入射轨迹的长度。

重离子引发的单粒子效应会受到多个因素的影响, 包括重离子的入射能量、入射的具体时间和方向、入射轨迹的长度, 以及在该过程中生成的电子和空穴的时间及空间分布。这些因素的变化可能导致载流子行为的不同, 从而对器件的性能产生显著的影响。

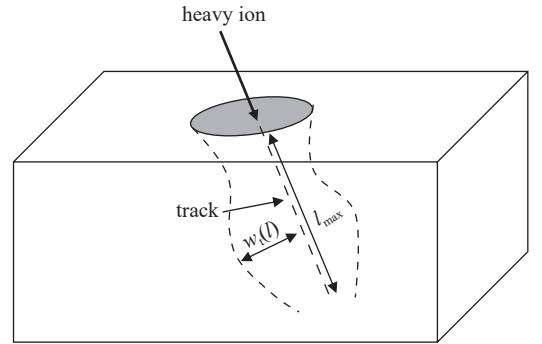


Fig. 3 Heavy ion incidence model

图 3 重离子入射模型

重离子对器件造成的损伤程度主要通过线性能量转移(LET)来反映。线性能量转移表示粒子在材料中移动每单位距离时的能量损失。高 LET 值说明粒子释放更多的能量, 产生更强的电离效应和损伤^[17]。其数学表达式为

$$\rho_{\text{LET}} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad (6)$$

式中: ρ_{LET} 表示线性能量传输密度; ρ 是材料密度; dE 是粒子在单位路径长度 dx 中沉积的能量。

2 仿真结果及分析

2.1 电磁脉冲辐照效应仿真

在电磁脉冲的作用下, MOSFET 可能会经历雪崩击穿现象, 其损伤机制主要是由于瞬态过电压引发的极高电场。当电场强度超过器件的绝缘阈值时, 少数载流子(如电子或空穴)在该电场的影响下获得足够的能量进行碰撞, 进而产生更多的载流子, 形成载流子的倍增效应^[18]。这一过程不仅加速了 MOSFET 中导电载流子的数量增加, 还可能导致短路状态的发生, 最终引发器件的热失控和永久性损坏。此外, 雪崩击穿过程中生成的高电流会对栅氧化层和 PN 结造成热损伤, 严重影响 MOSFET 的可靠性和性能。

MOSFET 发生雪崩击穿主要有两种类型: 正常击穿和负阻击穿^[6]。正常击穿通常发生在 P 型 MOSFET 或长沟道 N 型 MOSFET 中; 负阻击穿则常见于短沟道 N 型 MOSFET。在负阻击穿状态下, 当漏极电流 I_d 达到临界值时, 漏极至源极电压 V_{ds} 会出现回落现象, 进入负阻区。即在漏极电流增加的过程中, V_{ds} 逐渐降低到一个稳定值, 此时的 V_{ds} 称为维持电压, 此时器件仍然可以正常工作。在设计这些器件时, 可以根据仿真模型的参数制造器件, 并将

维持电压设置为器件正常工作的最大电压。

2.1.1 电磁脉冲对 SOI MOSFET 的瞬态特性的影响

在短沟道 SOI MOSFET 的漏极施加一个峰值电压为 10 V、上升时间为 2 ns 的脉冲电压源。脉冲波形如图 4 所示。源极和衬底接地, 栅极连接一个 3 V 的直流电压源以确保 SOI MOSFET 导通。为避免因电流增大导致器件温度超过硅的熔点, 从而损坏 SOI MOSFET, 在漏极与脉冲电压源之间加装一个 200 Ω 的电阻, 并在器件源极、漏极、栅极和衬底分别接入 20 Ω 的热阻进行散热。

模拟计算得到 N 沟道增强型 MOSFET 的 I_d - V_{ds} 曲线, 如图 5 所示。从图 5 的曲线可以看出 SOI MOSFET 发生了负阻击穿。在这一过程中, 雪崩击穿的阈值电压为 3.2 V, 维持电压约为 2.5 V。电压小于 3.2 V 时, MOSFET 处于饱和区, 此时电流变化不明显。然而, 当电压超过 3.2 V 时, 漏极处的反向 PN 结会被击穿, 导致雪崩倍增效应的发生。由于源极和漏极之间载流子存在浓度差, 载流子在源漏之间的导通沟道内迅速流动, 形成高瞬态电流, 从而导致漏极电流瞬间增大。

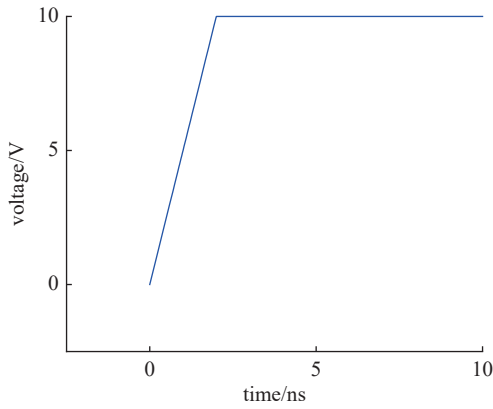


Fig. 4 Pulse waveform diagram

图 4 脉冲波形图

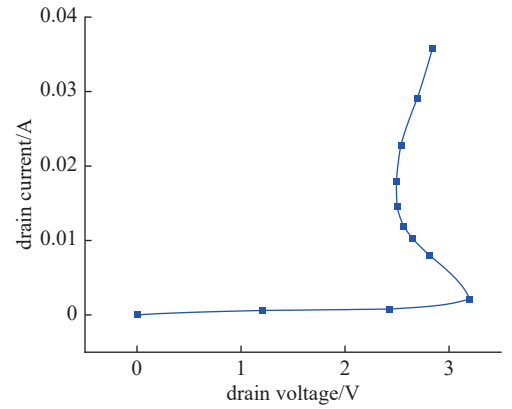


Fig. 5 Output characteristic curve of MOSFET under electromagnetic pulse action

图 5 电磁脉冲作用下 MOSFET 输出特性曲线

2.1.2 电磁脉冲对 SOI MOSFET 内部特性的影响

本节主要通过观察发生雪崩击穿前后器件的电场强度、电流密度和器件温度的变化情况, 探究电磁脉冲对 SOI MOSFET 内部特性的影响。

SOI MOSFET 的漏极和体区由于不同的掺杂, 构成了一个 PN 结。当给漏极施加脉冲电压时, 相当于给 PN 结施加反偏电压。空间电荷区宽度与反偏电压的关系式和最大电场强度与空间电荷区宽度的关系式^[19]分别表示如下

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$E_{\max} = \frac{-2(V_{bi} + V_R)}{W} \quad (8)$$

式中: W 为总空间电荷区宽度; ϵ_s 为半导体介电常数; V_R 为反偏电压; V_{bi} 为内建电势差; $E_{\max}$ 为最大电场强度; N_a 和 N_d 分别为受主和施主杂质原子密度。

将式(7)代入式(8), 可得最大电场强度与反偏电压之间的关系

$$E_{\max} = - \left[\frac{2q(V_{bi} + V_R)}{\epsilon_s} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

从公式(9)可以看出, 随着电磁脉冲电压幅值的增加, MOSFET 漏极处的反向 PN 结的最大电场强度也随之增大。

分别观测脉冲电压幅值达到 2 V、5 V 和 10 V 时, 器件内部的电场强度分布情况, 如图 6 所示。可以看出, 随着脉冲幅值的增大, SOI MOSFET 漏极处的反向 PN 结最大电场强度也增大, 与理论公式(9)得出的结论一致。当电压达到 2 V 时, 此时未发生雪崩击穿, 电场强度较小。电压达到 5 V 和 10 V 时, 已经发生雪崩击穿, 电场强度大幅度增大。当漏极电压作用到漏极与体区形成的反向 PN 结时, 外加电场的方向与 PN 结的内建电场方向相同, 这使

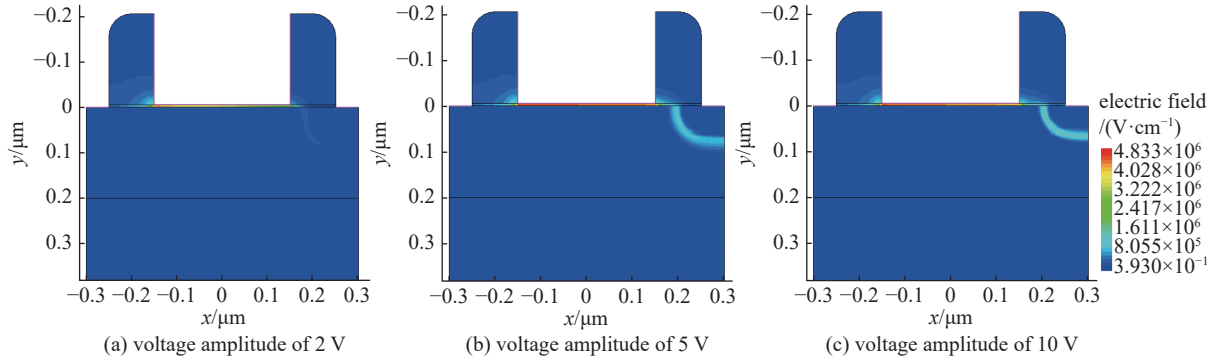


Fig. 6 Electric field distribution of the device at pulse voltage amplitudes of 2 V, 5 V, and 10 V

图 6 脉冲电压幅值分别为 2 V、5 V 和 10 V 时器件电场强度分布

得脉冲电压增强了 PN 结的内建电场。在漏极外加电场的作用下,漏极的多数载流子(空穴)和掺杂 P 的体区的多数载流子(电子)被推离空间电荷区,导致空间电荷区的宽度增大,此区域的电场强度也随之增加。因此,漏极与体区交界处的电场强度较大。

观察在脉冲电压达到 2 V、5 V 和 10 V 时,器件内部的电流密度分布情况,探究电磁脉冲对器件内部电流的影响。

当脉冲电压达到 2 V 时,未发生雪崩击穿,导电沟道处的电流密度较小。当脉冲电压达到 5 V 和 10 V 时,由于此时漏极电压大于雪崩击穿的阈值电压,发生了雪崩击穿。载流子和材料中的原子不断碰撞,产生更多的电子空穴对。随着电子空穴对逐渐增多,漏极电流迅速增加,电流密度呈指数级上升,如图 7 所示。

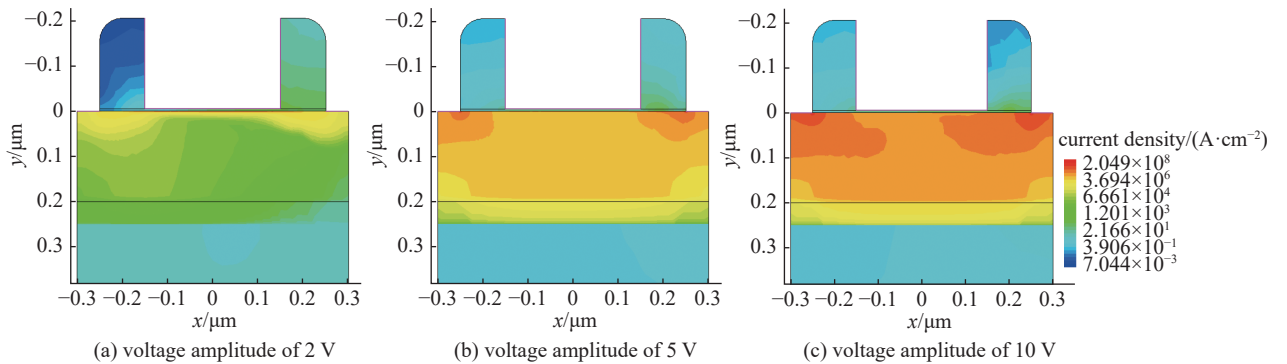


Fig. 7 Total current density distribution of the device at pulse voltage amplitudes of 2 V, 5 V, and 10 V

图 7 脉冲电压幅值分别为 2 V、5 V 和 10 V 时器件总电流密度分布

为了更清晰的看出雪崩击穿前后的电流密度变化情况,取 MOSFET 的 y 轴 0.017 μm 处横轴上的电流密度分布,如图 8 所示。当脉冲电压达到 2 V 时,此时未发生雪崩击穿,总电流密度分布比较均匀。当脉冲电压达到 5 V 和 10 V 时,由于结曲率效应,源极和漏极比导电沟道处的总电流密度大。与脉冲电压达到 2 V 时相比,总电流密度呈指数型增长。

雪崩击穿的发生通常伴随着器件内部温度的升高。不同脉冲电压下,器件内部的温度分布如图 9 所示。当脉冲电压达到 2 V 时,器件未发生雪崩击穿,内部温度基本保持在 300 K。随着电压提升至 5 V,发生雪崩击穿,温度随之上升。电压进一步增加至 10 V 时,温度持续上升,温度达到 642.3 K。尚未达到材料的烧毁温度,器件仍然能够正常工作。

从器件内部的电场强度分布图和电流密度分布图可以看出,漏极处存在最大的电场强度和电流密度,因此该区域的功率最大。因此,随着电磁脉冲电压的增大,漏极处因功率耗散而导致的器件温度逐渐升高。

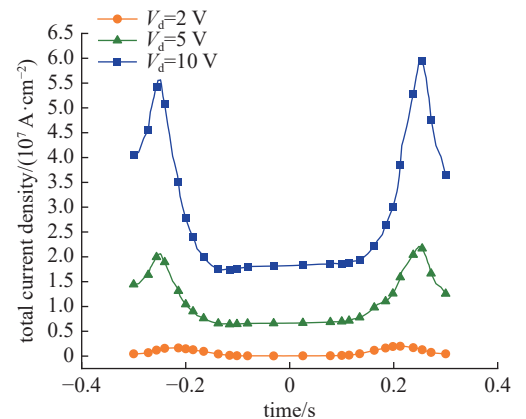


Fig. 8 Total current density distribution on the horizontal axis at $y = 0.017 \mu\text{m}$

图 8 $y=0.017 \mu\text{m}$ 处横轴上总电流密度分布

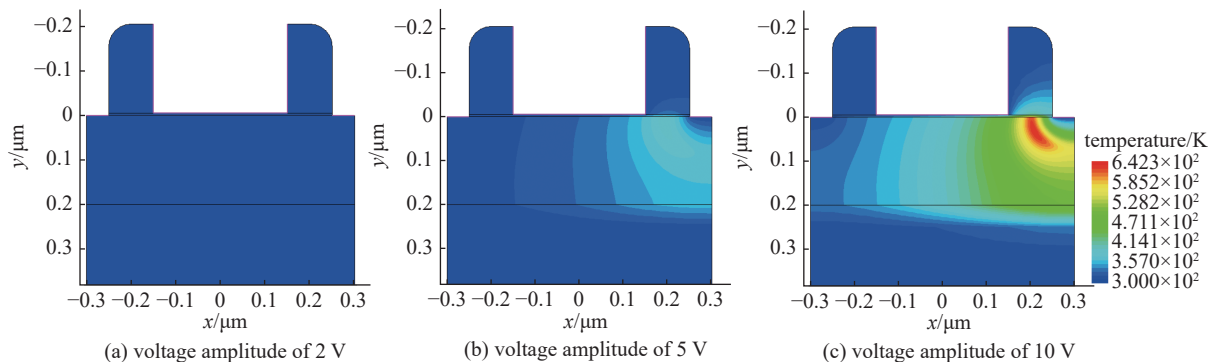


Fig. 9 Internal temperature distribution of the device at pulse voltage amplitudes of 2 V, 5 V, and 10 V

图 9 脉冲电压幅值分别为 2 V、5 V 和 10 V 时器件内部温度分布

2.1.3 SOI MOSFET 中栅极电压和沟道长度对击穿电压的影响

本节重点研究短沟道 SOI MOSFET 中栅极电压和沟道长度对雪崩击穿阈值电压的影响, 其中仿真采用了与 2.1.1 节相同的基础设置。

栅极电压会影响导电沟道的宽度, 随着栅极电压的增大, 导电沟道的宽度也相应增大。这使得源极的电子能够更多地流向漏极, 从而增加饱和电流。当漏极电压尚未达到击穿电压时, 在相同的 V_{ds} 下, 栅极电压越大, 漏极电流也越大。在短沟道 SOI MOSFET 中, 由于存在负阻效应, 负阻击穿与正常击穿相反, 击穿电压 V_{ds} 会随着栅极电压的增加而降低。如图 10 所示, 不同栅极电压下 I_d 与 V_{ds} 之间的关系曲线显示, 当栅极电压为 2 V 时, 雪崩击穿的阈值电压达到最大值, 而在栅极电压为 6 V 时, 阈值电压则降至最低。因此, 可以得出结论: 在电磁脉冲作用下, SOI MOSFET 的雪崩击穿电压随着栅极电压的增加而降低。

为了研究 N 型 MOSFET 中源极和漏极之间沟道长度与雪崩击穿电压之间的关系, 沟道长度分别设置为 0.1 μm 、0.2 μm 和 0.3 μm , 其余结构参数保持不变, 仿真设置与 2.1.1 节相同。仿真结果如图 11 所示。结果表明, 漏极和源极之间的沟道长度越小, 雪崩击穿的阈值电压越低。

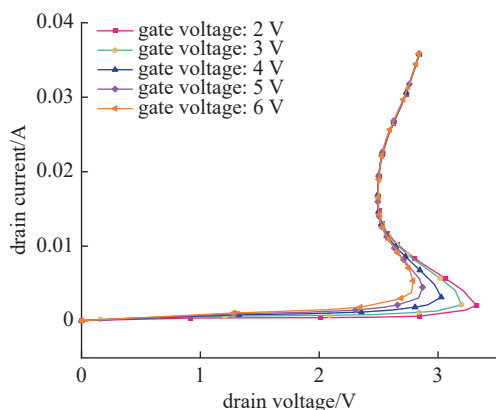


Fig. 10 Output characteristic curves under different gate voltages

图 10 不同栅极电压下的输出特性曲线

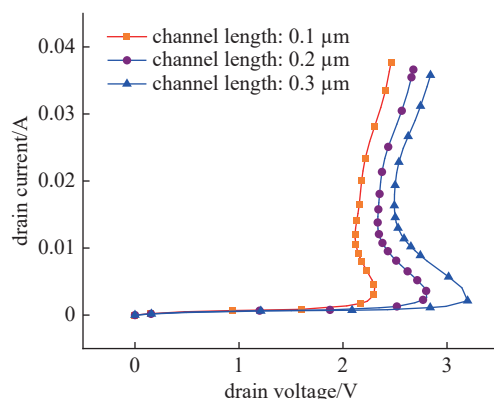


Fig. 11 Output characteristic curves at different channel lengths

图 11 不同沟道长度下的输出特性曲线

2.2 单粒子效应仿真

设置重离子在 10 ps 时从 MOSFET 漏极垂直于 x 轴入射, 入射深度为 0.15 μm , 特征半径为 10 nm, LET 值为 0.01 pC/ μm , 如图 12 所示。

当重离子进入漏极时, 它沿径迹逐步损耗能量, 这些能量被硅材料吸收, 引发电离作用。硅原子的外层电子跃迁至导带, 形成大量电子-空穴对。在径迹中心, 由于能量最集中, 电子和空穴对的数量最多; 而在径迹边缘, 随着能量减少, 电子-空穴对的数量也逐渐减小, 呈高斯分布。

为研究重离子入射对漏极瞬态电流的影响, 模拟计算得到重离子入射后瞬态漏电流的变化曲线, 如图 13 所示。重离子入射后, 电流首先出现一个短暂的脉冲, 这主要是由于粒子在器件中迅速移动并生成电子-空穴对, 导致它们快速漂移, 扰动了器件的正常工作状态, 从而形成持续在皮秒级的高电流尖脉冲。随后, 随着电子-空穴对的复合和扩散, 漏电流进入电荷收集阶段, 电流逐渐减小, 并出现在纳秒级持续的水平拖尾。

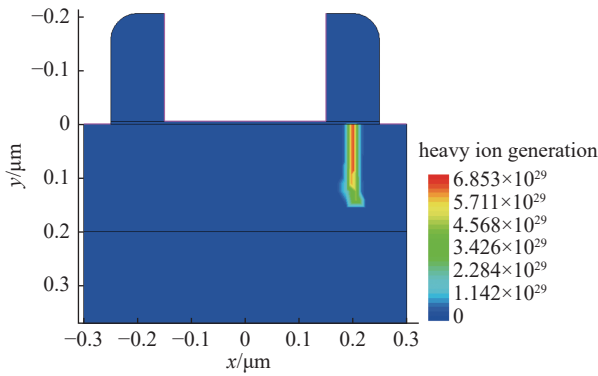


Fig. 12 SOI MOSFET heavy ion incidence diagram

图 12 SOI MOSFET 重离子入射图

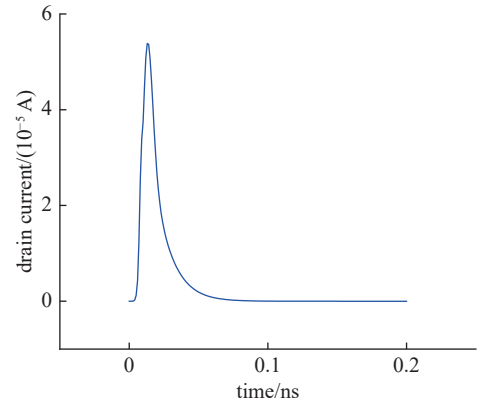


Fig. 13 Transient drain current curve after heavy ion incidence

图 13 重离子入射后瞬态漏电流曲线

2.3 电磁脉冲与单粒子效应的联合仿真

为了探究电磁脉冲与单粒子效应对 SOI MOSFET 的协同作用,本研究在电磁脉冲效应的仿真模型基础上,加入单粒子效应模型。电磁脉冲模型设置与 2.1.1 节相同,重离子在 10 ps 时从 MOSFET 漏极垂直于 x 轴入射,入射深度为 $0.15 \mu\text{m}$,特征半径为 10 nm, LET 值分别为 $0 \text{ pC}/\mu\text{m}$ 、 $0.1 \text{ pC}/\mu\text{m}$ 和 $1 \text{ pC}/\mu\text{m}$ 。仿真结果显示了不同 LET 条件下的输出特性曲线,如图 14 所示。

随着 LET 值的增加,重离子入射轨迹中产生的电子-空穴对数量也随之增多,使雪崩击穿的阈值电压降低。重离子入射沿轨迹高效沉积能量,激发大量电子-空穴对,显著提升局部载流子浓度,为雪崩击穿提供必要条件。与此同时,EMP 迅速引发瞬态高电场,作用于受激载流子和 PN 结电场环境,将局部电场进一步强化。高电场不仅增强载流子的迁移速度和碰撞激发能力,还在局部区域形成电场放大效应,导致载流子密度快速积累。两者相互作用表现为:重离子产生的高密度载流子被 EMP 的瞬态电场所驱动和放大,使得局部条件迅速达到或超过临界点,从而提前触发雪崩现象。由于载流子和电场的相互增强,这种作用形成正反馈机制,大大缩短了击穿时间,提高了击穿速率,最终降低了雪崩阈值电压,极大加剧了器件的脆弱性。

综上所述,重离子入射降低了器件发生雪崩击穿的阈值电压,从而导致器件性能下降更严重。

3 结 论

本文探讨了电磁脉冲和单粒子效应对 SOI MOSFET 的电学特性的影响,研究分析了在不同电磁脉冲电压幅值下,SOI MOSFET 器件发生雪崩击穿前后的 PN 结的内建电场的电场强度、电流密度和晶格温度的变化。此外,研究了电磁脉冲作用下,栅极电压和沟道长度对雪崩击穿阈值电压的影响,并分析了重离子入射引起的单粒子效应对漏极电流的影响。初步探讨了电磁脉冲效应和单粒子效应的协同作用对器件电学特性的影响。结果表明,在电磁脉冲作用下,SOI MOSFET 可能会发生雪崩击穿,对器件电学特性产生影响。雪崩击穿电压随着栅极电压的增加而降低,同时也随着沟道长度的减小而降低。此外,重离子入射会在器件内部产生一个短暂的脉冲漏极电流,降低器件发生雪崩击穿的阈值电压。这些研究成果为构建电磁脉冲与粒子入射耦合的器件响应模型与仿真框架,以及开展后续实验验证与抗辐照设计提供了依据。

参考文献:

- [1] Doridant A, Jarrix S, Raoult J, et al. Impact of total ionizing dose on the electromagnetic susceptibility of a single bipolar transistor[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(4): 860-865.
- [2] Lin Jinfu, Liu Hongxia, Wang Shulong, et al. The MOSFET performance degrading induced by electric heating coupling under electromagnetic pulse environment[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuits (EDSSC). 2018: 1-2.

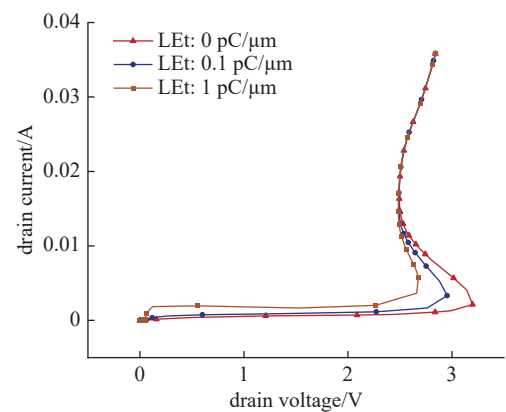


Fig. 14 Output characteristic curves at different LET values

图 14 不同 LET 值下的输出特性曲线

- [3] 范菊平, 游海龙, 贾新章. 漏极注入 HPM 诱发的 nMOSFET 热电损伤机理[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2013, 43(5): 724-728. (Fan Juping, You Hailong, Jia Xinzhang. Research on thermoelectric injury mechanism of nMOSFET due to high power microwave injected from drain[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 724-728)
- [4] 李万银, 张晨阳, 查继鹏, 等. 电磁脉冲作用下 NMOS 管的电磁敏感性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(12): 25-31. (Li Wanyin, Zhang Chenyang, Zha Jipeng, et al. Electromagnetic sensitivity study of NMOS tube under the action of electromagnetic pulse[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(12): 25-31)
- [5] Toyabe T, Yamaguchi K, Asai S, et al. A numerical model of avalanche breakdown in MOSFET's[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1978, 57(7): 825-832.
- [6] 张鸿, 郭红霞, 顾朝桥, 等. SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的空间辐照效应及机理[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(9): 884-896. (Zhang Hong, Guo Hongxia, Gu Zhaoqiao, et al. Radiation effects of SiC JBS diodes and SiC MOSFETs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(9): 884-896)
- [7] 高婷婷, 王玲, 苏凯, 等. 65 nm n 沟 MOSFET 的重离子辐照径迹效应研究[J]. 电子与封装, 2013, 13(5): 27-30. (Gao Tingting, Wang Ling, Su Kai, et al. Track effects study in the 65 nm n-MOSFET irradiated by heavy ions[J]. Electronics & Packaging, 2013, 13(5): 27-30)
- [8] Estep N A, Petrosky J C, McClory J W, et al. Electromagnetic interference and ionizing radiation effects on CMOS devices[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(6): 1495-1501.
- [9] Wu Wenbin, Zhou Haijing, Zhou Qianhong, et al. Response of NMOS to combined ionization and EMP environments[C]//Proceedings of 2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). 2023: 1-2.
- [10] Faynot O, Andrieu F, Weber O, et al. Planar Fully depleted SOI technology: a powerful architecture for the 20 nm node and beyond[C]//Proceedings of 2010 International Electron Devices Meeting. 2010: 3.2. 1-3.2. 4.
- [11] Li Ke, Hao Jianhong, Zhao Qiang, et al. Research on heavy ion irradiation effects on SOI SRAM[J]. Journal of Instrumentation, 2023, 18: P10004.
- [12] 孙毅. 基于 TLP 的光电器件和 CMOS 器件电磁脉冲效应的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022. (Sun Yi. TLP-based research on electromagnetic pulse effect of optoelectronic devices and CMOS devices[D]. Xi'an: Xidian University, 2022)
- [13] Chong Chen, Li Xing, Liu Hongxia, et al. Study on electromagnetic pulse damage of 22 nm FDSOI in radiation environment[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2024, 24(4): 646-655.
- [14] Azoui T, Tounsi P, Dorkel J M, et al. Estimation of power MOSFET junction temperature during avalanche mode: Experimental tests and modelling[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 59(9/11): 1750-1754.
- [15] 任兴荣, 柴常春, 马振洋, 等. 基极注入强电磁脉冲对双极晶体管的损伤效应和机理[J]. 物理学报, 2013, 62: 068501. (Ren Xingrong, Chai Changchun, Ma Zhenyang, et al. The damage effect and mechanism of bipolar transistors induced by injection of electromagnetic pulse from the base[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62: 068501)
- [16] 李嘉骏, 郝敏如. 应变 Si MOS 器件单粒子辐照效应[J/OL]. 电子科技, 2025: 1-6 (2025-01-03). <https://doi.org/10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2026.04.009>. (Li Jiajun, Hao Minru. Radiation effects of strained Si MOS devices[J/OL]. Electronic Science and Technology, 2025: 1-6 (2025-01-03). <https://doi.org/10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2026.04.009>.)
- [17] Atkinson N M. Single-event characterization of a 90-nm bulk CMOS digital cell library[D]. Nashville, TN, USA: Vanderbilt University, 2010.
- [18] Liu S, Boden M, Girdhar D A, et al. Single-event burnout and avalanche characteristics of power DMOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(6): 3379-3385.
- [19] Neamen D A. Semiconductor physics and devices[M]. New York: McGraw-Hill 2012: 182.