

激光模拟瞬态剂量率门锁效应电流特征机制研究

陈钱 马英起 陈睿 朱翔 李悦 韩建伟

Characteristics of latch-up current of dose rate effect by laser simulation

Chen Qian Ma Ying-Qi Chen Rui Zhu Xiang Li Yue Han Jian-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 124202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190237

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190237>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型模拟电路低剂量率辐照损伤增强效应的研究与评估

Estimation of low-dose-rate degradation on bipolar linear circuits using different accelerated evaluation methods

物理学报. 2018, 67(9): 096101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180027>

超深亚微米互补金属氧化物半导体器件的剂量率效应

Dose-rate sensitivity of deep sub-micro complementary metal oxide semiconductor process

物理学报. 2016, 65(7): 076102 <https://doi.org/10.7498/aps.65.076102>

总剂量辐照对热载流子效应的影响研究

Total dose dependence of hot carrier injection effect in the n-channel metal oxide semiconductor devices

物理学报. 2016, 65(24): 246101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.246101>

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

铁电存储器60Co γ 射线及电子总剂量效应研究

Total ionizing dose effect of ferroelectric random access memory under Co-60 gamma rays and electrons

物理学报. 2018, 67(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180829>

总剂量效应致0.13 μ m部分耗尽绝缘体上硅N型金属氧化物半导体场效应晶体管热载流子增强效应

Enhanced channel hot carrier effect of 0.13 μ m silicon-on-insulator N metal-oxide-semiconductor field-effect transistor induced by total ionizing dose effect

物理学报. 2016, 65(9): 096104 <https://doi.org/10.7498/aps.65.096104>

激光模拟瞬态剂量率闩锁效应电流特征机制研究*

陈钱¹⁾²⁾ 马英起¹⁾ 陈睿¹⁾ 朱翔¹⁾ 李悦¹⁾ 韩建伟^{1)3)†}

1) (中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2019年2月23日收到; 2019年3月15日收到修改稿)

互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺集成电路由于寄生的PNPN结构使其可能会受到闩锁效应的影响, 在全局辐照下由瞬态剂量率效应诱发的闩锁具有独特的性能. 本文利用激光模拟瞬态剂量率效应装置, 针对体硅 CMOS 工艺解串器 FIN1218MTDX, 进行瞬态剂量率闩锁效应的实验研究, 探究其闩锁阈值和闩锁电流特征. 实验获得了该器件在 3.3 V 工作电压时的瞬态剂量率闩锁阈值光功率密度为 $(8.5 \pm 1.2) \times 10^4 \text{ W/cm}^2$; 并发现在工作电压 3.3 和 3.6 V, 光功率密度 1.9×10^6 — $1.6 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 的辐照下, 闩锁电流发生了明显的降低, 即出现了闩锁电流的“窗口现象”. 基于闩锁等效电路模型, 利用多路径闩锁机制, 构建 HSPICE 模型对激光实验暴露出的瞬态剂量率闩锁特征进行了机理分析. 结果表明: 激光实验中闩锁电流波动是由于多路径闩锁机制所致, 其会在特定电路结构中促使器件的闩锁路径发生切换, 从而诱发这一现象.

关键词: 瞬态剂量率效应, 闩锁效应, 脉冲激光**PACS:** 42.62.-b, 61.80.-x, 85.30.De**DOI:** 10.7498/aps.68.20190237

1 引言

原子核在发生衰变后产生的新核往往处于高能级, 要向低能级跃迁就会辐射出伽马射线, 一般原子核衰变和核反应均可产生伽马射线. 伽马射线带有高能量且有着极强的高穿透性. 1958年, Bell 实验室的工程师 Roger 首次在地面实验中观测到二极管的瞬态伽马辐射响应^[1], 并于 1963 年与 Wirth 共同提出瞬态伽马辐射会在半导体器件中电离产生光电流, 进而影响器件^[2]. 体硅工艺半导体器件和电路在高剂量率的瞬态伽马射线辐射环境中工作时, 会受到干扰甚至遭到破坏性损坏, 这种影响被称为瞬态剂量率效应, 为了研究器件在

伽马辐射环境下的可靠性问题, 研究人员开展了大量的研究工作. 瞬态剂量率的实验研究主要依赖于电子直线加速器和闪光 X 射线脉冲源等装置来开展^[3], 国内研究者主要利用“强光一号”闪光加速器开展相关的研究^[4,5]. 自 20 世纪 90 年代开始, 利用脉冲激光模拟瞬态剂量率效应引起了研究人员的广泛关注. 高剂量率的伽马射线作用于半导体器件, 由于伽马射线光子能量高, 是通过康普顿效应引发电离, 从而产生大量电子-空穴对, 进而形成光电流; 而脉冲激光与半导体材料相互作用, 由于激光光子能量相对较低, 是通过光电效应产生电子-空穴对形成光电流, 两者在产生机理上存在一点差异, 但最终都是通过产生电子-空穴对来形成光电流. 通过在单管产生相同电荷量的光电流分别所需

* 中国科学院科技创新重点部署项目 (批准号: KGFZD-135-16-005) 和中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (批准号: XDA15015500) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hanjw@nssc.ac.cn

要的伽马射线环境和激光辐照环境, 来定量获得两者的等效关系, 同时为了将两者更好地对应, 选择激光的光功率密度为描述激光辐照环境的物理量. 这就是脉冲激光模拟瞬态剂量率效应的基础^[6,7]. 激光模拟瞬态剂量率效应已经得到了实验与理论上的论证^[8,9]. 同时激光模拟装置具有实验方便安全、信噪比高、能量和光斑大小连续可调等优点^[10], 也使得其与电子直线加速器以及闪光 X 射线脉冲源等不同, 能够用于精细实验研究瞬态剂量率效应的特征、规律与机制. 由于伽马射线具有很强的穿透性, 其在材料中的能量损失分布近似是均匀的, 因而在考虑使用脉冲激光也需要尽量保证激光束在材料中沉积均匀的能量. 有研究指出, 波长为 1.06 μm 的激光束可在硅中 700 μm 的范围内沉积近似均匀的能量^[11], 这个深度范围几乎可以满足大部分硅器件的实验需求. 另外还使用脉宽为 10 和 35 ns 的激光器开展了瞬态光电流测量实验, 实验结果表明, 激光器的脉宽越大产生的瞬态光电流的脉宽也会越大. 在激光器脉宽最终选择上, 参考了“强光一号”闪光加速器的脉冲宽度 20 ns, 最终选择波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns 的激光器作为模拟源.

体硅工艺互补金属氧化物半导体 (CMOS) 电路中不可避免地会形成 PNP 寄生结构, 辐照产生的光电流有可能导通这些寄生 PNP 结构诱发闩锁. 闩锁效应通常表现为大电流, 会对器件的正常工作造成极大的影响, 一旦发生, 通常只有通过断电-重上电操作才能解除器件的闩锁状态. 若不及时发现并采取措施, 这种过电流状态产生的热量会损坏器件, 严重时会造成器件烧毁. 相关研究发现, 对于大规模集成电路, 存在分布式效应, 即衬底接触/扩展电阻耦合所有并联电流路径, 使得在管芯的一个区域中流动的电流可以在另外独立的区域中触发闩锁路径^[12], 这也是瞬态剂量率闩锁效应的复杂独特之处. 研究人员在 CMOS 集成电路的瞬态剂量率闩锁测试中, 发现某些器件存在闩锁窗口现象, 在低剂量率时器件发生闩锁, 在中等剂量率时器件闩锁消失或减缓, 高剂量率时器件再次出现闩锁或增强. 实验还发现一些器件具有非常窄剂量的闭锁窗口, 且闩锁窗口的闩锁电流与永久闩锁的闩锁电流有所不同^[13,14]. 瞬态剂量率导致的闩锁窗口效应给对器件闩锁评估带来极大的困扰, 即闩锁阈值精准判定存在困难. 国内外研究人员对

此闩锁窗口现象的机制从理论上提出了一些分析, 如瞬态光电流在电路中产生了电压降, 导致器件闩锁的维持电压不足, 使其出现闩锁窗口; 器件中有多个闩锁路径, 在辐照下, 多个闩锁路径被触发, 相互竞争电流, 由于各路径维持电流无法被满足, 使器件局部出现退锁等可能存在的机制^[15-19]. 但由于相关物理机理较为复杂, 目前还没有能给出一个定论. 本文通过实验和仿真的相关研究, 希望能对此问题提供一些参考. 关于瞬态剂量率闩锁效应和单粒子闩锁效应的对比: 瞬态剂量率闩锁效应是由于伽马射线通过康普顿效应产生瞬态光电流导致器件中存在的 PNP 结构被导通从而产生闩锁, 由于瞬态光电流的全局性, 以及寄生的 PNP 结构分布较广, 会在器件中出现多处 PNP 结构被导通的情况出现. 单粒子闩锁效应则是由于单个重离子入射到器件中通过电离产生电子-空穴对被收集从而诱发某处 PNP 结构被导通. 闩锁机制是相同的, 但由于瞬态剂量率效应是一个更大范围的全局性效应, 会在器件中表现出更复杂的现象.

本文利用脉冲激光源模拟瞬态剂量率闩锁效应, 选择一款 0.18 μm 体硅 CMOS 工艺解串器作为研究对象, 利用激光能量精细可调的优势, 获得该器件的闩锁阈值以及其闩锁电流变化特征的实验数据, 通过对闩锁的等效电路构建仿真模型, 利用 HSPICE 进行电路级仿真, 探究瞬态剂量率多路径闩锁特征和物理机制.

2 激光模拟实验

2.1 实验对象

实验对象为一款 0.18 μm 的体硅 CMOS 工艺解串器, 实验中器件的正常工作电压为 3.3 V, 正常工作电流约为 1 mA. 激光实验前, 需要对实验对象进行背部开封处理, 使其背部衬底完全暴露出来.

2.2 实验装置

中国科学院国家空间科学中心激光模拟瞬态剂量率辐照装置如图 1 所示, 主要由激光器、光路系统、载物系统、检测系统和计算机组成. 脉冲激光器作为触发装置, 发射脉冲激光; 光路系统包括快门、光学衰减部分、光斑测量部件和能量测量部件, 负责调控和测量脉冲激光的光参量; 载物系统

包括三维移动台及其控制装置,起到固定实验样品和调节辐照区域的作用;检测系统包括直流电源和示波器等,主要功能是对实验样品供电和对实验结果进行检测;计算机作为控制终端协调各分系统.装置主要技术指标列于表 1.

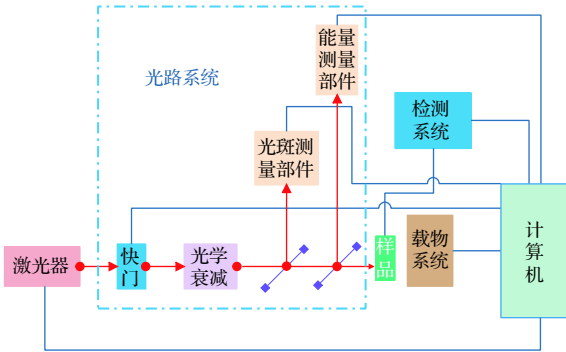


图 1 激光实验系统示意图
Fig. 1. Schematic diagram of the laser test system.

表 1 实验装置技术指标

Table 1. Test equipment technical parameters.

装置名称	激光波长	脉冲宽度	最大光斑尺寸	最大能量	重复频率
激光瞬态剂量率辐照装置	1064 nm	10 ns	1 cm	1 J	1—10 Hz

2.3 实验方案

将样品固定于三维移动台上,由直流电源对其供电,脉冲激光垂直器件背部衬底表面进行全芯片辐照,通过光路系统对激光能量进行调控和记录来模拟不同剂量率的辐照环境. 闩锁效应判定: 实验器件供电电流在短时间内突然增大至正常工作电流的 1.5 倍以上,器件功能失效并且需要将电源断电、重新上电才能恢复正常时,则判定发生闩锁. 实验过程中使用直流电源对器件工作电流进行监测. 一旦出现闩锁,立即断开电源从而保护电路不被烧毁. 闩锁阈值确定: 辐照实验中,若不发生闩锁,则通过光路系统逐步提高光功率密度,重复进行实验直至闩锁;当发生闩锁时,则逐步降低光功率密度重复实验,直至器件不发生闩锁;最后记录下器件发生闩锁的最小光功率密度和器件不发生闩锁的最大光功率密度,即为该器件的闩锁阈值.

闩锁电流实验是为了探究器件是否存在闩锁窗口和闩锁电流的变化及其原因. 在获得闩锁阈值的实验基础上,增大激光的光功率密度,分别在不同偏压条件下进行实验,记录不同光功率密度下器

件发生闩锁时的闩锁电流情况.

2.4 闩锁阈值结果

实验获得了该器件的激光模拟瞬态剂量率闩锁阈值为 $(8.5 \pm 1.2) \times 10^4 \text{ W/cm}^2$.

2.5 闩锁电流特征结果

图 2 为该器件在不同偏置电压和光功率密度下的闩锁电流情况. 在同一光功率密度下,器件在偏置电压 2.7 V 时不出现闩锁,在偏置电压 2.8 V 时出现闩锁,闩锁电流随偏置电压的进一步增大而增大. 偏置电压 2.7 V 时,器件不发生闩锁,增大光功率密度对器件无任何影响. 偏置电压 2.8, 2.9, 3.0 V 时,器件发生闩锁,增大光功率密度对于器件闩锁电流亦无影响. 偏置电压 3.3 和 3.6 V 时,光功率密度在 1.9×10^6 — $1.6 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 之间时,与更低和更高光功率密度的辐照相比,器件闩锁电流反而出现了下降,即呈现出了剂量率效应诱发的闩锁“窗口”现象.

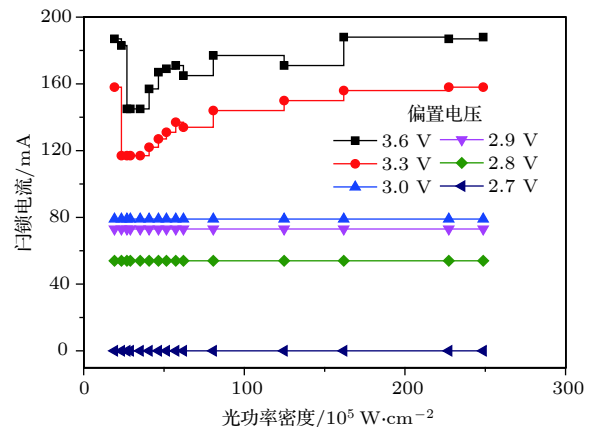


图 2 闩锁电流变化图
Fig. 2. Latch current change diagram.

3 瞬态剂量率多路径闩锁机制分析

图 3 所示为 CMOS 集成电路中的衬底和阱中天然存在的寄生 PNP 结构的闩锁示意图. 如图 3 所示,当器件受到电流扰动 I_g , 会使得 Q1 处于正偏状态时,由等效电路可知:

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1},$$

$$I_{C2} = \beta_2 (I_{C1} - I_{R_s}) = \beta_2 [(I_g - I_{R_w}) \beta_1 - I_{R_s}].$$

由于 I_{R_s} 和 I_{R_w} 较小 (I_{R_s} 和 I_{R_w} 分别表示流经 R_s 和 R_w 的电流),可以忽略. 此时 $I_{C2} \approx \beta_1 \beta_2 I_g$ (其中

β_1, β_2 分别为 Q1, Q2 的增益系数), 当 $\beta_1 \times \beta_2 > 1$, 形成正反馈, 从而产生大电流导致闩锁. 基于闩锁等效电路模型, 可以将闩锁过程分为触发过程和维持过程. 触发过程: 当瞬态光电流 I_g 和器件的 β_1, β_2 能同时满足上述闩锁过程的触发条件, 使得该路径被触发, 形成正反馈. 维持过程: 器件的外部供电电压 V_{dd} 大于器件闩锁维持电压时, 正反馈产生大电流能够维持, 使整个回路中出现持续的大电流状态. 触发电流仅起到最初触发导通作用, 并不会影响最终电路的闩锁电流. 将这样的 PNP 结构称为闩锁路径, 刚好能够满足条件的触发电流被称为阈值触发电流.

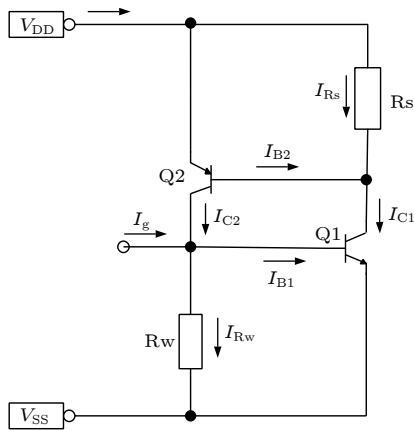


图 3 PNP 结构闩锁示意图
Fig. 3. Latch diagram of PNP structure.

瞬态剂量率的多路径闩锁机制: 集成电路中会存在多条不同的闩锁路径, 它们有着不同的阈值触发电流、闩锁电流和维持电压. 电路遭受全芯片辐照时, 会通过光电效应产生瞬态电流, 此时光功率密度越大, 产生的瞬态电流也越大. 当产生的瞬态电流导致电路最敏感的闩锁路径 (即最容易被触发且能维持闩锁的路径) 发生闩锁时, 此时瞬态电流即为阈值触发电流, 产生该瞬态电流所对应的光功率密度, 称之为电路的闩锁阈值. 在闩锁阈值之上继续增大光功率密度, 产生瞬态电流会更大, 其会触发电路中其他闩锁路径, 当更多的闩锁路径被触发后, 出现闩锁路径的切换从而导致闩锁电流发生变化, 甚至于出现闩锁窗口现象.

闩锁阈值结果中器件的闩锁阈值为 $(8.5 \pm 1.2) \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 此时在器件中产生瞬态光电流使得器件中最敏感的闩锁路径被触发, 同时此时的外界偏置电压足以维持该路径发生闩锁, 从而在电

路中产生持续的大电流状态. 激光实验的闩锁电流特征结果中, 在同一光功率密度下, 器件在偏置电压为 2.7 V 时不发生闩锁, 此时闩锁路径被触发, 但可能由于偏置电压不足以维持闩锁; 偏置电压大于等于 2.8 V 的几组实验中均出现闩锁, 且闩锁电流随电压增大而增大, 表明 2.8 V 是该路径维持闩锁的维持电压, 闩锁电流与偏置电压正相关. 偏置电压为 3.3 和 3.6 V 时, 在光功率密度 $1.9 \times 10^6 - 1.6 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 之间, 出现了闩锁电流的下降, 推测这是由于有额外的闩锁路径在此光功率密度区间触发闩锁, 导致初始闩锁路径退出闩锁; 当光功率密度大于 $1.6 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 产生的瞬态光电流在电路中产生的电压降, 使得额外闩锁路径退出闩锁, 初始闩锁路径再次发生闩锁, 闩锁电流又恢复至最初状态. 在偏置电压 2.8, 2.9 和 3.0 V 时, 闩锁电流不随光功率密度的变化而发生变化, 能在该光功率密度区间被触发的闩锁路径在较低的偏置电压下无法被维持, 无法对初始的闩锁路径造成影响.

4 HSPICE 仿真研究

针对上述分析和推测的瞬态剂量率的多路径闩锁机制, 依据闩锁等效电路模型构建 SPICE 模型, 对多路径闩锁机制进行 HSPICE 电路仿真探究. 基于等效电路模型分析, 若电路结构为多条路径相互串联, 则该电路发生闩锁的前提是, 串联着的多条闩锁路径同时被触发导通, 同时电源电压足以维持每条路径发生闩锁, 整个电路才能出现闩锁大电流状态, 因此多个串联的 PNP 结构可以等效为一个整体的 PNP 结构, 同时闩锁电流为各 PNP 结构的闩锁电流之和, 不会随着光功率密度的变化而发生电流变化. 若多条闩锁路径相互并联, 则分为两种情况: 第一, 多条闩锁路径相同, 则相同的闩锁路径会有着相同的路径参数 (阈值触发电流、闩锁电流和维持电压), 在瞬态光电流影响下会同时发生闩锁, 同样不会出现闩锁电流的变化; 第二, 多条闩锁路径互不相同, 此时每条路径有着不同的路径参数, 由于瞬态剂量率的全局光电流的变化, 会出现不同路径触发导通并相互影响, 最终出现路径之间的变换, 从而会出现闩锁电流的“窗口现象”. 因而可以初步判定各路径之间应该是并

联状态,且各路径之间有所不同,即存在不同路径有不同的路径参数.选择不同的路径参数的两条路径相互并联(路径参数如表2所列),建立如图4所示的多路径并联的仿真模型进行仿真研究,同时在每条路径中注入相同大小的触发电流来模拟瞬态剂量率的多路径闩锁机制,从而探究多路径闩锁机制对闩锁电流的影响.

表2 路径参数
Table 2. Path parameters.

路径1	图4右侧路径	路径2	图4左侧路径
阈值触发电流	14 mA	阈值触发电流	20 mA
维持电压	3.7 V	维持电压	5 V
6 V 闩锁电流	46 mA	6 V 闩锁电流	49 mA
5 V 闩锁电流	36 mA	5 V 闩锁电流	38 mA

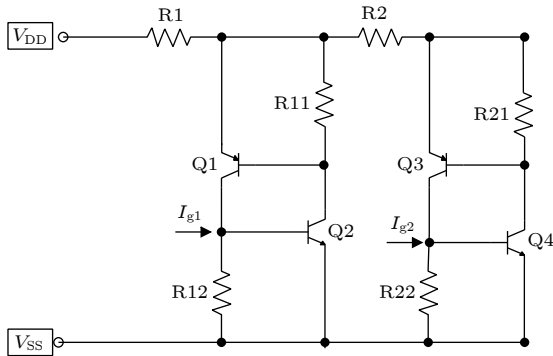


图4 多路径闩锁 SPICE 仿真模型
Fig. 4. Multi-path latching SPICE simulation model.

分别获得电源电压为 6 和 5 V 时的仿真结果,如图5和图6所示.

结果发现在电源电压为 6 V 时,触发电流 19—21 mA 之间该模型出现了闩锁电流的窗口现象.

5 仿真结果分析

将仿真结果进行整理汇总,列于表3.

对仿真过程中各路径电流情况进行分析,偏置电压 6 V 时闩锁电流的窗口效应是由于出现了闩锁路径的切换所致.触发电流 14—19 mA 之间,路径 1 触发并维持闩锁,整个电路中电流 46 mA,即为路径 1 在 6 V 时的闩锁电流;当触发电流为 20 mA 时,路径 1 和 2 均被触发,由于分布电阻 R2 的存在,电流流经路径 2,路径 1 不发生闩锁,此时电流为 38 mA,相当于路径 2 在 5 V 时的闩锁电流(电

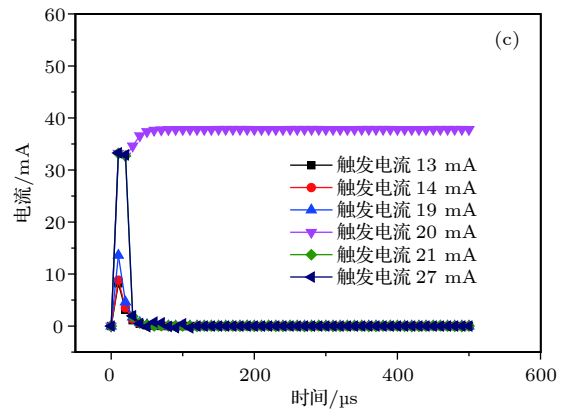
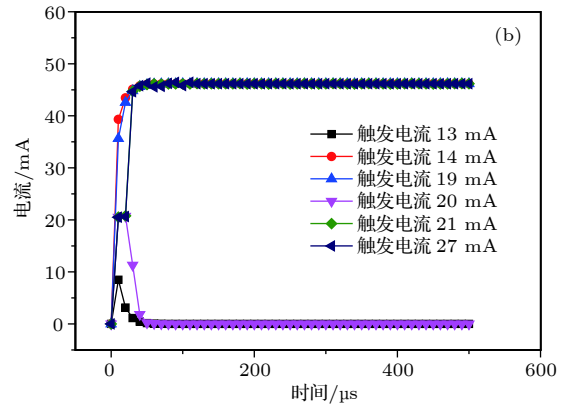
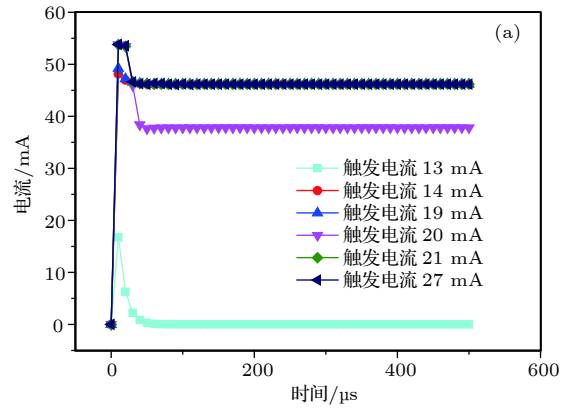


图5 6 V 时各路径电流情况 (a) 整个电路; (b) 路径 1; (c) 路径 2

Fig. 5. Each path current at 6 V: (a) Whole entire circuit; (b) path 1; (c) path 2.

路中分布电阻 R1 有 1 V 的分压);当触发电流大于 20 mA 时,路径 1 和 2 均被触发,由于分布电阻 R1 的分压大于 1 V,路径 2 的电压小于维持电压 5 V,路径 2 无法被维持,最终路径 1 发生闩锁,闩锁电流再次变为 46 mA.而偏置电压 5 V 时,由于路径 2 的闩锁维持电压不能被满足,路径 2 始终不发生闩锁,路径 1 在触发电流大于 14 mA 时发生闩锁且整个电路闩锁电流不发生变化.

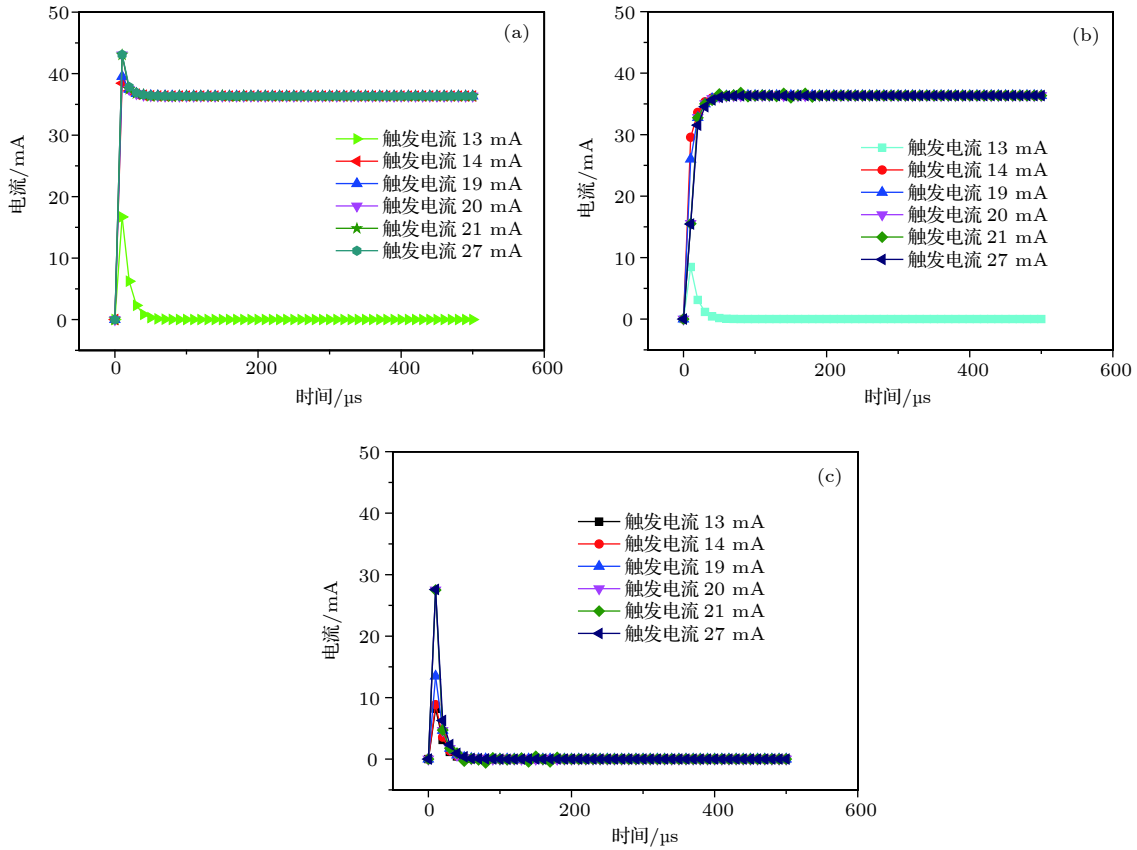


图 6 5 V 时各路径电流情况 (a) 整个电路; (b) 路径 1; (c) 路径 2
 Fig. 6. Each path current at 5 V: (a) Whole entire circuit; (b) path 1; (c) path 2.

表 3 仿真结果表
 Table 3. Simulation results table.

触发电流/mA	偏置电压5 V			偏置电压6 V		
	闩锁情况	闩锁路径	闩锁电流/ mA	闩锁情况	闩锁路径	闩锁电流/ mA
13	不闩锁	—	—	不闩锁	—	—
14	闩锁	路径1	36	闩锁	路径1	46
19	闩锁	路径1	36	闩锁	路径1	46
20	闩锁	路径1	36	闩锁	路径2	38
21	闩锁	路径1	36	闩锁	路径1	46
27	闩锁	路径1	36	闩锁	路径1	46

6 结 论

针对 0.18 μm 的体硅 CMOS 工艺解串器开展了激光模拟瞬态剂量率效应实验, 结果表明: 1) 其瞬态剂量率闩锁效应的激光光功率密度阈值为 $(8.5 \pm 1.2) \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 以及其闩锁维持电压为 2.8 V; 2) 实验发现了闩锁电流的窗口现象.

依据闩锁等效电路模型构建 SPICE 模型进行电路级仿真, 仿真结果表明: 1) 闩锁电流和闩锁维持电压以及闩锁阈值触发电流都与闩锁路径本身

电路结构有关; 2) 闩锁电流的窗口现象是多路径闩锁机制中闩锁路径发生切换所致, 由于各条闩锁路径的闩锁电流不同, 当发生闩锁路径切换时, 就会出现闩锁电流的窗口现象; 3) 闩锁路径切换的根本原因是各闩锁路径的维持电压不同, 电路中的分布电阻在瞬态光电流下的分压使得部分发生闩锁的路径出现维持电压不足, 无法维持闩锁.

研究表明: 脉冲激光可以有效模拟瞬态剂量率闩锁效应, 且具有实验方便安全、信噪比高、能量和光斑大小连续可调等优点.

参考文献

- [1] Marshall R W 1963 *Tenth Annual East Coast Conference on Aerospace and Navigational Electronics* Baltimore, USA, October 21–23, 1963 p1411
- [2] Wirth J L, Rogers S C 1964 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **11** 24
- [3] Ellis T D, Kim Y D 1978 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **25** 1489
- [4] Wang G Z, Lin D S, Qi C, Bai X Y, Yang S C, Li R B, Ma Q, Jin X M, Liu Y 2014 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **48** 2165 (in Chinese) [王桂珍, 林东生, 齐超, 白小燕, 杨善潮, 李瑞宾, 马强, 金晓明, 刘岩 2014 *原子能科学技术* **48** 2165]
- [5] Wang G Z, Lin D S, Qi C, Bai X Y, Yang S C, Li R B, Ma Q, Jin X M, Liu Y 2014 *Microelectronics* **44** 510 (in Chinese) [王桂珍, 林东生, 齐超, 白小燕, 杨善潮, 李瑞宾, 马强, 金晓明, 刘岩 2014 *微电子学* **44** 510]
- [6] Liang K, Sun P, Li M, Dai G, Li S, Xie L 2017 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **51** 187 (in Chinese) [梁莹, 孙鹏, 李沫, 代刚, 李顺, 解磊 2017 *原子能科学技术* **51** 187]
- [7] Yue L, Zhang Z G, He Y J, Hao M M, Lei Z F, Liu Y 2017 *J. THZ Sci. Electron. Inform. Technol.* **15** 139 (in Chinese) [岳龙, 张战刚, 何玉娟, 郝明明, 雷志峰, 刘远 2017 *太赫兹科学与电子信息学报* **15** 139]
- [8] NikZorov A Y, Skorobogatov P K 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 3115
- [9] Skorobogatov P K, Nikiforov A Y, Demidov A A 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2659
- [10] Raburn W D, Buchner S P, Kang K, Singh R, Sayers S 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1512
- [11] Johnston A H 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1694
- [12] Ochoa A, Dressendorfer P V 1981 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **28** 4292
- [13] Azarewicz J L, Hardwick W H 1982 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **29** 1803
- [14] Coppage F N, Allen D J, Dressendorfer P V, Ochoa A, Rauchfuss J, Wrobel T F 1983 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 4122
- [15] Johnston A H, Baze M P 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 4017
- [16] Plaag R E, Baze M P, Johnston A H 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1563
- [17] Johnston A H, Plaag R E, Baze M P 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 2229
- [18] Xu X G, Yang H M, Hu J D 2004 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **24** 674 (in Chinese) [许献国, 杨怀民, 胡健栋 2004 *核电子学与探测技术* **24** 674]
- [19] Xu X G, Xu X, Hu J D, Zhao R Q 2005 *High Pow. Las. Part. Beam.* **17** 633 (in Chinese) [许献国, 徐曦, 胡健栋, 赵汝清 2005 *强激光与粒子束* **17** 633]

Characteristics of latch-up current of dose rate effect by laser simulation*

Chen Qian¹⁾²⁾ Ma Ying-Qi¹⁾ Chen Rui¹⁾ Zhu Xiang¹⁾
Li Yue¹⁾ Han Jian-Wei^{1)3)†}

1) (*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 23 February 2019; revised manuscript received 15 March 2019)

Abstract

Due to the parasitic PNP structure, the complementary metal oxide semiconductor (CMOS) integrated circuit may be affected by the latch-up effect, and the latching induced by the transient high dose rate Gamma ray has unique characteristics. In order to explore the complex physical mechanism of the latch-up by transient dose rate effect, in this paper we select the pulsed laser with 1064 nm wavelength as an radiation source to simulate the gamma ray radiation environment, select bulk silicon CMOS deserializer FIN1218MTDX, and use transient dose rate effect laser simulation experiments to explore its latch-up threshold and latch-up current characteristics. The test obtains that the dose rate latch-up threshold optical power density of the device at 3.3 V operating voltage is $(8.5 \pm 1.2) \times 10^4$ W/cm², a latch-up voltage of the device is 2.8 V, only the device latches when the supply voltage is greater than 2.8 V. At the same time, it is found that under the working voltages of 3.3 V and 3.6 V and the optical power density between 1.9×10^6 W/cm² and 1.6×10^7 W/cm², the latch-up current significantly decreases, the latch-up current “window phenomenon” appears. Based on the equivalent circuit model, the multi-path latching mechanism is used to construct the HSPICE model. The mechanism of the transient dose rate latching characteristics exposed by the laser test is analyzed by circuit-level simulation. The results show that the latch-up current and the latch-up voltage are related to its own latch structure when the device is latched. The phenomenon of latch-up current window in laser test is due to the multi-path latch mechanism, which will be in the specific circuit structure, and causing the multiple latch-up paths of the device to be switched. The reason of the latch-up path is switched is that the different holding voltages and trigger conditions between the latch-up paths, distributed resistance in the circuit reduces the voltage of latch-up path, so that the holding voltage of the latch-up path cannot be satisfied and the latch-up path is released. At the same time the other latch-up path is latched.

Keywords: dose rate effect, latch-up effect, pulsed laser

PACS: 42.62.-b, 61.80.-x, 85.30.De

DOI: [10.7498/aps.68.20190237](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190237)

* Project supported by Key Project of Science and Technology Innovation Foundation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KGFZD-135-16-005) and the Space Science Strategic Pilot Technology Special Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA15015500).

† Corresponding author. E-mail: hanjw@nssc.ac.cn