

文章编号: 2095-4980(2020)06-1157-05

瞬时剂量率效应激光模拟测试技术

倪涛^{1,3}, 杜川华², 曾传滨^{*1,3}, 高林春^{1,3}, 王娟娟^{1,3}, 高见头^{1,3}, 赵发展^{1,3}, 罗家俊^{1,3}

(1.中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2.中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;
3.中国科学院硅器件技术重点实验室, 北京 100029)

摘要: 瞬时剂量率辐射效应模拟测试存在着试验资源有限、环境电磁干扰强、重复性不高等不利因素。本文开发了瞬时剂量率效应脉冲激光模拟测试技术, 以 1 064 nm 激光构建完整精细的剂量率效应地面模拟测试系统。利用此系统开展了不同工艺节点、不同沟道类型、不同衬底形式的瞬时剂量率效应实验研究。仿真实验结果表明相同条件下, 体硅器件光电流比绝缘衬底上的硅(SOI)器件大 10 倍以上, 光电流受源漏电压影响也大于 SOI 器件。

关键词: 剂量率效应; 激光模拟; 体硅器件; SOI 器件

中图分类号: TN60

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019319

Testing technology of laser simulation of transient dose rate effects

NI Tao^{1,3}, DU Chuanhua², ZENG Chuanbin^{*1,3}, GAO Linchun^{1,3}, WANG Juanjuan^{1,3}, GAO Jiantou^{1,3},
ZHAO Fazhan^{1,3}, LUO Jiajun^{1,3}

(1.Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China);

3. Key Laboratory of Science and Technology on Silicon Device, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: There are some disadvantages in the simulation test of transient dose rate radiation effect, such as limited test resources, strong environmental electromagnetic interference and low repeatability. There are some disadvantages, such as limited test resources, strong electromagnetic interference and low repeatability. In this paper, the pulsed laser simulation test technology of transient dose rate effect is developed, and a complete and fine ground test system is constructed with 1 064 nm laser. The transient dose rate effects of different process nodes, different channel types and different substrates are experimentally studied by using this system. The experimental results show that under the same conditions, the photocurrent of bulk silicon devices is more than 10 times larger than that of Silicon-On-Insulator(SOI), and the photocurrent is more affected by the source-drain voltage than SOI.

Keywords: dose rate effects; laser simulation; bulk silicon devices; SOI devices

剂量率辐射效应是指瞬时高能射线入射至器件或电路, 在其内部电离产生大量电子空穴对的现象, 电荷最终被收集形成光电流, 进而影响器件和电路的工作状态甚至烧毁^[1]。瞬时高能辐射可在数十 ns 时间内释放出大量的 γ 射线, 由于 γ 射线的穿透力极强, 能穿透各种屏蔽系统诱发设备内的电子器件发生瞬时剂量率效应, 导致电子设备失效, 并且由于大部分未加固器件存在门锁问题, 一旦发生剂量率诱发门锁效应, 将导致电源电压被箝制在远低于工作电压的电位甚至发生器件烧毁, 导致电子系统无法正常工作甚至损坏。用于 γ 射线瞬时辐射实验的模拟源需要满足瞬时高能辐射的环境要求, 主要模拟参数包括能量、脉冲宽度和剂量率^[2]。目前国内常用的测试技术主要包括工作于光子模式的闪光 X 射线机(FXR)和工作于电子模式的直线加速器(LINAC)。其中, 国际上美国生存能力和脆弱性集成中心、波音公司、霍尼韦尔公司等均有类似设备。国内在辐射模拟源领域也有较成熟的技术积累, 能够构建指标全面、系统稳定的电子直线加速器, 是目前剂量率效应研究的核心设

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-10-14

作者简介: 倪涛(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为超快脉冲发生与测试技术、高可靠半导体测试设备与测试技术。email: nitao@ime.ac.cn

*通信作者: 曾传滨 email: chbzheng@ime.ac.cn

备^[3-4]。由于 γ 射线脉冲设备存在强烈的辐射环境和电磁干扰环境，不能构建精细研究用的测试系统；且每次测试后需要进行设备维护，测试机时有限，无法完全满足抗辐照加固设计预评估和失效分析工作需求^[4-5]。本文用 1 064 nm 激光源开展瞬时剂量率效应模拟测试，对不同工艺节点、不同沟道类型、不同衬底形式的器件进行瞬时剂量率效应研究，分析光电流趋势，指导了器件模型建立和电路仿真工作，为器件抗瞬时剂量率加固设计提供精细化研究手段。

1 激光模拟剂量率效应测试系统

1.1 激光模拟剂量率效应原理

剂量率辐射效应机理是 γ 射线穿透屏蔽层作用于半导体材料并产生能量沉积，从而激发电子-空穴对，在电场作用下电子-空穴对发生分离和迁移，形成瞬态脉冲电流，影响器件正常运行状态，严重时可能造成翻转、门锁甚至烧毁。1 064 nm 激光同样具备一定的穿透能力，当入射激光光子能量大于半导体材料带隙能量时，器件内部发生光电效应，价带电子激发到导带进而形成电子-空穴对，在耗尽区电场作用下被器件收集形成光电流^[5-6]。 γ 射线与激光具有类似的物理过程，都是通过自身的强穿透能力，激发半导体材料电离产生电子-空穴对，最终形成光电流，因此激光模拟测试技术可以作为瞬态剂量率效应的有效研究手段。

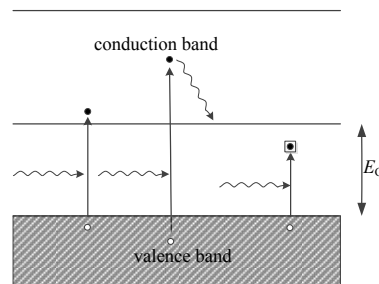


Fig.1 Diagram of photon energy absorption by semiconductor materials
图 1 半导体材料吸收光子能量示意图

光子激发半导体材料产生电子-空穴对原理如图 1 所示，半导体材料吸收一个光子，光子的能量用来将电子从价带提升至导带。如果光子的能量超过带隙 E_G ，电子将被提升到导带的一个空的状态上，在价带中留下一个空穴。不同半导体材料的带隙 E_G 不同，常温下硅材料带隙能量为 1.12 eV^[7]。光子能量计算公式为 $E=hc/\lambda$ ，其中 E 是光子能量， h 是普朗克常量， ν 是频率， c 是光速， λ 是波长。计算可得 1 064 nm 激光光子能量为 1.17 eV，略大于硅材料带隙 1.12 eV，能够激发硅基半导体产生电子-空穴对，且具有小吸收系数和强穿透能力的特点，因此 1 064 nm 激光是硅基半导体器件瞬态剂量率效应产生过剩载流子的最佳模拟源。

1.2 激光模拟剂量率测试系统

在激光脉冲模拟瞬时剂量率效应测试技术方面，美国圣地亚实验室在 1965 年建设了一套 1 064 nm/50 ns 激光系统用于模拟剂量率效应，俄罗斯特殊电子系统实验室在 1996 年也建设了一套基于 1 064 nm/10 ns 激光器的剂量率效应测试系统^[8-12]。国内各抗辐照研究单位近些年也开始关注并开展激光模拟剂量率测试技术研究工作，中科院微电子所利用 Nd:YAG 激光器成功构建了 1 064 nm/12 ns 瞬态剂量率测试系统，具体系统构架如图 2 所示。

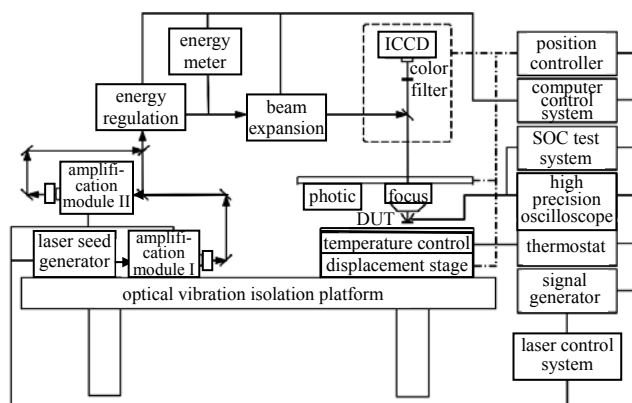


Fig.2 Architecture of laser simulation test system of dose rate effect
图 2 激光剂量率效应测试系统构架图

测试系统采用 Nd:YAG 固体功率激光器，筛选 1 064 nm 波长激光作为激励源，激光通过能量调节系统获得最终所需能量，用能量计进行实时监测；调节好能量的激光用二元光学器件对高斯分布激光进行扩束整形，获得所需光斑尺寸均匀光场；激光进一步通过透光孔或者聚焦系统作用在被测器件上，利用 1 064 nm 波长激光在硅材料的高穿透能力，替代 γ 射线脉冲对器件进行瞬时剂量率效应测试，器件瞬时电流值变化由高精度示波器测试；整机由电脑控制软件程控，测试定位均由位移台实现；为了提高测试稳定性，光学部件均放置在隔振台上。

除超快功率激光系统设计外，该平台另一难点在高速小信号采集技术，虽然瞬态剂量率效应被测电路电流可能达数十安培，但分布到单个标准 MOS 晶体管瞬时电流仅为十 nA 到百 μ A 级别，系统采用了高精度示波器、抗干扰射频测试及电磁屏蔽技术、增加信噪比等方法协同提升高速微弱脉冲信号测试能力，最终实现了 μ A 级瞬时电流测试。激光模拟剂量率测试系统参数如表 1 所示。

表 1 激光模拟剂量率测试系统参数

Table1 Parameters of laser simulation test system of dose rate effect

laser wavelength/nm	pulse width/ns	MAX energy/mJ	MAX facula/mm	repetition rate/Hz
1 064	12	200	40	1-20

2 剂量率效应测试

2.1 实验条件及器件信息

SOI 工艺是在顶层硅与背衬底之间引入埋氧化层，达到全介质隔离效果的工艺。SOI 工艺消除了体硅互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)电路中的门锁效应，具备寄生电容更小、功耗更低的优点，同时有较强的抗辐射能力，是集成电路与器件抗辐射加固设计的重要技术^[4,7]。研究 SOI 工艺的剂量率效应，探索其在瞬态高能辐射下的失效机理对 SOI 器件的抗辐射加固设计有重要意义。本文利用 1 064 nm 激光对不同工艺(SOI/体硅)、不同特征尺寸(0.13/0.35 μm)、不同器件结构(N 型金属-氧化物-半导体(N-Metal-Oxide-Semiconductor, NMOS)/n 型衬底、p 沟道，靠空穴的流动运送电流的 MOS 管(Positive channel Metal Oxide Semiconductor, PMOS))下剂量率效应差异性开展研究。由于半导体器件的瞬时辐照响应为瞬时光电流^[13-15]，特研制 4 款专用器件进行剂量率效应光电流测试。器件栅、源和体连接为 1 个电极，漏极独立为 1 个电极，同时为避免金属层对激光的反射，器件区域完全裸露。器件版图如图 3 所示，具体器件信息见表 2。

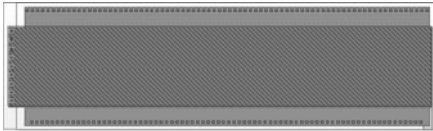


Fig.3 Layout of device of laser simulation test
图 3 激光瞬态剂量率试验器件版图

表 2 被测器件信息

Table2 Information of measured device

serial number	process node/μm	process characteristics	transistor type	width to length ratio
1	0.13	SOI	NMOS	20 μm/5μm
2	0.13	SOI	PMOS	20 μm/5μm
3	0.35	SOI	NMOS	20 μm/5μm
4	0.35	bulk Si	NMOS	20 μm/5μm

2.2 光电流差异性实验

利用激光剂量率效应模拟实验平台，对上述 4 款器件进行了模拟试验，获得关态下各器件在不同激光能量辐照的典型光电流曲线，具体波形数据如图 4(a)~4(d)(展示波形为漏极电压 0.5 V 状态下捕获的光电流曲线)。

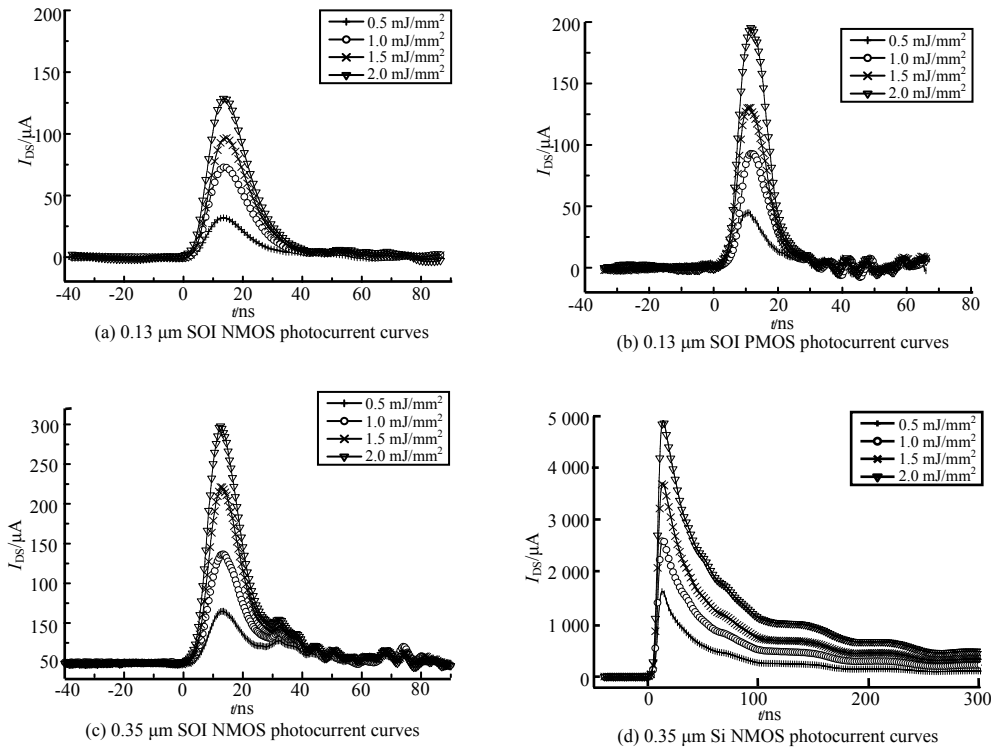


Fig.4 Typical photocurrent curves of four devices($U_{DS}=0.5$ V)

图 4 四款器件典型光电流曲线($U_{DS}=0.5$ V)

SOI 工艺下 $0.13\ \mu\text{m}$ 特征尺寸的 NMOS 器件, 在 $0.5\sim 2\ \text{mJ}$ 激光能量照射下的光电流波形曲线如图 4(a)所示, 光电流峰值范围区间为 $30\sim 130\ \mu\text{A}$; 同工艺同特征尺寸的 PMOS 器件光电流波形曲线如图 4(b)所示, 光电流峰值范围为 $50\sim 200\ \mu\text{A}$, 同条件下 PMOS 器件光电流略大于 NMOS 器件。由于两器件均为 SOI 工艺, 且 PMOS 光电流未明显大于 NMOS 器件, 可以忽略可能存在的寄生双极效应, 主要考虑 NMOS 器件 P 阱多数载流子为空穴、PMOS 器件 N 阱多数载流子为电子, 同条件下电子漂移速度是空穴的 3 倍, 单位时间内 PMOS 器件收集电荷更多, 相应的光电流更大。

对比图 4(a)与图 4(c)能够发现, 同为 NMOS 的器件, 在相同 SOI 工艺相同器件尺寸下, 不同工艺节点下的光电流峰值也存在明显差异, $0.35\ \mu\text{m}$ 器件电流峰值超过 $0.13\ \mu\text{m}$ 器件的一倍。由于电极面积近似一致, 光电流大的原因可能在于 0.35 工艺节点下沟道掺杂浓度较淡、耗尽区宽度较宽, 准确结论仍需结合仿真及工艺数据来分析。在 SOI 与 Si 2 种不同工艺下, 特征尺寸同为 $0.35\ \mu\text{m}$ 的 NMOS 器件, 光电流波形形态及峰值差异明显, 具体如图 4(c)及图 4(d)所示。Si 工艺下光电流峰值超过同能量下 SOI 工艺 10 倍以上, 光电流脉冲宽度也远大于 SOI 工艺。其主要原因在于, SOI 工艺器件在顶层硅与背衬底之间埋入一层氧化层, 常采用源漏电极到底结构; 因此相同尺寸下的 Si 工艺 NMOS 器件漏极 PN 结面积远大于 SOI 工艺器件, 耗尽区面积也相应更大; 在电极面积一致的情况下, 光电流大小与耗尽区面积成正比, 同时光电流消失时间也会更长。

2.3 电压对光电流影响实验

在上述 4 款器件的激光模拟剂量率效应测试研究基础上, 针对外加偏压对不同器件剂量率效应影响开展了实验研究。从机理角度分析, 器件源漏两端施加外在电场会影响空间电荷区的宽度, 并改变载流子漂移速率, 能够对电子—空穴对行为产生影响, 进而导致光电流发生改变。

对在不同激光能量下对器件漏极施加不同电压进行实验, 评估各种条件下光电流与漏极电压的关系。图 5(a)~图 5(d)数据曲线表征 4 款器件漏极电压对光电流的影响趋势。实验结果显示, SOI 工艺在不同工艺节点、不同器件结构、不同激光能量下的光电流与漏极电压相关性均很低, 曲线在各种条件下斜率几乎表征为 0, 说明 SOI 工艺下漏极电压对剂量率效应影响非常有限。相反图 5(d)显示 Si 工艺下光电流与漏极电压相关性曲线斜率明显, 证明漏极电压也是影响体硅器件光电流的因素之一。

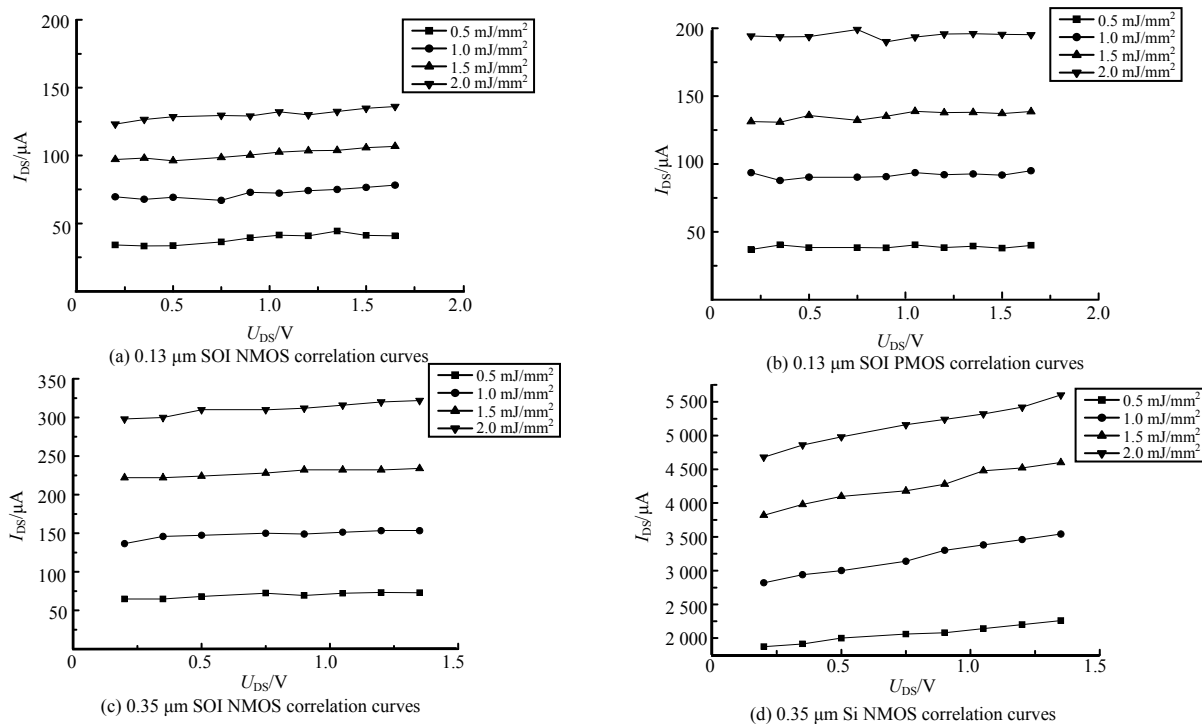


Fig.5 Correlation curves of drain voltage and photocurrent of four devices

图 5 四款器件漏极电压与光电流相关性曲线

3 结论

瞬时剂量率辐射效应会影响电子系统工作状态, 严重时可导致烧毁, 是抗辐射加固设计的重点研究领域。本文针对剂量率考核设备无法满足精细化研究需求的问题, 从分析 γ 射线与激光脉冲作用于半导体机理的相似

性着手,讨论激光模拟 γ 射线剂量率效应的可行性,并建立1064 nm固体激光模拟剂量率辐射效应测试平台。在此测试平台基础上,对4款典型基础器件进行测试,并分析了在不同工艺节点、不同沟道类型、不同衬底形式下光电流的差异性及漏极电压对光电流的影响,为SOI工艺器件和集成电路的剂量率加固设计提供参考和研究手段。本文通过对特征尺寸分别为0.13 μm 的SOI工艺器件、0.35 μm 的SOI工艺器件和0.35 μm 的Si工艺器件在不同激光能量、不同漏源电压下的光电流响应进行分析并得到结论如下:

- a) SOI工艺中器件光电流只与激光能量成正比关系,漏源电压影响不大;
- b) SOI工艺中同特征尺寸的PMOS器件光电流大于NMOS器件;
- c) Si工艺器件光电流与激光能量成正比关系,漏源电压的影响大于SOI器件的影响;
- d) 相同工艺节点、相同器件结构的Si工艺器件比SOI工艺器件的光电流大10倍以上。

参考文献:

- [1] 韩郑生. 抗辐射集成电路概论[M]. 北京:清华大学出版社,2011. (HAN Zhengsheng. Introduction to radiation resistant integrated circuits[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2011.)
- [2] 蒯斌,邱爱慈,曾正中,等. 短脉冲高剂量率 γ 射线源技术研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(4):595-598. (KUI Bin,QIU Aici,ZENG Zhengzhong,et al. Research on source of high dose rate gamma-ray with short pulse duration[J]. High Power Laser and Particles Beams, 2005,17(4):595-598.)
- [3] 王桂珍,龚建成,姜景和,等. 电子元器件及电路的剂量率效应测试技术研究[J]. 微电子学,2001,31(2):130-134. (WANG Guizhen,GONG Jancheng,JIANG Jinghe,et al. Measure of dose rate effects on electronic devices and circuits[J]. Microelectronics, 2001,31(2):130-134.)
- [4] 梁堃,孙鹏,李沫,等. SOI器件瞬时剂量率效应的激光模拟技术研究[J]. 原子能科学技术,2017,51(1):187-192. (LIANG Kun,SUN Peng,LI Mo,et al. Laser simulation technology research of transient dose rate effect in SOI device[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017,51(1):187-192.)
- [5] 岳龙,张战刚,何玉娟,等. 激光束模拟剂量率效应关键技术分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2017,15(1):139-144. (YUE Long,ZHANG Zhangang,HE Yujuan,et al. Key techniques of pulse-laser simulation of dose rate effects[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(1):139-144.)
- [6] ZHAO Yuanfu,ZHENG Hongchao,FAN Long,et al. Experimental research on transient radiation effects in microprocessors based on SPARC-V8 architecture[J]. Journal of Semiconductors, 2015,36(11):64-68.
- [7] 李同德. 体硅集成电路的瞬时剂量率辐射效应研究[D]. 北京:中国航天科技集团公司,2018. (LI Tongde. Researches on high-dose-rate transient ionizing radiation effects in bulk integrated circuit[D]. Beijing:China Aerospace Science and Technology Corporation, 2018.)
- [8] WIRTH J L,ROGERS S C. The transient response of transistors and diodes to ionizing radiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1964,11(5):24-38.
- [9] ELLIS T D,KIM Y D. Use of a pulsed laser as an aid to transient upset testing of I2L LSI microcircuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978,25(6):1489-1493.
- [10] SKOROBOGATOV P K,NIKIFOROV A Y,EGOROV A N,et al. Wavelength influence on CMOS SOS IC dose rate laser simulation efficiency[C]// 2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). Oxford,United Kingdom:IEEE, 2013:435-437.
- [11] NIKIFOROV A Y,SKOROBOGATOV P K. Physical principles of laser simulation for the transient radiation response of semiconductor structures, active circuit elements, and circuits:a nonlinear model[J]. Russian Microelectronics, 2006,35(3): 138-149.
- [12] LEE N H,OH S C,JEONG S H,et al. Analysis of the transient radiation damage effects on electronics using irradiation experiment and model simulation[C]// Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference(2013 NSS/MIC). Seoul,Korea:IEEE, 2013:1-3.
- [13] FJELDLY T A,DENG Y,SHUR M S,et al. Modeling of high-dose-rate transient ionizing radiation effects in bipolar devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001,48(5):1721-1730.
- [14] 陈钱,马英起,陈睿,等. 激光模拟瞬态剂量率闩锁效应电流特征机制研究[J]. 物理学报,2019,68(12):101-108. (CHEN Qian,MA Yingqi,CHEN Rui,et al. Characteristics of latch-up current of dose rate effect by laser simulation[J]. Journal of Physics, 2019,68(12):101-108.)
- [15] ISHAQUE A N,HOWARD J W,BECKER M,et al. Photocurrent modeling at high dose rates[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989,36(6):2092-2098.