

脉冲 γ 射线诱发 N 型金属氧化物场效应晶体管纵向寄生效应 开启机制分析*

李俊霖^{1)†} 李瑞宾¹⁾ 丁李利¹⁾ 陈伟¹⁾ 刘岩¹⁾

1) (强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室 (西北核技术研究所), 西安
710024)

摘 要

金属氧化物场效应晶体管作为大规模数字电路的基本单元,其内部的寄生效应一直以来被认为是影响集成电路在脉冲 γ 射线辐射环境中发生扰动、翻转以及闩锁的重要因素。为研究脉冲 γ 射线诱发 N 型金属氧化物场效应晶体管内部纵向寄生效应的开启机制,通过 TCAD 构建了 40nm、90nm 以及 180nm 三种不同工艺节点的 NMOS 晶体管进行了瞬时电离辐射效应仿真,得到了纵向寄生三极管电流增益随工艺节点的变化趋势、纵向寄生三极管的开启条件及其对 NMOS 晶体管工作状态的影响。结果表明 1) 脉冲 γ 射线在辐射瞬时诱发 NMOS 晶体管内部阱电势抬升是导致纵向寄生三极管开启的主要原因; 2) 当纵向寄生三极管导通时, NMOS 晶体管内部会产生强烈的二次光电流影响晶体管的工作状态; 3) NMOS 晶体管内部纵向寄生三极管的电流增益随工艺节点的减小而减小。研究结果可为电子器件的瞬时电离辐射效应机理研究提供理论依据。

关键词: 瞬时电离辐射效应, 寄生效应, 阱电势抬升, 二次光电流

PACS: 61.80.Ed, 61.80.Jh, 85.50.Gk

基金: 国家自然科学基金(批准号: 11835006)资助的课题。

† 通讯作者.E-mail: lijunlin@nint.ac.cn

1 引 言

随着半导体制造工艺的不断发展,高性能、高集成度的纳米器件在航天、国防等关键电子系统中的应用越来越广泛,当遭遇脉冲 γ 射线时,其工作可靠性会受到严重影响,因此纳米器件的瞬时电离辐射效应研究受到高度关注。高强度纳秒级脉冲 γ 射线作用于电子器件时会在其内部产生强瞬时光电流^[1-6]导致器件输出扰动^[7-8]、数据翻转^[9-12],甚至闩锁^[13-14]及烧毁^[8,15],器件中金属氧化物场效应

晶体管 (Metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 内部的寄生结构是瞬时光电流产生的基本敏感区域, 研究寄生效应在脉冲 γ 射线辐射环境下的开启机制, 可以为电子器件的失效模式诊断与瞬时电离辐射效应机理研究提供理论依据。

MOS 管作为集成电路的基本单元, 其内部的寄生效应一直以来被认为是影响电子器件在瞬时电离辐射环境中正常工作的重要因素^[6,9]。国外对 90nm 和 130nm PMOS 管开展的单粒子效应研究指出^[16-17], 当重离子轰击 PMOS 管漏极时会引起横向寄生双极放大效应影响 PMOS 管的工作状态, 但未讨论纵向寄生效应情况, 在脉冲 γ 射线辐射环境下, 纵向寄生效应开启也会对 MOS 管的输出状态产生明显影响。国内对大规模集成电路的瞬时电离辐射效应实验结果分析认为^[9,18], MOS 管内部的寄生三极管开启是降低电子器件损伤阈值的主要因素, 但未对寄生三极管的开启机制及其电流增益随特征尺寸的变化进行深入研究。

本文通过 TCAD 构建不同工艺尺寸 NMOS 管器件模型, 针对 NMOS 管在大规模集成电路中的两种典型工作状态^[19] (NMOS 管截止: 栅极、源极置低, 漏极置高; NMOS 管导通: 栅极置高, 源极、漏极置低) 开展了仿真研究, 分析了典型工作状态下 NMOS 管内部纵向寄生三极管的开启条件; 得到了纵向寄生三极管开启与二次光电流的关系以及纵向寄生三极管电流增益随工艺尺寸的变化趋势。PMOS 管相比 NMOS 管只是敏感区的掺杂类型不同, 但其纵向寄生三极管的开启机制与 NMOS 管相同, 文中未对 PMOS 管的情况进行讨论, 但针对 NMOS 管的研究方法与理论分析适用于 PMOS 管。

2 NMOS 管寄生效应机理分析与模型构建

2.1 寄生效应机理分析

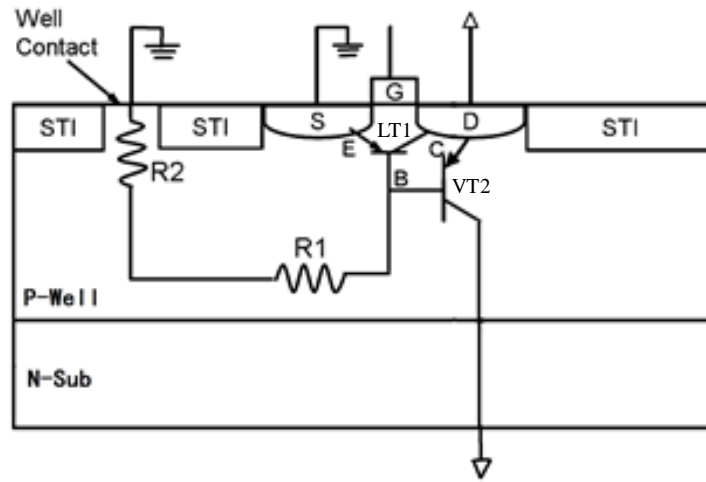


图 1 NMOS 管寄生效应示意图

Fig.1. Parasitic effect schematic of NMOS

图 1 为 NMOS 管寄生效应示意图，NMOS 管内部共存在两个寄生三极管，横向的 LT1 与纵向的 VT2。由于源漏极与 P 阱之间形成的寄生 PN 结结面积与空间电荷区较小，而 P 阱与 N 型衬底之间形成的寄生 PN 结结面积与空间电荷区较大，因此当脉冲 γ 射线入射时，对初次光电流起放大作用产生二次光电流、对电子器件输出造成影响的主要为 VT2^[20]，因此本文主要针对 VT2 的开启机制及其影响进行仿真分析。NMOS 管的源漏极为 VT2 的发射极，P 阱为基极，衬底为收集极。当源漏极与 P 阱处于反偏状态时，VT2 发射结反偏，VT2 无法导通。脉冲 γ 射线入射后，P 阱中产生大量电子空穴对，由于 N 型衬底与电源相连，一部分电子很快被衬底收集而空穴大部分留在 P 阱中，导致 P 阱电势的抬升。当 P 阱电势抬升到一定程度时，源漏极与 P 阱结正偏而衬底与 P 阱结反偏时，VT2 的发射结正偏而集电结反偏，处于正向放大状态，大量电子通过正偏的发射结注入 P 阱，导致源漏电势升高影响 NMOS 管的工作状态。

2.2 TCAD 器件模型校准与仿真设置

本文所构建的 NMOS 管器件模型结构的结构参数与工艺参数由表 1 给出，二维剖面图以及沟道处掺杂如图 2 及图 3 所示。在图 3 给出的 NMOS 沟道处各

部分掺杂中，通过阈值掺杂（ V_t implant）调节晶体管的阈值电压，当掺杂浓度增大时，沟道处载流子浓度增加，沟道反型所需电压增大，阈值电压升高；通过漏电掺杂（Leakage mitigation implant）调整晶体管的漏电流，掺杂浓度越高，漏电流越小；通过晕掺杂（Halo implant）调节晶体管 I_d - V_{ds} 特性曲线斜率，掺杂浓度越大曲线斜率越大，其本质是消除短沟道效应；源漏轻掺杂（LDD implant）决定了器件的串联电阻，对于器件的最大驱动强度有重要影响。通过反复调节这些掺杂的浓度，并与器件的 SPICE 模型常态特性进行对比，对 NMOS 管的 TCAD 器件模型进行常态特性校准。TCAD 仿真过程中，使用了电子与空穴输运方程、电子与空穴漂移扩散模型、掺杂浓度对载流子迁移率影响模型、强电场下电子与空穴的速度饱和效应模型、禁带变窄模型、依赖掺杂浓度变化的肖克莱·霍尔·里德复合模型以及俄歇复合模型，针对 40nm 器件还添加了适用于小尺寸器件的流体动力学模型。

表 1 不同尺寸 NMOS 管结构参数与工艺参数

Tab.1 Structure and process parameters of NMOS with different feature size							
工艺节点 λ /nm	沟道长度 L /nm	沟道宽度 W /nm	源漏掺杂 $/\text{cm}^3$	晕掺杂 $/\text{cm}^3$	多晶硅掺杂 $/\text{cm}^3$	阈值掺杂 $/\text{cm}^3$	漏电掺杂 $/\text{cm}^3$
40	40	120	2×10^{20}	1.5×10^{19}	2×10^{20}	7.5×10^{18}	7.5×10^{18}
90	80	200	2×10^{20}	1×10^{18}	2×10^{20}	8.2×10^{18}	8×10^{18}
180	180	540	1×10^{20}	8×10^{17}	1×10^{20}	8×10^{18}	7×10^{18}

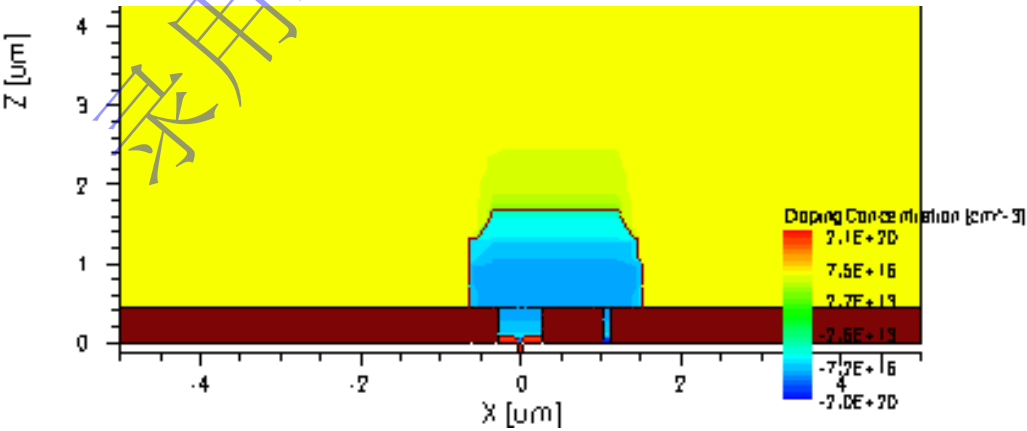


图 2 NMOS 管二维剖面

Fig.2. Two-dimensional profile of NMOS

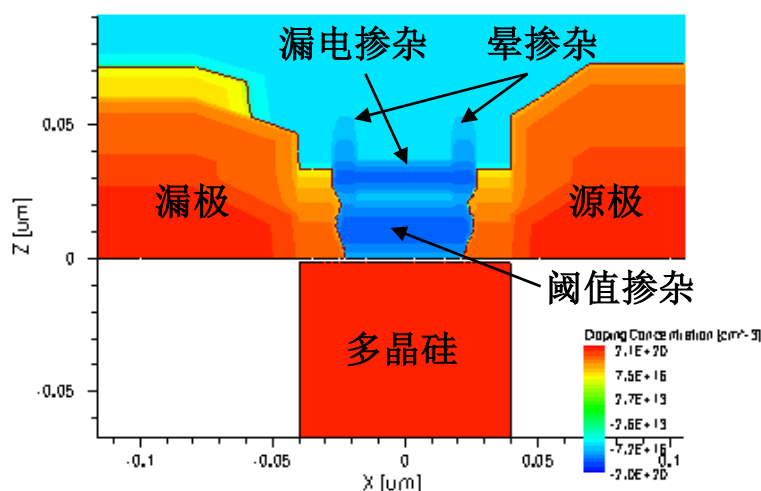


图 3 NMOS 管沟道处掺杂

Fig.3. Channel doping of NMOS

利用 SPICE 对三种 NMOS 管的转移特性曲线与输出特性曲线进行了仿真，其中转移特性曲线是通过固定源漏偏置扫描栅极电压得到漏极电流随栅极电压的变化；输出特性曲线是通过固定源极、栅极偏置扫描漏极电压得到漏极电流随栅极电压的变化。三种尺寸 NMOS 管的常态特性校准曲线如图 4 至图 6 所示，在常态特性校准过程中参考了文献^[21-22]，经过校准的三维器件模型常态电学特性 I_d - V_{ds} 曲线和 I_d - V_{gs} 曲线与 SPICE 模型保持一致。

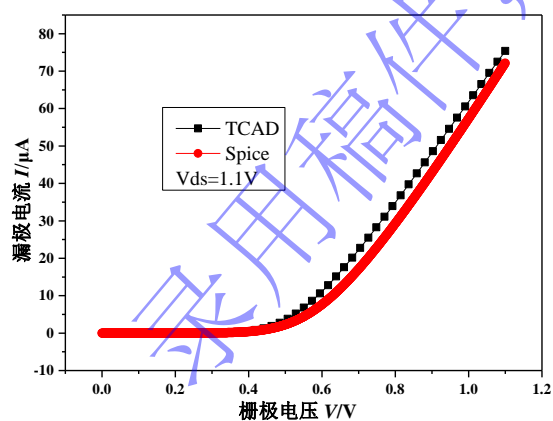


图 4a 转移特性曲线

Fig.4a. Transfer characteristic curve

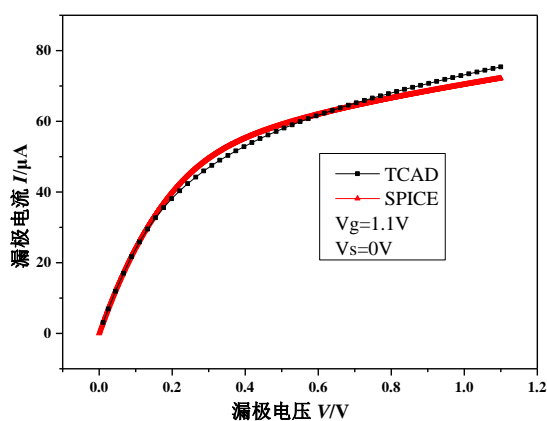


图 4b 输出特性曲线

Fig.4b. Output characteristic curve

图 4 40nm NMOS 管常态特性校准曲线

Fig.4. Normal characteristic calibration curve of 40nm NMOS

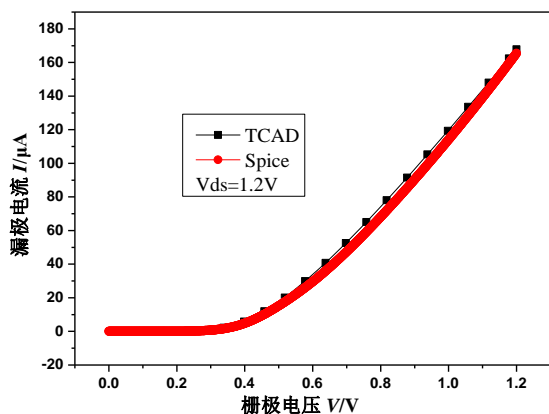


图 5a 转移特性曲线

Fig.5a. Transfer characteristic curve

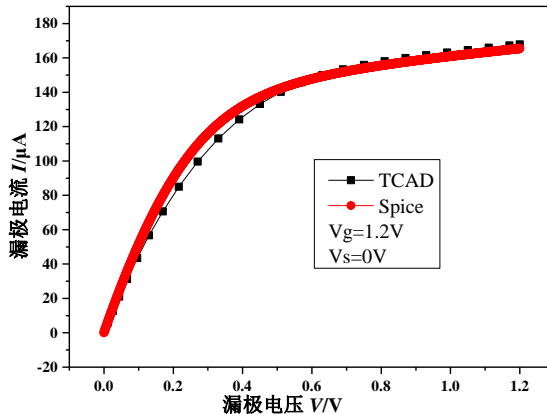


图 5b 输出特性曲线

Fig.5b. Output characteristic curve

图 5 90nm NMOS 管常态特性校准曲线

Fig.5. Normal characteristic calibration curve of 90nm NMOS

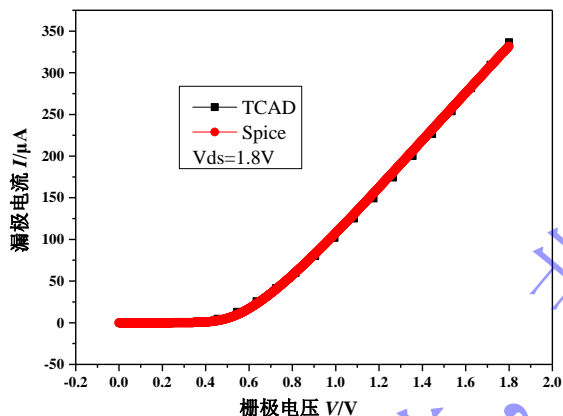


图 6a 转移特性曲线

Fig.6a. Transfer characteristic curve

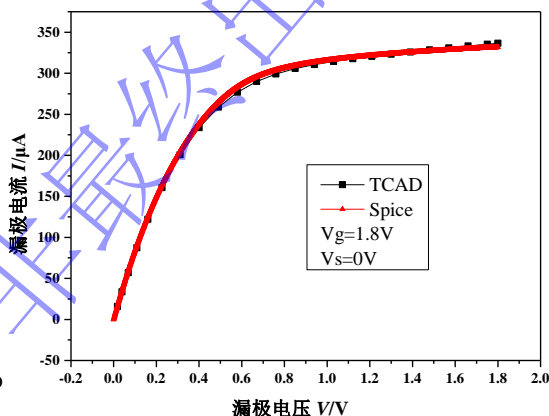


图 6b 输出特性曲线

Fig.6b. Output characteristic curve

图 6 180nm NMOS 管常态特性校准曲线

Fig.6. Normal characteristic calibration curve of 180nm NMOS

3 脉冲 γ 射线诱发纵向寄生三极管开启条件仿真分析

当脉冲 γ 射线入射时，纵向寄生三极管的 B-E（基极-发射极）结和 B-C（基极-集电极）结均会产生瞬时光电流。对于纵向寄生三极管，B-C 结的电荷收集体积远大于 B-E 结，导致 B-C 结产生的瞬时光电流远大于 B-E 结产生的瞬时光电流，因此通常只考虑 B-C 结产生的初次光电流。当 B-C 结产生的初次光电流入射

至基极，基极电势会相应的抬升，当基极电势抬升使 B-E 结正偏时，大量电子通过发射极入射至基极后被 B-C 结收集，从而形成由集电极至发射极的二次光电流。二次光电流的表达式为： $I_{sp} = (1 + \beta) I_{pp}$ ，式中 β 为寄生三极管的电流增益^[6,23]。二次光电流的产生会改变源或漏极的偏置电压，影响 NMOS 管的工作状态。当阱偏置接地时，分别设置 NMOS 管处于截止状态（栅极偏置 0V、源极偏置 0V、漏极偏置 1.2V）与导通状态（栅极偏置 1.2V、源极偏置 0V、漏极偏置 0V）。设置脉冲 γ 射线参数为剂量率 $2 \times 10^7 \text{Gy(Si)/s}$ ，脉冲宽度 50ns，脉冲持续时间为 20ns~70ns。在此条件下 P 阱、衬底以及源漏产生的瞬时光电流如图 7 与图 8 所示。

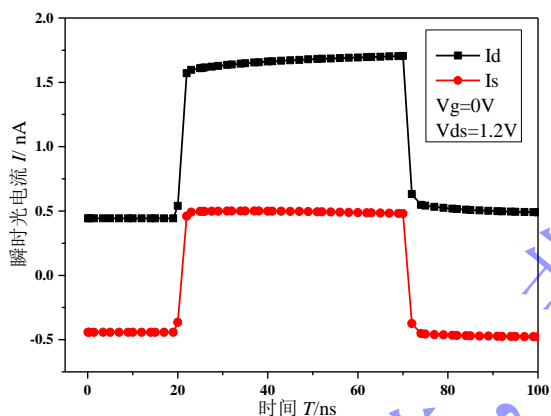


图 7a 源极、漏极瞬时光电流

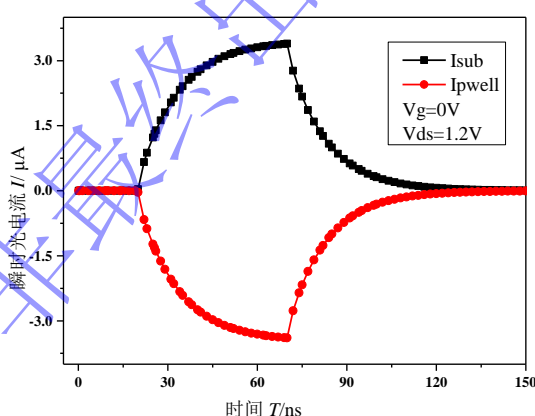


图 7b P 阱、衬底瞬时光电流

Fig.7a. Photocurrent of source and drain Fig.7b. Photocurrent of P-well and substrate

图 7 NMOS 管截止时内部瞬时光电流

Fig.7. Photocurrent of NMOS when channel is cut-off

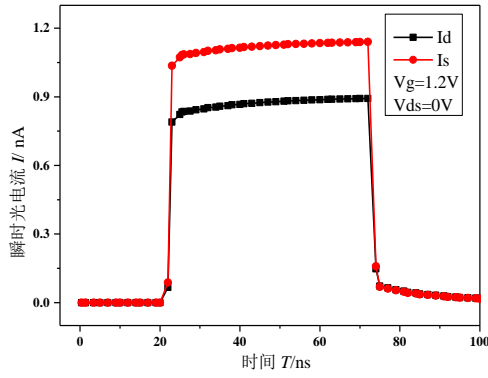


图 8a 源极、漏极瞬时光电流

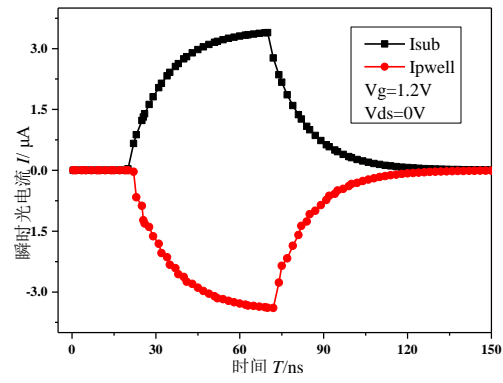


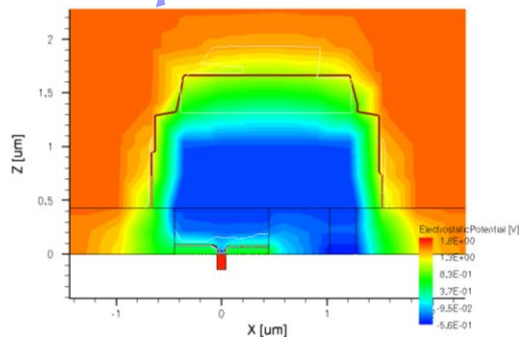
图 8b P 阱、衬底瞬时光电流

Fig.8a. Photocurrent of source and drain Fig.8b. Photocurrent of P-well and substrate

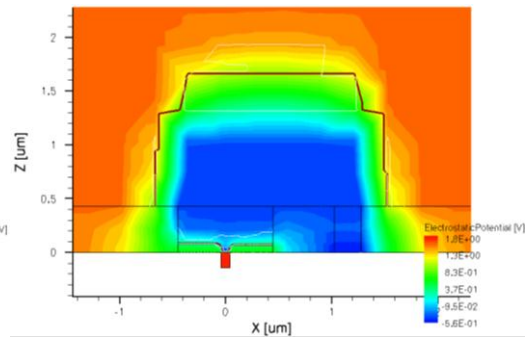
图 8 NMOS 管导通时内部光电流

Fig.8. Photocurrent of NMOS when channel is turn-on

阱偏置为0V，脉冲 γ 射线剂量率为 $2 \times 10^7 \text{ Gy(Si)/s}$ 条件下，源极与漏极产生纳安级瞬时光电流，衬底与P阱产生微安级瞬时光电流。漏极、源极、衬底电流为正、P阱电流为负，纵向寄生三极管没有导通，否则衬底产生的瞬时光电流会从漏或源极流出使其电流方向为负。NMOS管内部在辐射瞬时以及辐射过后的电势分布如图9所示，在脉冲 γ 射线入射期间，NMOS管内部P阱电势没有明显变化稳定在0V附近，辐射瞬时产生的瞬时光电流从阱接触流入地。在脉冲 γ 射线剂量率为 $2 \times 10^7 \text{ Gy(Si)/s}$ 时，NMOS管内部产生的瞬时光电流较小，没有显著改变P阱电势，纵向寄生的三极管未导通开启。当脉冲 γ 射线剂量率增大到 $1 \times 10^{10} \text{ Gy(Si)/s}$ 时，NMOS管内部在辐射瞬时以及辐射过后的电势分布如图10所示（同样以NMOS管导通时为准）。



(a) 20ns



(b) 70ns

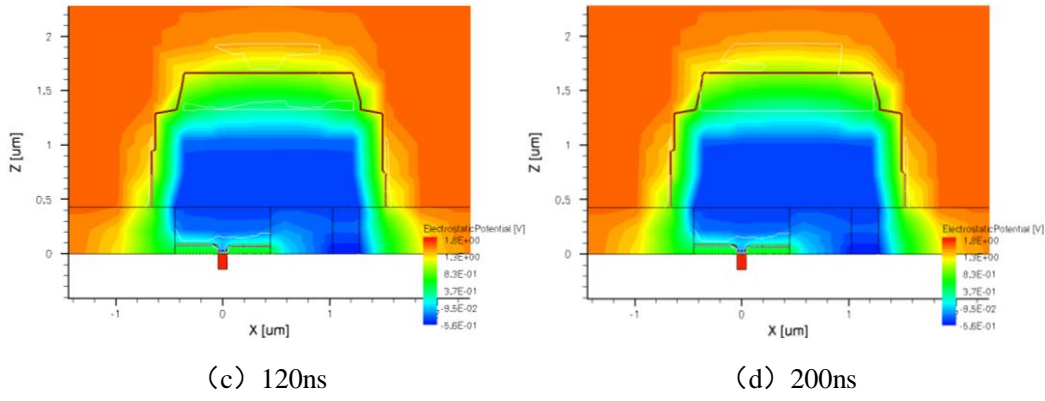


图 9 脉冲 γ 射线剂量率为 $2 \times 10^7 \text{ Gy(Si)/s}$ 时 NMOS 管电势分布随时间变化

Fig.9. Variation of NMOS potential distribution over time when dose rate of transient

γ -ray is $2 \times 10^7 \text{ Gy(Si)/s}$

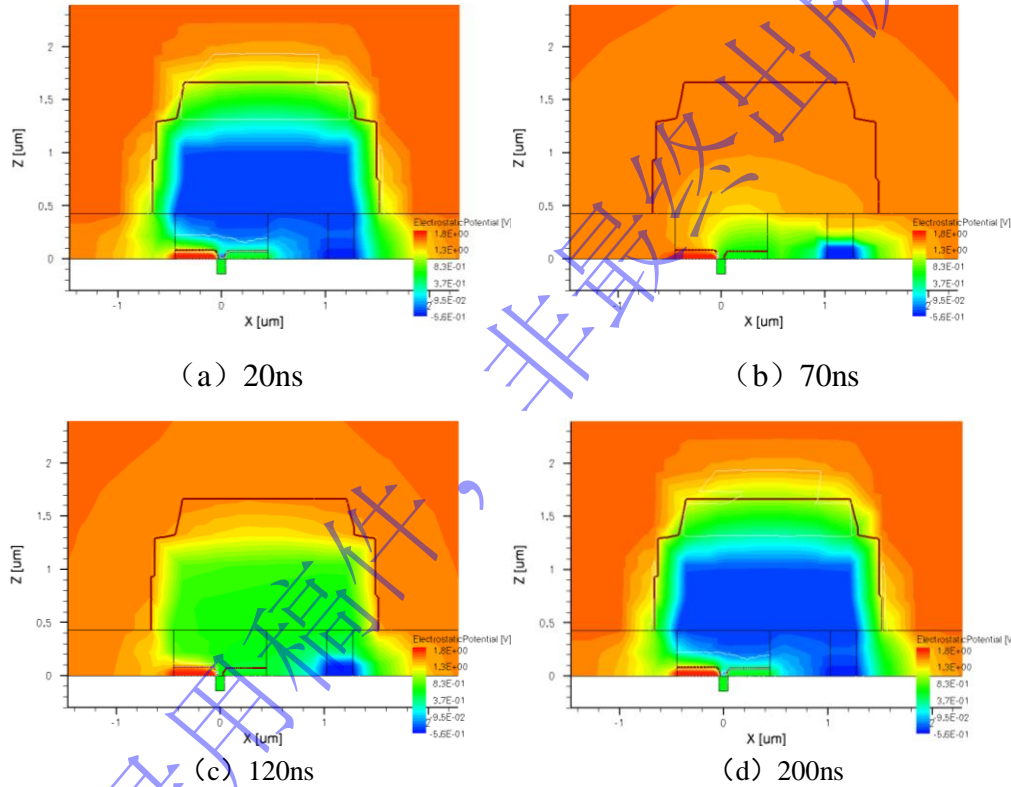


图 10 脉冲 γ 射线剂量率为 $1 \times 10^{10} \text{ Gy(Si)/s}$ 时 NMOS 管电势分布随时间变化

Fig.10. Variation of NMOS potential distribution over time when dose rate of transient

γ -ray is $1 \times 10^{10} \text{ Gy(Si)/s}$

在 $1 \times 10^{10} \text{ Gy(Si)/s}$ 剂量率条件下, 脉冲 γ 射线入射瞬间在 P 阱中产生更多的电子空穴对, 电子迅速被衬底收集, 而大量空穴来不及被阱接触收集而留在 P 阱中导致 P 阱电势明显抬升。在此条件下, NMOS 管分别处于截止与导通状态时衬

底、P 阱与源漏极的瞬时光电流如图 11 与图 12 所示。

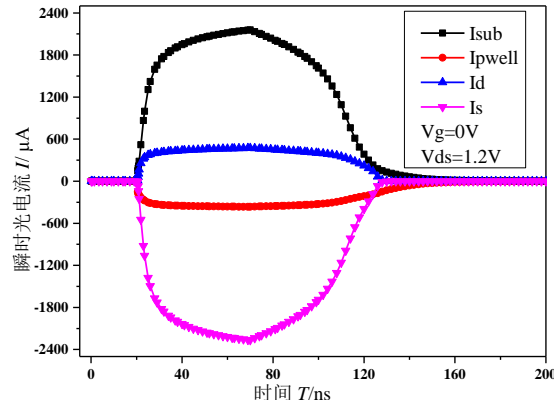


图 11 NMOS 管截止时内部瞬时光电流

Fig.11. Photocurrent of NMOS when channel is cut-off

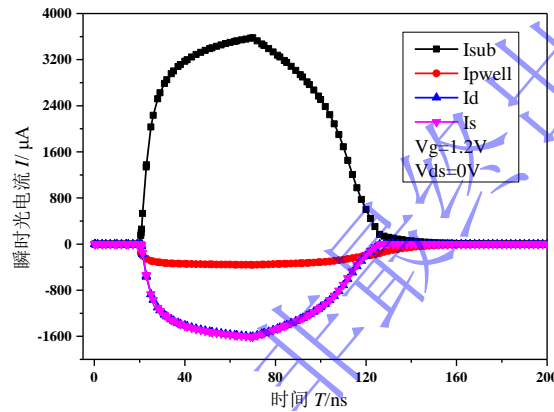


图 12 NMOS 管导通时内部瞬时光电流

Fig.12. Photocurrent of NMOS when channel is turn-on

当 NMOS 管处于截止状态时，漏极偏置为 1.2V，源极偏置为 0V。漏极-P 阱-衬底之间的纵向寄生三极管由于发射结反偏无法开启。但由于源极偏置为 0V，源极-P 阱-衬底之间的纵向寄生三极管因发射结正偏而开启，源极作为发射极向衬底发射大量电子，在源极产生约 2.4mA 的二次光电流如图 11 所示。当 NMOS 管导通时，源极与漏极的偏置均为 0V，在辐射瞬时漏极/源极-P 阱-衬底之间的纵向寄生三极管均由于发射结正偏而开启，NMOS 管的源极与漏极同时作为发射极向衬底发射大量电子，在 NMOS 管的源极与漏极都会产生很大的二次光电流如图 12 所示。根据以上仿真结果，在脉冲 γ 射线剂量率较小时，初次光电流引起

的阱电势变化较微弱，不足以达到纵向寄生三极管的开启条件，此时对 NMOS 管产生辐射损伤的主要为初次光电流；而当脉冲 γ 射线剂量率较高时，初次光电流引起的阱电势变化剧烈，纵向寄生三极管的开启会在发射极产生强烈的二次光电流。其中当 NMOS 处于截止状态时，只有 NMOS 管的源极作为寄生三极管的发射极；而当 NMOS 管导通时，源漏极均成为寄生三极管的发射极产生强烈的二次光电流。

4 寄生效应随特征尺寸的变化趋势

为分析纵向寄生效应随特征尺寸的变化趋势，根据所构建的三种尺寸 NMOS 管，仿真了 NMOS 管纵向寄生三极管的共发射极电流增益。如图 13 所示，所有 NMOS 管内部的纵向寄生三极管的电流增益都表现出开始随 P 阱电压的升高而增大，当 P 阱电压增大到一定程度时又随 P 阱电压的增大而减小，这是由于发生了大注入效应，导致发射极注入效率降低^[24]，如图 14 所示。

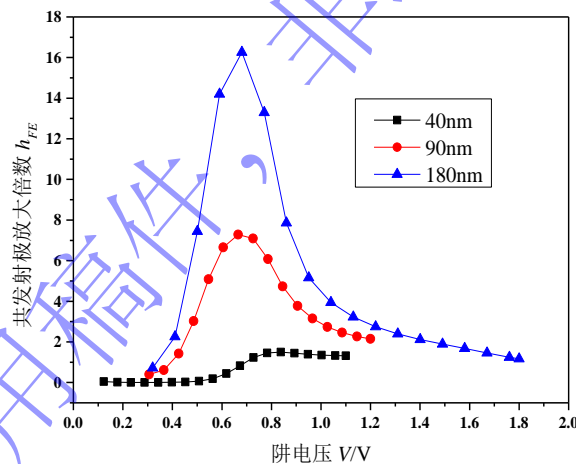


图 13 纵向寄生三极管电流增益

Fig.13. Gain of the vertical NPN triode vs voltage of pwell

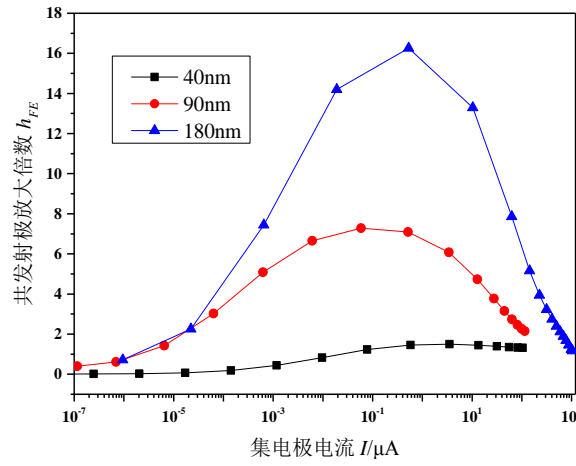


图 14 共发射极电流增益随集电极电流变化趋势

Fig.14. Tendency of current gain of the common emitter to the current of collector

随着NMOS管特征尺寸的减小，纵向寄生三极管共发射极电流增益逐渐减小。这主要是由于一方面阱的掺杂浓度不断升高，导致纵向寄生三极管基区掺杂浓度升高，发射区向基区发射的载流子在基区的复合率增加；另一方面阱深及阱面积不断减小，导致集电结电荷收集体积的减小。两个因素综合影响导致纵向寄生三极管的电流增益降低。随着特征尺寸的减小，纵向寄生三极管的电流增益逐渐减小，这也是小尺寸电子器件对于脉冲 γ 射线引起的门锁效应敏感性逐渐降低的一个因素^[13]。

5 结 论

本文针对NMOS管在大规模集成电路中的两种典型工作状态在脉冲 γ 射线辐射环境中纵向寄生效应的开启机制进行了仿真研究。当脉冲 γ 射线的剂量率较高时，P阱产生的初次光电流强度较大，由于P阱电阻的分压会导致P阱电势的明显抬升从而使纵向寄生三极管开启。当NMOS管处于截止状态时，由于漏极处于高电位，二次光电流只能通过源极流入地线使地电位抬升；当NMOS管导通时，由于源极与漏极均处于低电位，二次光电流会同时流向源极与漏极，一方面使地电位抬升，另一方面直接影响NMOS管的输出状态。根据TCAD仿真结果，

纵向寄生三极管的电流增益随特征尺寸的减小而减小,这是小尺寸电子器件对脉冲 γ 射线引起闩锁效应敏感性越来越弱的重要因素。

参考文献

- [1] Wirth J L, Rogers S C 1964 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **11** 24
- [2] Enlow E W, Alexander D R 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1467
- [3] Fjeldly T A, Deng Y Q, Shur M S, Hjalmarson H P, Muyschondt A, Ytterdal T 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 1721
- [4] Alexander D R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 565
- [5] Lai Z W 1998 *Radiation Electronics* (Beijing: Defense Industry Press) pp288-300 (in Chinese) [赖祖武 1998 抗辐射电子学(北京:国防工业出版社) 第 288-300 页]
- [6] Lewis C 1995 *Transient Radiation Effects on Electronics* (Alexandria: Defense Nuclear Agency) pp200-245
- [7] Ma Q, Lin D S, Fan R Y, Chen W, Yang S C, Gong J C, Wang G Z, Qi C 2010 *Atomic Energy Science and Technology* **44** 545 (in Chinese) [马强, 林东生, 范如玉, 陈伟, 杨善潮, 龚建成, 王桂珍, 齐超 2010 原子能科学技术 **44** 545]
- [8] Oh S C, Lee N H, Lee H H 2012 *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, Jeju Island, Korea, October 17-21 2012 p1233
- [9] 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 *Atomic Energy Science and Technology* **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]
- [10] Massengill L W, Diehl-Nagle S E 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 4026
- [11] Massengill L W, Diehl-Nagle S E 1986 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33** 1541
- [12] Li J L, Chen W, Li R B, Wang G Z, Yang S C 2019 *3rd International Conference on Radiation Effects of Electronic Devices*, Chongqing, China, May 29-31, 2019 pp1-4
- [13] Boselli G, Reddy V, Duvvury C 2005 *43rd Annual International Reliability Physics Symposium*, San Jose, USA, April 17-21, 2005 p137
- [14] Li R B, Chen W, Lin D S, Yang S C, Bai X Y, Wang G Z, Liu Y, Qi C, Ma Q 2012 *Sci. Chin. Tech. Sci.* **55** 3242
- [15] Keshavarz A A, Fischer T A, Dawes W R, Hawkins C F 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1422
- [16] Olson B D, Amusan O A, Dasgupta S, Massengill L W, Witulski A F, Bhuvu B L,

- Alles M L, Warrenm K M, Ball D R 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 894
- [17] Ahlbin J R, Atkinson N M, Gadlage M J, Gaspard N J, Bhuva B L, Loveless T D, Zhang E X, Chen L, Massengill L W 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2585
- [18] Jin X M, Fan R Y, Chen W, Wang G Z, Lin D S, Yang S C, Bai X Y 2010 *Atomic Energy Science and Technology* **44** 1487 (in Chinese) [金晓明, 范如玉, 陈伟, 王桂珍, 林东生, 杨善潮, 白小燕 2010 原子能科学技术 **44** 1487]
- [19] Calienes W, Reis R, Anghel C, Vladimirescu A 2014 *IEEE 57th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, TX, USA, August 3-6, 2014 p655
- [20] Wunsch T F, Hash G L, Hewlett F W, Treece R K 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1392
- [21] Dasgupta S 2007 *Single Event Pulse Widths and Pulse Shapes in Deep Submicron CMOS M.S. Dissertation* (Nashville: Vanderbilt University)
- [22] Atkinson N M 2010 *Single Event Characterization of a 90nm Bulk CMOS Digital Cell Library M.S. Dissertation* (Nashville: Vanderbilt University)
- [23] Li R B, Wang C H, He C H, Chen W, Li J L, Qi C, Liu Y 2020 *Nucl. Instrum. Meth. B.* **470** 32
- [24] Neamen D A 2007 *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp284-285

TCAD Simulation analysis of vertical parasitic effect induced by pulsed γ - ray in NMOS from 180nm to 40nm technology nodes*

Li Jun-Lin¹⁾ Li Rui-Bin¹⁾ Ding Li-Li¹⁾ Chen Wei¹⁾ Liu Yan¹⁾

1) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear

Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract

As the basic structure of large scale digital circuits, parasitic effect inside metal oxide field effect transistor has long been considered as an important factor affecting the disturbance, upset and latchup of integrated circuits in pulsed γ -ray radiation environment. To investigate the turn-on

mechanism of vertical parasitic effect in NMOSFET induced by pulsed γ -ray radiation, 40nm, 90nm and 180nm NMOSFET device models were constructed by TCAD and the normal electrical characteristics were calibrated. The trend of vertical parasitic triode current gain, the turn-on conditions of vertical parasitic triode and their influence on working state of NMOSFET were obtained. The simulation results show that 1) The disturbance of well potential inside NMOSFET induced by pulsed γ -ray radiation is the main reason for turn-on of vertical parasitic triode. 2) When vertical parasitic triode is turn-on, large secondary photocurrent will be generated inside NMOSFET which will affect the working state of the transistor. 3) The current gain of vertical parasitic triode in NMOSFET decreases with the reduction of technology node. The results provide a theoretical basis for the study of the transient ionizing radiation effect of electronic devices.

Keywords: transient ionizing radiation effect, parasitic effect, rise of well potential, secondary photocurrent

PACS: 61.80.Ed, 61.80.Jh, 85.50.Gk

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11835006)