

带有 n^+ 深阱的三阱 CMOS 工艺中寄生 NPN 双极效应及其对电荷共享的影响*

刘必慰[†] 陈建军 陈书明 池雅庆

(国防科技大学计算机院微电子与微处理器研究所, 长沙 410073)

(2011 年 6 月 29 日收到; 2011 年 8 月 28 日收到修改稿)

基于三维 TCAD 器件模拟, 研究了带有 n^+ 深阱的 90 nm 三阱 CMOS 器件在重离子辐照下产生的电荷共享效应. 研究表明在重离子辐照时, n^+ 深阱会导致寄生的 NPN 双极型晶体管触发, 显著增强 NMOS 间的电荷共享, 其放大因子达到双阱工艺中寄生 PNP 晶体管放大因子的 2—4 倍. 进而分别研究了 n 阱接触和 p 阱接触对寄生 NPN 双极放大的影响, 结果表明增大 p 阱接触的面积和减小 n 阱接触的距离将抑制 NPN 晶体管的放大作用, 而增大 n 阱接触的面积将增强 NPN 的放大作用.

关键词: 电荷共享, 单粒子效应, n^+ 深阱, 寄生双极型晶体管

PACS: 61.80.Jh, 85.30.Tv, 43.30.Hw

1 引言

当辐射环境中的高能粒子轰击半导体器件灵敏区时将会引起单粒子效应 (single event effect, SEE). 随着半导体工艺进入纳米尺度, 单粒子引起的电荷共享成为了国际上备受关注的可靠性问题之一. 电荷共享 (charge sharing) 是指单个高能粒子轰击产生的电荷同时被多个敏感节点收集从而导致多电路节点同时翻转的现象. 早在 1988 年, 就有学者发现了电荷共享现象并提出电荷扩散是电荷共享发生的原因^[1]. Olson 等发现由于 CMOS 器件中寄生的 PNP 双极型晶体管也会引起电荷共享现象并研究阱接触形状和位置对双极放大的影响^[2,3]. Amusan 等讨论了双阱工艺下距离、LET 以及晶体管类型与电荷共享的关系^[4,5], 并提出 NMOS 间的电荷共享的主要通过扩散实现, 而 PMOS 间的电荷共享主要通过双极放大实现. 其他学者等分别研究了阱掺杂^[6]、 p^+ 深阱掺杂^[7]、粒子入射方向^[8]、温度^[9] 等因素与电荷共享的关系, 以及电荷共享引起的多位翻转^[10-12]、和脉冲

截止效应^[13] 等.

然而, 目前对电荷共享的研究绝大多数基于双阱工艺进行, 针对三阱工艺中的电荷共享产生机理尚未有系统的研究. 三阱工艺相对于双阱工艺的不同在于, 在普通的 p 阱和 n 阱之下再通过离子注入生成一个高浓度的 n^+ 埋层. n^+ 深阱将 p 阱、n 阱与衬底隔离, 减少衬底噪声对 CMOS 器件的影响, 常用于模拟电路、数模混合电路以及存储电路的设计中提高电路稳定性. 由于 n^+ 深阱的引入, 半导体材料中纵向电场分布将发生改变, 从而影响电荷收集和电荷共享收集过程. 已有重离子试验表明 n^+ 深阱对 SRAM 翻转率有显著影响, 文献 [11, 12] 中发现 n^+ 深阱对 SRAM 的 SEU 翻转率有显著影响. 文献 [10] 中在辐照试验中发现 n^+ 深阱将导致 SRAM 中 MBU 翻转率的增加, 但尚未有文献系统研究 n^+ 深阱对电荷共享收集影响的物理机理及其关键影响因素.

本文研究了 90 nm CMOS 三阱工艺中的电荷共享效应, 发现在重离子辐照下 n^+ 深阱将导致 NMOS 中的寄生 NPN 晶体管开启, 显著放

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60836004), 国家自然科学基金 (批准号: 61006070, 60906014) 和教育部博士点基金 (批准号: 20104307120006) 资助的课题.

[†] E-mail: liu.biwei@163.com

大 NMOS 中的电荷共享, 进而研究了 p 阱接触和 n 阱接触对寄生 NPN 双极晶体管放大因子的影响.

2 模拟设置

2.1 器件模型及校准

本文使用三维器件模拟进行研究, 模拟基于 Synopsys 公司的 Sentaurus TCAD 工具进行.

构建的 NMOS 电荷共享模拟三维器件模型如图 1 所示. 两个 NMOS 晶体管 A 和 B 位于器件中间, 尺寸均为 $W_n : L_n = 200 \text{ nm} : 90 \text{ nm}$, 漏端相邻, 二者之间的间距为 140 nm . p 阱接触在 NMOS 器件的右侧, 距 NMOS 280 nm , n 阱和 n 阱接触在 NMOS 器件的左侧, n 阱接触距离 NMOS 器件 $1 \mu\text{m}$. n 阱和 p 阱的阱深均为 800 nm , 掺杂峰值浓度均为 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$. 在 n 阱和 p 阱下是高掺杂的 n^+ 深阱, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 阱深为 820 nm . n^+ 深阱本身没有接触, 它通过 n 阱和 n 阱接触间接连接到 VDD. PMOS 电荷共享模拟三维器件模型采用类似设置构建, 构建细节不再赘述.

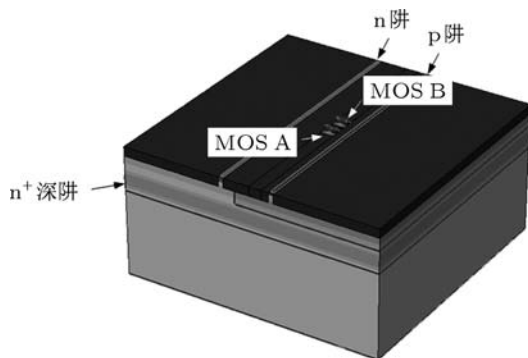


图 1 电荷共享模拟使用的 NMOS 管器件结构

通过调整漏轻掺杂 (LDD) 浓度、阈值电压 (V_T) 注入和源漏掺杂的浓度等工艺参数, 对 NMOS 和 PMOS 器件模型进行了校准. 校准的基准为 SMIC 90 nm 工艺 PDK (process design kit) 中所提供的 $I-V$ 特性. 校准的结果如图 2 所示, 器件模型与 PDK 中的 $I-V$ 特性曲线一致.

2.2 模拟条件

器件的工作电压设置为 1.2 V , 在模拟中所有晶体管都处于关断的状态, 并使漏结处于反偏的状态.

重离子轰击的 LET 值为 $10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 并在整个轨迹上保持不变. 粒子轨迹的深度和半径

分别为 $5 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$, 这与 SRIM (Stopping and Ranges of Ions in Matter) 软件计算出的 Cl 离子入射硅的轨迹参数相当. 假定粒子轰击的位置为器件 A 的漏极的中心, 且垂直轰击器件结构的表面. 下面的讨论中, 我们将使用文献 [4] 中定义的概念: 直接被粒子轰击的器件称为主器件 (active device), 而发生电荷共享的器件称为从器件 (passive device). 在本文的模拟中, 主器件为 A, 从器件为 B, 通过观测从器件 B 漏极上的瞬时电流来表征电荷共享收集的强弱.

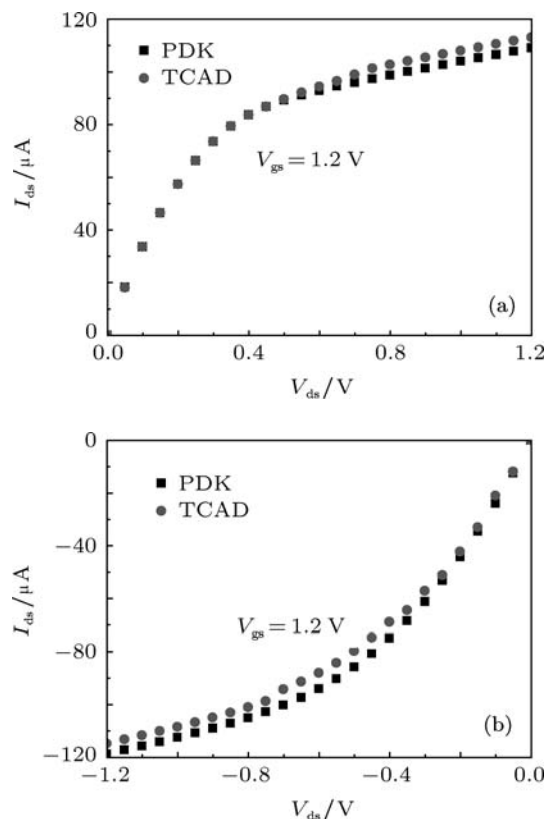


图 2 90 nm CMOS 工艺校准获得的 I_D-V_D 曲线 (a) NMOS; (b) PMOS

模拟中使用的物理模型包括: 1) Fermi-Dirac 统计; 2) 禁带变窄模型; 3) 掺杂相关的 SRH 复合和 Auger 复合; 4) 掺杂、电场和载流子浓度对迁移率的影响; 5) 轰击的重离子是采用 Gaussian 分布建模, 且 Gaussian 时序分布有 0.25 ps 的延迟; 6) 流体动力学模型用来模拟载流子输运. 如果没有其他特别指定, 其他的模型和参数为 Sentaurus TCAD 默认.

所有的模拟都是在 16 核心 128 G 内存的高性能服务器上运行的. 整个器件模拟的面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$, 且器件模型包

含 100000—150000 个网格点. 器件模拟使用 8 个线程并行计算, 平均一次模拟的时间大约为 16 h.

3 n^+ 深阱导致的 NPN 双极放大效应

3.1 n^+ 深阱对电荷共享的影响

使用三维器件模拟得到的从器件上的瞬时电流作为度量电荷共享强弱的指标. 三阱工艺中 NMOS 间电荷共享和 PMOS 间电荷共享的瞬时电流如图 3 中 TW_NMOS, TW_PMOS 曲线所示, NMOS 中从器件的瞬时电流的峰值为 122 μA , 而 PMOS 中从器件的瞬时电流的峰值为 29.7 μA .

作为对比, 我们构造了双阱工艺的器件模型并进行了电荷共享的器件模拟. 相比三阱工艺的器件模型, 双阱工艺中除了没有 n^+ 深阱其余设置与第 2 节中描述的完全一致. 该双阱工艺下 NMOS 间电荷共享和 PMOS 间电荷共享的瞬时电流如图 3 中 DW_NMOS, DW_PMOS 曲线所示, NMOS 中从器件的瞬时电流的峰值为 49.6 μA , 而 PMOS 中从器件的瞬时电流的峰值为 48.7 μA .

对比图 3 中的瞬时电流可以发现, 三阱工艺下 NMOS 间的电荷共享相比双阱工艺下有显著增强, 其峰值电流相比双阱工艺下增加了约 2.5 倍. 同时, 三阱工艺下的 PMOS 间的电荷共享相比双阱工艺下有一定的减弱.

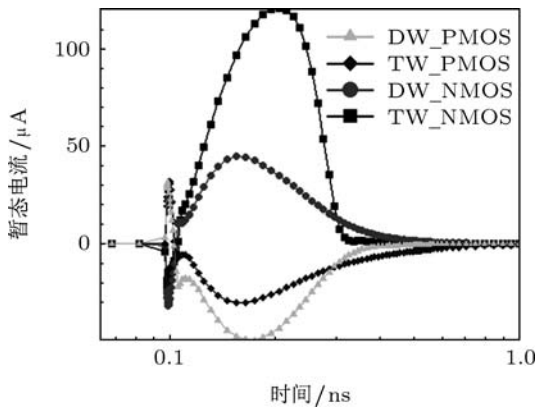


图 3 双阱和三阱工艺下电荷共享瞬时电流

电荷共享通过两种物理过程实现, 如图 4 所示: 一种是扩散, 粒子轨迹上的电荷横向扩散到从器件上, 被从器件直接收集; 另一种是双极效应, 粒子轨迹上的电荷使得漏/阱结和阱/衬底结坍塌, 导致晶体管体电势扰动, 从而寄生的双极型晶体管导通, 引起双极电流.

为了区分 n^+ 深阱对这两种物理过程的影响, 我们增加了一组新的模拟实验, 在该组中去除了晶体管的源结 (寄生双极型晶体管的发射极), 即只有栅极和漏结. 当体电势发生扰动时, 就不会有少子通过源结注入, 仅保留了扩散这一种电荷共享的物理过程. 考虑到普通的有源端器件的电荷收集即包含了扩散的成分, 又包含了双极放大的成分, 那么普通器件减去无源端器件的电流就是双极放大电流. 目前, 这一方法已被国际上很多学者都采用无源端器件来区分电荷共享收集中的扩散和双极放大效应 [4,9].

根据模拟得到的无源端器件和普通有源端器件模型的瞬时电流, 计算得到双阱工艺和三阱工艺中双极放大成分和扩散成分. 图 5 给了双阱工艺下扩散电流和双极放大电流的成分. NMOS 中扩散电流 (NMOS_DIFF 曲线) 占主要成分, 而双极放大电流 (NMOS_BIPO 曲线) 很小; PMOS 中扩散电流较小 (PMOS_DIFF 曲线), 而双极放大电流显著 (PMOS_BIPO 曲线), 这一现象与 Amusan 等人的研究结果一致 [4].

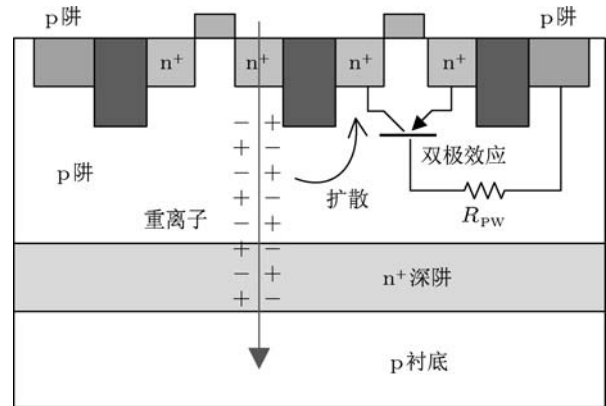


图 4 两种电荷共享的物理过程

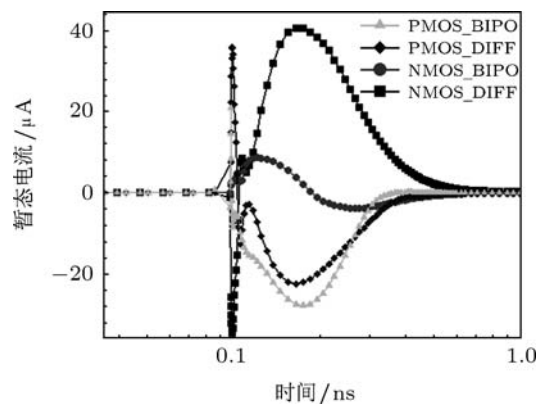


图 5 双阱工艺中的扩散电流和双极放大电流

图 6 给出了三阱工艺下扩散电流和双极放大电流的成分. 可以看出, 有 n^+ 深阱的三阱工艺下, 虽然 NMOS 中扩散电流 (NMOS_DIFF 曲线) 也较为明显, 但双极放大电流 (NMOS_BIPO 曲线) 更大, 其峰值达到了 $112 \mu\text{A}$, 约为扩散电流的 4.5 倍, 因此可以认为在三阱工艺下双极放大电流已经成为了电荷收集的主导. 相反, 三阱工艺下 PMOS 中扩散电流和双极放大电流都较小.

综上所述, 寄生的 NPN 双极型晶体管导通造成的双极放大效应是 n^+ 深阱引起的最显著的物理过程的变化, 其机理需要深入研究.

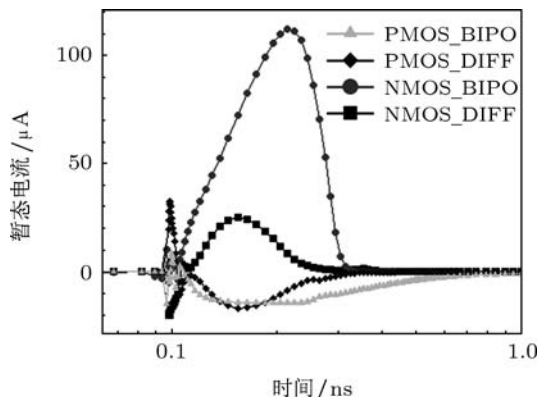


图 6 三阱工艺中的扩散电流和双极放大电流

3.2 寄生 NPN 双极晶体管增强电荷共享的机理

n^+ 深阱引起最显著的物理过程的变化是触发了寄生 NPN 双极型晶体管, 其物理机理可解释如下. 由于 p 阱通过深阱接触连接到 GND, 而 n^+ 深阱通过 n 阱和 n 阱接触间接连接到 VDD, 那么在 p 阱和 n^+ 深阱间将形成一个反偏的 pn 结. 当重离子入射半导体器件, 贯穿 p 阱和 n^+ 深阱, 其轨迹上的高浓度电子空穴对将导致反偏的 pn 结坍塌. p 阱接触到 n 阱接触间将形成一条从 VDD 到 GND 的通路, NMOS 的体区处于这一通路的中部. 考虑到电阻分压的作用, NMOS 体区电势将从原来的 GND 上升, 当其电势超过寄生 NPN 晶体管的开启电压时, 电子将从源极注入, 并被漏极吸收, 从而对漏极的电荷收集起到了放大作用.

为了验证以上分析正确性, 我们通过器件模拟得到了体电势在重离子入射后的电势变化情况, 其中体电势用器件栅下 $0.2 \mu\text{m}$ 处的体区电势来表征. 结果如图 7 所示, 重离子于 $1 \times 10^{-10} \text{ s}$ 时刻入射,

入射后体电势开始上升. 当体电势达到约 0.5 V 时, 寄生 NPN 型晶体管开启, 开始有源极注入的电子电流产生. 随着体电势的继续升高, 源极的注入电流也随之增大. 随着重离子轨迹上的电荷逐渐被收集完毕, p 阱和 n^+ 深阱间的势垒重新建立, 体电势也逐步恢复, 相应的源极注入电流开始减弱, 直至寄生 NPN 晶体管完全关断.

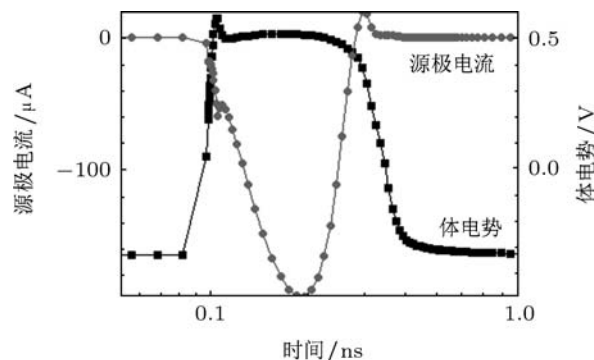


图 7 体电势和源极电流

以上的双极放大机理与双阱工艺下 PNP 型寄生晶体管的双极放大机理^[2]非常相似, 所不同的是双阱工艺中的寄生 PNP 晶体管是由于 n 阱与 p 衬底之间的反偏结坍塌触发, 而三阱工艺中的 NPN 晶体管是由于 p 阱与 n^+ 深阱间的反偏结坍塌触发. 在双阱工艺中, 由于 p 阱之下是 p 衬底, 二者都连接到 GND, 因此 NMOS 中几乎没有双极放大效应. 同理, 可以解释三阱工艺下 PMOS 间双极放大较弱的现象.

3.3 NPN 放大因子

使用放大因子 (enhancement factor) 来统一表征不同条件下双极放大的强弱, 其定义为总的收集电荷除以扩散收集电荷, 在本文中即有源端晶体管收集的电荷除以无源端晶体管收集的电荷.

我们使用器件模拟的方法分别得到了双阱工艺下 PNP 型寄生双极型晶体管和三阱工艺下 NPN 型双极型晶体管, LET 从 $10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 到 $60 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 范围内的双极放大因子, 如图 8 所示. 双阱工艺中 PNP 型晶体管的放大因子随着 LET 的增加从 2.15 降低到 1.43; 三阱工艺中 NPN 型晶体管的放大因子随着 LET 的增加从 8.23 降低到 3.54, 其值在整个 LET 范围内约为 PNP 型晶体管放大因子的 2—4 倍. 这一结果表明, n^+ 深阱的引入将会造成比普通双阱工艺更加

强烈的双极放大效应, 因此在抗辐照电路中要慎重使用.

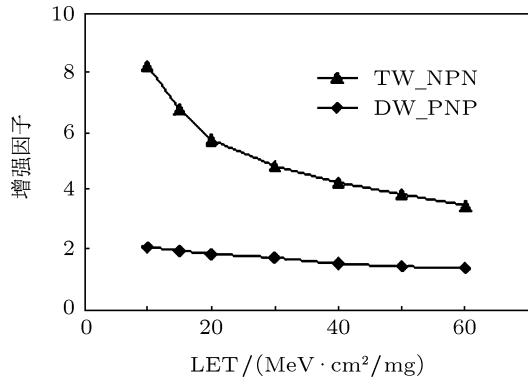


图8 NPN型寄生晶体管与PNP型寄生晶体管放大因子对比

NPN型晶体管的放大因子较大有两点原因: 首先, 放大因子主要取决于起主要导电作用的载流子的迁移率. NPN型晶体管的中导电主要依靠电子, 而PNP型晶体管的导电主要依靠空穴, 由于电子的迁移率高于空穴, 因此NPN型晶体管的放大因子天然就要高于PNP型晶体管. 其次, 在三阱工艺中对体电势的上拉扰动是通过n⁺深阱和n阱实现的, 由于n⁺深阱是高掺杂的, 相比双阱中通过衬底对体电势扰动的电阻更小, 因此三阱工艺中体电势扰动更大, 寄生NPN型晶体管的导通程度更高.

4 NPN 双极放大与阱接触

4.1 电阻通路

阱接触的形状和位置对寄生晶体管的导通有直接的影响. 如图9所示, 重离子轰击后将导致p阱和n⁺深阱间的势垒坍塌, 从p阱接触 → NMOS

的体区 → n⁺深阱 → n阱 → n阱接触间将会形成一条电阻通路, 该电阻通路上的分压将决定了NMOS体电势的扰动幅度, 从而影响寄生的NPN型晶体管的导通程度. 其中, 从NMOS的体区到p阱接触的路径构成了下拉电阻路径, 该电阻路径可以被分解为2独立的串联电阻, 水平的R₁和垂直的R₂. 阱接触相对于重离子轰击的位置将直接影响水平电阻R₁, 阱接触离重离子轰击位置越近则R₁越小. 阱接触的面积决定了垂直电阻R₂, 阱接触的面积越大则R₂越小. 类似的NMOS的体区到n阱接触的路径构成了上拉电阻路径, 可以分解为水平电阻R₃和垂直电阻R₄.

4.2 接触面积的关系

使用器件模拟的方法来分别研究n阱接触面积和p阱接触面积对寄生NPN晶体管放大因子的影响. 首先, 保持n阱接触的位置和面积不变, p阱接触的面积从0.05 μm²增加到1 μm², 在p阱接触的位置从0.28 μm到4 μm范围内分别模拟得到的放大因子结果如图10所示.

当p阱接触面积较小时放大因子较大, 随着p阱接触面积的增加, 放大因子下降. 这是因为p阱接触面积的增大导致垂直电阻R₂减小, 体区上的电阻分压随之减小, 从而有利于体电势的稳定. 当p面积超过0.6 μm²时, 随着p阱面积的进一步增加, 放大因子的降低则不太明显了, 因为p阱电阻构成的纵向电阻R₂成为了主导. 类似的, 当p阱接触距离NMOS器件较小时放大因子较小, 随着p阱接触距离的增加, 放大因子增加. 这是因为p阱距离的增大导致R₁电阻的增大, 体区上的电阻分压增加, 从而不利于体电势的稳定.

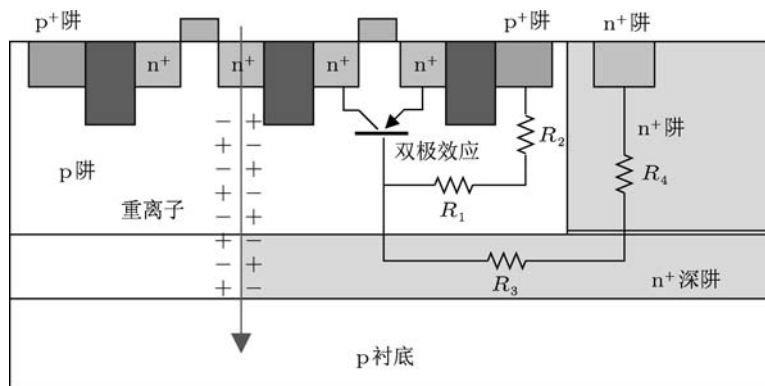


图9 电阻通路

保持 p 阱接触的位置和面积不变, n 阱接触的位置从距离 NMOS 器件 $0.7 \mu\text{m}$ 增加到 $4 \mu\text{m}$, 而 n 阱接触的长度的面积从 $0.05 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1 \mu\text{m}^2$. 通过器件模拟得到的放大因子结果如图 11 所示.

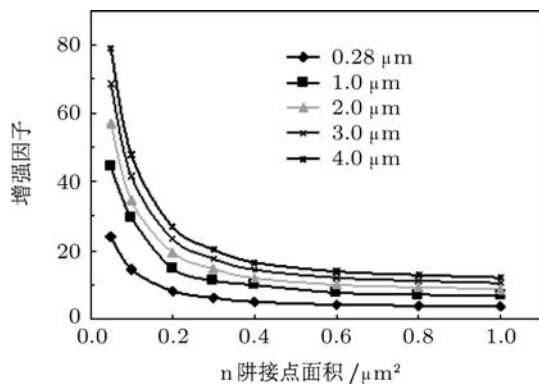


图 10 不同位置和面积的 p 阱接触对放大因子的影响

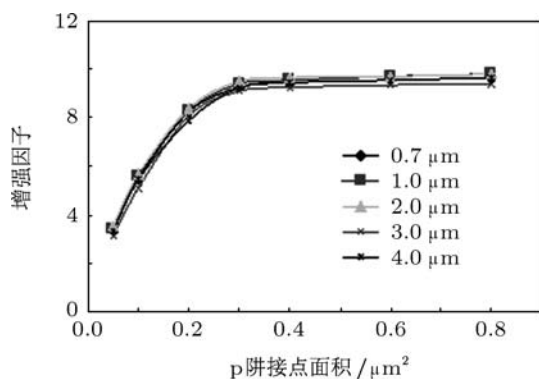


图 11 不同位置和面积的 n 阱接触对放大因子的影响

当 n 阱接触面积较小时放大因子较小, 其趋势与 p 阱接触的趋势恰恰相反, 随着 n 阱接触面积的增加, 放大因子也随之增加. 这是因为 n 阱接触面积的增大导致垂直电阻 R_4 减小, 体区上的电阻分

压随之增加, 从而增强体电势的扰动. 文献 [15] 中提出, 在双阱工艺中增大 n 阱接触的面积有利于抑制双极放大从而对单粒子效应起到加固作用. 本文的研究表明, 在具有 n^+ 深阱的三阱工艺中其效果则可能相反. 因此, 增加阱接触面积的加固方法需要根据工艺条件慎重选用.

与 p 阱接触不同的是, n 阱接触的距离对放大因子的影响很小, 当 n 阱接触与器件的距离从 $0.7 \mu\text{m}$ 增加到 $4.0 \mu\text{m}$ 时, 放大因子几乎保持不变. 其原因在于横向电阻 R_3 由高掺杂的 n^+ 深阱构成, 其阻值远小于纵向电阻 R_4 . 虽然随着距离的增加 R_3 会有所增加, 但增加的阻值对整个上拉通路的影响很小.

5 结论

本文研究了带有 n^+ 深阱的 90 nm CMOS 三阱工艺中寄生的 NPN 双极晶体管及其对电荷共享的影响. 通过 TCAD 3 维模拟, 发现在重离子辐照下, n^+ 深阱将会触发寄生的 NPN 双极晶体管导通, 从而显著增强 NMOS 间的电荷共享, 其放大因子约为双阱工艺中寄生 PNP 双极晶体管的 2—4 倍. 这一结果表明, 在抗辐照集成电路的设计中 n^+ 深阱的使用要非常谨慎.

本文研究了 p 阱接触和 n 阱接触对 NPN 双极放大的影响. 结果表明增大 p 阱接触和减小 p 阱接触的距离有助于抑制 NPN 双极放大效应, 增大 n 阱接触的面积将增强 NPN 双极放大效应. 考虑到增加阱接触面积是抑制 SEL 和 SET 的常用手段之一, 那么本文的结果表明在三阱工艺下这一加固手段需要根据工艺条件慎重选择.

[1] Zoutendyk J A, Schwartz H R, Nevill L R 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1644
 [2] Olson B D, Ball D R, Warren K M, Massengill L W, Haddad N F, Doyle S E, McMorrow D 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2132
 [3] Olson B D, Amusan O A, Sandeean Dasgupta, Massengill L W, Witulski A F, Bhuvu B L, Alles M L, Warren K M, Ball D R 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 894
 [4] Amusan O A, Witulski A F, Massengill L W, Bhuvu B L, Fleming P R, Alles M L, Sternberg A L, Black J D, Schrimpf R D 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3253
 [5] Amusan O A, Massengill L W, Baze M P, Bhuvu B L, Witulski A F, Black J D, Balasubramanian A, Casey M C, Black D A, Ahlbin

J R, Reed R A, McCurdy M W 2009 *IEEE Trans. Dev. Mat. Rel.* **9** 311
 [6] Nelson J Gaspard III 2010 *Ma. Dissertation* (Tennessee, Nashville: Vanderbilt University)
 [7] Liu F Y, Liu H Z, Liu B W, Liang B, Chen J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046106 (in Chinese) [刘凡宇, 刘衡竹, 刘必慰, 梁斌, 陈建军 2011 物理学报 **60** 046106]
 [8] Amusan O A, Casey M C, Bhuvu B L, McMorrow D, Gadlage M J, Melinger J S, Massengill L W 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3065
 [9] Liu B W, Chen S M, Liang B, Liu Z, Zhao Z Y 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 2473

- [10] Gasiot G, Giot D, Roche P 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2468
- [11] Giot D, Philippe Roche, Gilles Gasiot, Reno Harboe-Sørensen 200 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 904
- [12] Giot D, Philippe Roche, Gilles Gasiot, Jean-Luc Autran, Reno Harboe-Sørensen 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2408
- [13] Ahlbin J R, Bhuvu B L, Gadlage M J, Massengill L W, Narasimham B, Eaton P H 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3050
- [14] Liu Z, Chen S M, Liang B, Liu B W, Zhao Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **60** 649 (in Chinese) [刘征, 陈书明, 梁斌, 刘必慰, 赵振宇 2010 物理学报 2010 **59** 649]
- [15] Ahlbin J R, Gadlage M J, Ball D R, Witulski A W, Bhuvu B L, Reed R A, Vizkelethy G, Massengill L W 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3380

NPN bipolar effect and its influence on charge sharing in a tripe well CMOS technology with n^+ deep well*

Liu Bi-Wei[†] Chen Jian-Jun Chen Shu-Ming Chi Ya-Qin

(Computer School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 29 June 2011; revised manuscript received 28 August 2011)

Abstract

In this paper, we investigate the charge sharing collection induced by heavy ion radiation in a tripe well CMOS technology with n^+ deep well through 3-D TCAD device simulation. Result shows that n^+ deep well will induce the parasitical NPN bipolar transistor, and therefore enhance the charge sharing between NMOS remarkably. The enhancement factor is 2—4 times that in PNP bipolar in dual well technology. Furthermore, the effects of n-well contact and p-well contact on NPN bipolar are studied. The result shows that the NPN bipolar enhancement factor will decrease with the increase of p-well contact area and with the decreasing of its distance to device, while the NPN bipolar enhancement factor will increase with the increase of n-well contact area.

Keywords: charge sharing, SEE, n^+ deep well, bipolar amplification effect

PACS: 61.80.Jh, 85.30.Tv, 43.30.Hw

* Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60836004, 60906014), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61006070), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of the Education Ministry, China (Grant No. 20104307120006).

[†] E-mail: liu.biwei@163.com