

高压偏移栅 P 沟 MOSFET 的电离辐照性能研究

严荣良 高文钰 张国强 余学锋

罗来会 任迪远

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

赵元富 李荫波

(骊山微电子公司 临潼 710600)

摘要 详细研究了高压偏移栅 P 沟 MOSFET 在 Co^{60} - γ 辐照下击穿电压随辐照剂量的变化关系。结果表明: 击穿电压的辐照剂量响应与漂移区杂质面密度、漂移区长度、场板长度以及漏区结构有关。另外, γ 辐照导致导通电阻增加。结果证实了我们以前提出的电离辐照引起击穿电压变化的机制。对实验现象给出了比较圆满的解释。结论对研制电离辐射加固高压偏移栅 P 沟 MOSFET 具有重要的指导作用。

EEACC: 2560R, 2530F

1 引言

近年来, 高压集成电路 (HVICs) 技术取得了飞速发展^[1]。1980 年即已研制出了击穿电压为 250V, 最大工作电流为 12A 的高压偏移栅 CMOS 反相器^[2]。由于高压集成电路将高压器件与低压控制电路集成到同一芯片中, 因此在军事和卫星上具有更广泛的应用前景。而卫星和军用电子系统一般处于辐射环境下工作, 因此有必要对这类器件的电离辐射损伤进行研究, 从而为研制抗辐射高压器件和集成电路提供必要的依据。

高压偏移栅 MOSFET 是高压集成电路中的基本结构。以往在研究常规低压 MOSFET 电离辐照效应时发现, 阈值电压漂移是器件最主要的参数退化, 其原因是电离辐照在栅氧化层内引起氧化物正电荷增加以及在 Si/SiO₂ 界面引起界面态增长^[3]。因此, 低压 MOS 器件的加固主要集中于栅介质方面^[4]。我们对高压偏移栅 MOSFET 进行 Co^{60} - γ 辐照研究后发现^[5,6], 除了引起阈电压漂移外, 击穿电压会发生漂移, 导通电阻也会增加。

本文主要对高压偏移栅 P 沟 MOSFET 的击穿电压随辐照剂量的变化进行研究。实验样品包括不同漂移区杂质面密度、漂移区长度以及不同漏区结构的 MOSFET。同时也

对 γ 辐照后导通电阻的变化进行了研究。实验结果进一步验证了我们以前提出的电离辐照引起击穿电压变化的机制,得到的结论也是研制抗电离辐射高压偏移栅 P 沟 MOSFET 必须加以考虑的因素。

2 实验方法

实验样品用电阻率为 $17\sim 27\Omega\cdot\text{cm}$ 的(100) n 型硅衬底制得,在干氧加 HCl 气氛中生长栅氧化层,氧化温度为 1000°C ,生成的栅氧化层厚度为 100nm 和 70nm 两种。场氧由水汽氧化生成,氧化温度为 1020°C ,厚度约 $1\mu\text{m}$ 。结构示意图见文献[5—7]。为了提高漏结击穿电压,漏区引入轻掺杂深阱。在栅与漏区之间离子注入形成轻掺杂层作为漂移区,同时采用了场板结构以降低栅端附近的峰值电场从而提高器件的击穿电压^[2,8]。场板材料有多晶硅和铝两种,多晶硅场板是直接位于漂移区上方的,在场氧表面延伸多晶硅栅形成,铝场板则是通过延伸源极形成,前者有利于降低导通电阻。实验样品包括了不同漂移区杂质面密度 N_{DT} 、漂移区长度 L_{R} 以及不同场板长度 L_{F} 的 P 沟偏移栅 MOSFET。为了研究对照,实验中也采用了无漏区深阱和无场板样品。

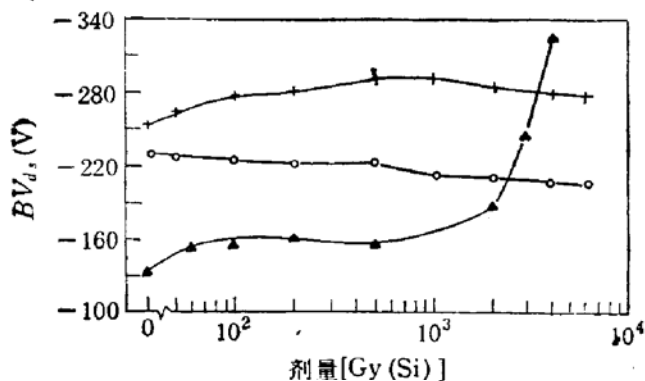


图1 无场板高压偏移栅 PMOSFET 漂移区杂质面密度与击穿电压总剂量响应的关系

无场板 $L_{\text{R}} = 60\mu\text{m}$ $d_{\text{ox}} = 100\text{nm}$ 导通偏置。
 N_{DT} : $\circ$ — $0.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$; $+$ — $1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$;
 $\blacktriangle$ — $2.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$

采用 $\text{Co}^{60}\text{-}\gamma$ 作为电离辐照源,剂量率在 $1\sim 60\text{ Gy}(\text{Si})/\text{min}$ 范围内。辐照偏置有两种,导通偏置 ($V_{\text{ds}} = 0\text{V}$, $V_{\text{gs}} = -10\text{V}$) 和截止偏置 ($V_{\text{ds}} = -100\text{V}$, $V_{\text{gs}} = 0\text{V}$)。器件参数测试在辐照后 30 分钟内完成,测试及辐照环境温度为 $20\sim 26^\circ\text{C}$ 。击穿电压是取截止状态下 ($V_{\text{gs}} = 0\text{V}$) 漏源电流为 $10\mu\text{A}$ 时所对应的漏源电压,其误差小于 0.2V 。实验表明,辐照前后器件的漏电流远小于 $1\mu\text{A}$ 。导通电阻由漏源偏压 $V_{\text{ds}} = -0.1\text{V}$ 时的转移特性曲线求得。

3 实验结果与讨论

3.1 漂移区杂质面密度对击穿电压辐照性能的影响

图1给出了三种漂移区杂质面密度器件的击穿电压随辐照剂量的变化关系,其中样品均无场板。从图中可以看出,击穿电压的初始值及其随剂量的变化与漂移区杂质面密度 N_{DT} 有密切关系。当 N_{DT} 为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时,击穿电压初始值最大,随着剂量的增加,击穿电压增大,但在 $1000\text{Gy}(\text{Si})$ 以后,击穿电压随剂量的增加而下降;当 N_{DT} 为 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时,击穿电压随剂量的增加而增大;而当 N_{DT} 为 $0.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时,击穿电压随剂量的增加而趋减小。

Okabe 等人曾研究过击穿电压与漂移区杂质面密度的关系^[2]。结果表明,无论是有场

板还是无场板的偏移栅 MOSFET, 都存在最佳漂移区杂质面密度, 约为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$, 此时整个器件的表面和体内电场最均匀, 因此击穿电压最大。当漂移区杂质面密度小于最佳值时, 将在漏区深阱前沿附近呈现较大的电场强度峰值并发生雪崩击穿; 当 N_{DT} 大于最佳值时, 将在栅极附近产生大的电场强度峰值, 使在较小漏源电压下易发生雪崩击穿。

众所周知, 电离辐照会使 MOS 器件栅氧化层内产生氧化物正电荷和界面态, 这是 MOS 器件在电离辐射环境下性能退化的主要原因。电离辐照同样也在场氧化层内产生辐照电荷(氧化物电荷与界面态电荷增长总和)。对偏移栅 MOSFET, 漂移区上方存在较厚的场氧化层, 由于辐照电荷的产生随氧化层厚度的增加而增加, 并且场氧化工序(水汽氧化)能引入较多的电离陷阱, 因而电离辐照会在场氧层内产生相当多的辐照电荷, 且氧化物电荷占主导(对厚氧化层)。氧化物电荷是正电荷, 它们使漂移区(P 型)表面空穴耗尽, 等效为漂移区表面杂质面密度降低, 使得器件表面及体内电场强度分布发生变化。随着辐照剂量的增加, 辐照电荷产生得越多, 场强分布改变得越大。这就是辐照引起偏移栅 MOSFET 击穿电压变化的主要机制^[5,6]。当漂移区杂质面密度 N_{DT} 为 $0.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$, 小于最佳值 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时, 辐照使有效 N_{DT} 减小, 更加偏离了最佳值, 结果漏极附近场强增大, 击穿电压 BV_{ds} 下降; 对 N_{DT} 为 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 的器件, 辐照使漂移区有效杂质面密度减小并向最佳值靠近, 栅附近电场峰值下降, 因此击穿电压随剂量增加而增加; 对 N_{DT} 为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 的器件, 剂量为 1000 Gy(Si) 时击穿电压出现最大值, 此时漂移区有效杂质面密度等于最佳值, 大于 1000 Gy(Si) 以后, 由于辐照电荷继续增加, 有效杂质面密度减小, 故击穿电压随剂量增加开始逐渐下降。

3.2 与漏扩散区结构的关系

图 2 给出了漏扩散区有无轻掺杂深阱的器件的击穿电压随剂量变化关系。

图中表明, 漂移区杂质面密度为 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时, 有无深阱器件的击穿电压在任何辐照剂量点都基本相同。其原因是击穿始终发生在栅极附近, 漏区结构对电场分布并无影响。当漂移区杂质面密度为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时, 漏区结构对击穿电压的辐照响应产生影响。当剂量小于 100 Gy(Si) 时, 两种漏区结构器件的击穿电压相同, 其原因与上述一样, 即击穿发生在栅极附近。当剂量大于 100 Gy

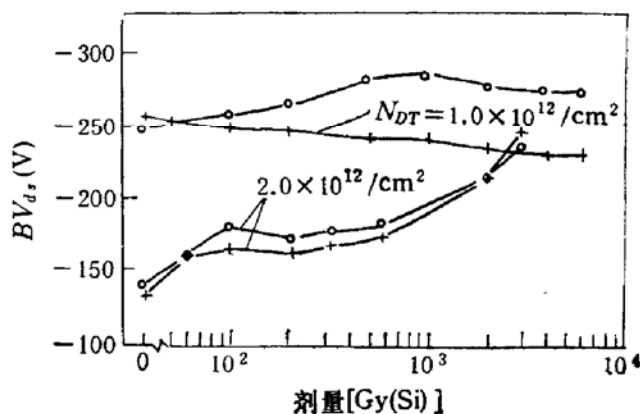


图 2 轻掺杂深扩散漏区对击穿电压总剂量响应的影响

(无场板 $L_{\text{R}} = 45 \mu\text{m}$ $d_{\text{ox}} = 100 \text{nm}$ 导通偏置)

○——有深阱漏 +——无深阱漏

(Si) 后, 有深阱器件的击穿电压比无深阱的要大, 这是因为辐照剂量增大, 使有效杂质面密度进一步减小, 漏区附近的电场峰值增大, 相应击穿点移向漏极附近。对于漏区无深阱的器件, 由于漏结本身固有的击穿电压低, 器件就容易在较低的漏源电压下被击穿。

3.3 场板的作用

图 3 给出了其它工艺条件相同时, 场板对击穿电压辐照变化的影响。对漂移区杂质面密度为 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 的器件, 有场板时击穿电压在任何一个剂量点都要比无场板时大。

这是因为对 N_{DT} 大于最佳值的器件, 其击穿发生在栅区附近, 加场板后, 使得栅极边缘

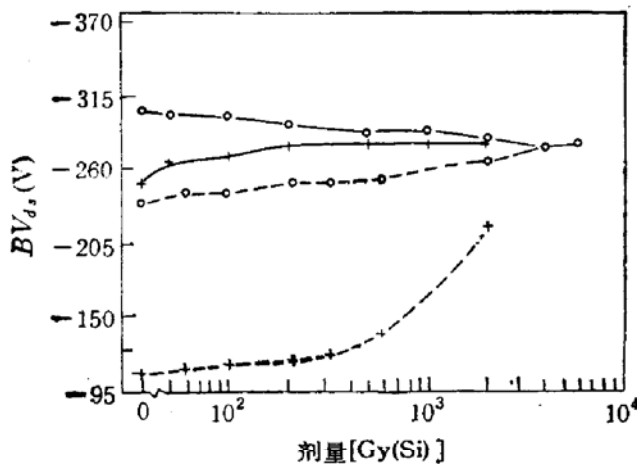


图3 多晶硅场板对击穿电压总剂量响应的影响
($L_R = 100\mu\text{m}$ $L_F = 50\mu\text{m}$ $d_{ox} = 100\text{nm}$ 导通偏置
○——有场板 +——无场板 ———— $N_{DT} = 1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$
----- $N_{DT} = 2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$

增加而变化。分析认为, 当 L_R 增大时, 栅漏之间的表面电场会降低, 因此击穿电压随 L_R 增大而增大, 当 L_R 大于 $45\mu\text{m}$ 以后, 尽管表面场强进一步减小, 但由于漏结本身固有的击穿电压与漏扩散区工艺参数有关, 与 L_R 大小无关, 因此器件击穿电压受到了限制, 不再随 L_R 增加而增大。对于本文的实验器件, 从提高击穿电压及其抗辐照性能的角度来讲, L_R 取 $45\mu\text{m}$ 较为合适。 L_R 不能取得太大, 因为大 L_R 会使导通电阻增大, 且会降低器件的集成度, 同时又不能增大器件的击穿电压。

3.5 与场板长度的依赖关系

场板会减小其下面漂移区的表面电场强度, 从而有利于提高器件的击穿电压及其抗辐照性能。场板的长度也会影响器件的击穿电压及其辐照响应, 实验结果如图5所示。样品的漂移区长度均为 $45\mu\text{m}$ 。十分明显, 当场板长度为 $15\mu\text{m}$ 时, 击穿电压初始值最大, 在 $1000\text{Gy}(\text{Si})$ 和 $5000\text{Gy}(\text{Si})$ 辐照后, 对场板长度大于 $15\mu\text{m}$ 的器件其击穿电压减小, 初始值亦较小; 无场板和 $5\mu\text{m}$ 场板器件, 击穿电压在辐照后增加, 但初始值较小。因此长度为 $15\mu\text{m}$ 的场板对于提高 $45\mu\text{m}$ 长度漂移区的偏移栅 MOSFET 的击穿电压及其抗辐照性能最佳。

击穿电压对 L_F 的依赖关系可作如下解释, 当 L_F 很小时, 尽管场板下的场强被减小, 但场板边缘的场强仍很大, 因此这时击穿电压随 L_F 的增大而增大; 当 L_F 大于 $15\mu\text{m}$ 时, 场板边缘到漏极之间的表面场强会增大, 从而击穿电压随 L_F 的增大而减小。

附近场强下降, 故使击穿电压提高。对 N_{DT} 为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 的器件, 剂量小于 $2000\text{Gy}(\text{Si})$ 时, 击穿发生在栅区附近, 加场板后击穿电压提高; 但当剂量大于 $2000\text{Gy}(\text{Si})$ 后, 由于击穿点移向漏极, 故远离漏极的场板不再起降低场强的作用, 此时击穿电压与无场板器件相同。

3.4 与漂移区长度的依赖关系

如图4所示, 击穿电压的辐照变化与漂移区长度 L_R 密切相关。当 L_R 小于 $45\mu\text{m}$ 时, 辐照前后击穿电压都随 L_R 的增大而增大; 但当 L_R 在 $45-100\mu\text{m}$ 范围内时, 击穿电压几乎不再随 L_R 的

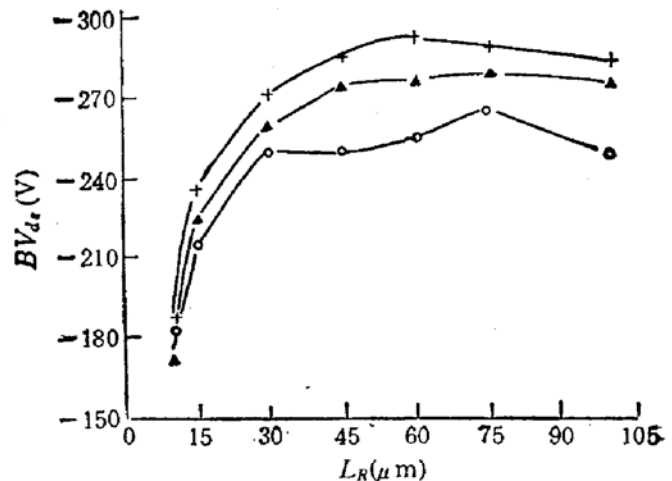


图4 电离辐照前后击穿电压与漂移区长度的依赖关系
(无场板 $N_{DT} = 1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ $d_{ox} = 100\text{nm}$ 导通偏置

○——辐照前 +—— $1000\text{Gy}(\text{Si})$ ▲—— $6000\text{Gy}(\text{Si})$

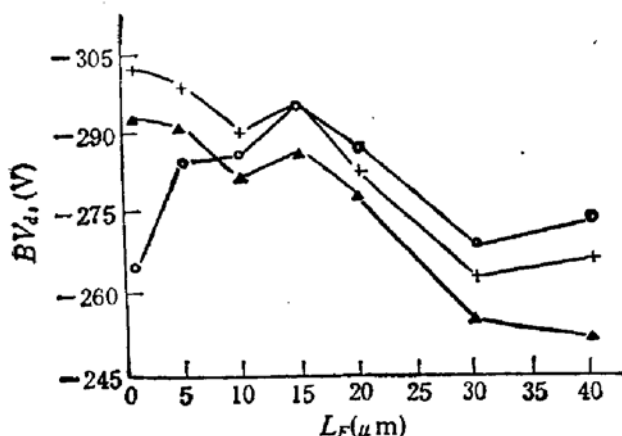


图 5 电离辐照前后, 击穿电压与场板长度的关系
(铝场板 $L_R = 45 \mu\text{m}$ $N_{DT} = 1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ $d_{ox} = 70\text{nm}$ 截占偏置 $\circ$ ——辐照前 $+$ ——1000Gy(Si)
 $\blacktriangle$ ——5000Gy(Si))

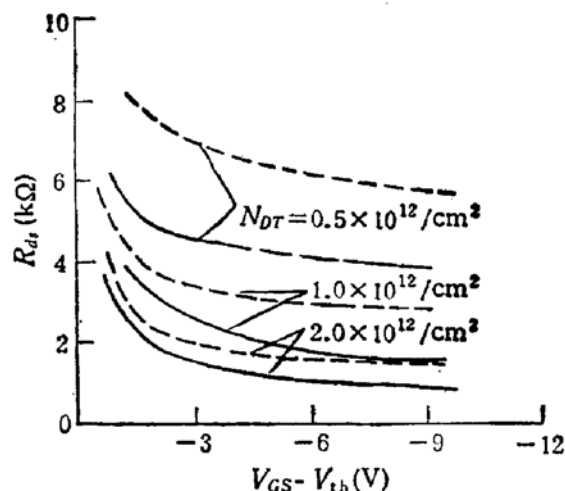


图 6 不同漂移区杂质面密度的 PMOS 场板器件在辐照前后漏源阻抗与栅源电压的关系
($L_P = 15 \mu\text{m}$ $L_R = 45 \mu\text{m}$ $d_{ox} = 100\text{nm}$ 所有管脚接地——辐照前 ---2000Gy(Si))

3.6 辐照引起导通电阻增加

图 6 给出了辐照前后三种漂移区杂质面密度样品的漏源电阻 R_{ds} 与栅源电压的关系曲线, 辐照时所有管脚接地。从图中可以看出, 辐照后三种器件的导通电阻都增加了。由于导通电阻为沟道电阻与漂移区电阻之和, 当栅源电压较大时, 沟道电阻可以忽略, 漏源电阻近似为漂移区电阻, 因此导通电阻增加实际上主要来自漂移区电阻的增加。其原因与击穿电压变化的原因相同, 即辐照在漂移区上方的场氧化层内产生辐照电荷使漂移区表面耗尽, 漂移区有效杂质面密度下降, 导通电阻增加。这种效应对于辐照环境中的高压或功率偏移栅 MOSFET 必须予以重视, 因为导通电阻增大增加了器件的功耗。

4 结论

综上所述, 本文通过大量实验, 证实了高压偏移栅 P 沟 MOSFET 击穿电压随辐照剂量变化的机制, 即辐照在场氧化层内产生辐照电荷(氧化物电荷与界面态电荷之和), 使漂移区表面耗尽, 相应改变了表面与体内的电场分布。辐照引起导通电阻增加也是因为辐照电荷引起漂移区表面耗尽, 使漂移区有效杂质面密度下降, 电阻率升高。为了抑制电离辐照环境下偏移栅 P 沟 MOS 器件击穿电压变化和导通电阻增加, 必须采用加固工艺生成场氧化层, 从而减少辐照电荷的产生。

另一方面, 实验证实了击穿电压随剂量的变化规律与器件参数及结构有密切关系, 这在研制抗电离辐射高压偏移栅 MOS 器件时必须予以考虑。

(1) 漂移区杂质面密度对辐照前后的击穿电压有很大影响。电离辐照使漂移区有效杂质面密度减小。在最佳漂移区杂质面密度时, 击穿电压初始值最大, 但辐照后击穿电压下降; 小于最佳面密度时, 击穿电压随剂量增加而下降; 大于最佳面密度时, 击穿电压随剂量增加而升高。

(2) 轻掺杂深扩散漏阱可提高漏结固有击穿电压, 因此有利于提高器件的击穿电压

及其抗辐照性能。

(3) 漂移区长度应合理选择。漂移区较长时,有利于减小表面电场,提高器件的击穿性能,但由于漏结固有击穿电压的限制,器件的击穿电压不会随漂移区长度增加而无限增加。另外,漂移区加长会引起导通电阻增加和器件集成度降低。

(4) 场板有利于降低栅边缘的电场强度,有利于提高器件的击穿电压及其抗辐照性能。场板太短时,场板前沿场强仍较大,场板太长,场板与漏之间的表面横向电场会加大。因此要合理选择场板长度。对于本工作, $45\mu\text{m}$ 长的漂移区和 $15\mu\text{m}$ 长的场板为最佳参数。

从本文还可以看出,要深入研究高压偏移栅 P 沟 MOSFET 电离辐照引起击穿电压变化的机制以及设计抗辐射加固器件,需要结合计算机模拟。

致谢 作者对本所贾志博、范隆同志在本实验中给予的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] B. J. Baliga. IEEE Trans. Electron Devices, 1986, ED-33: 1936.
- [2] T. Okabe, *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27: 334.
- [3] 高文钰等,半导体学报,1992,13(8): 475.
- [4] 宋钦歧,李德孚,电子学抗核加固基础,北京: 原子能出版社,1986,103.
- [5] 赵元富等,抗核加固,1990,7(3): 24.
- [6] 高文钰等,核技术,1993,16(1): 1.
- [7] 赵元富等,微电子学与计算机,1989,6(4): 1.
- [8] S. Ochi, *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27: 399.

Study of Ionizing Radiation Effects on Breakdown Voltage of High Voltage Offset-Gate P-channel MOSFETs

Yan Rongliang, Gao Wenyu, Zhang Guoqiang, Yu Xuefeng,
Luo Laihui, Ren Diyan

(Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

Zhao Yuanfu and Li Yinbo

(Lishan Microelectronics Incorporation, Lintong 710600)

Abstract The effects of total dose exposure on the breakdown voltage of high voltage offset-gate P-channel MOSFETs, under ^{60}Co irradiation are investigated. The results have shown that the total dose response of breakdown voltage is greatly dependent on the doping concentration in drift region, drift region length and field plate length, as well as the drain structure. In addition, on-resistance of drift region is increased after Gamma ray irradiation. From the experimental results, it is demonstrated that the mechanism of the change in breakdown voltage of offset-gate P-channel MOSFETs following irradiation proposed by us is valid. The experimental phenomena have been explained completely. The conclusions are useful for fabricating radiation hardened high voltage offset-gate P-channel MOSFETs.

EEACC: 2560R, 2530F