

注 F CC4007 电路的电离辐射效应

张国强 严荣良 罗来会 余学峰 任迪远

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

赵元富 胡浴红

(西安微电子技术研究所 临潼 710600)

摘要 本文分析研究了用注 F 工艺制作的 CC4007 电路 $Co^{60}\gamma$ 辐照响应结果. 实验表明, 把适量的 F 引入栅介质, 能明显减少辐射感生氧化物电荷积累和界面态的增长, 从而引起较小的阈值电压漂移和 N 沟静态漏电流的增长. 器件导电类型和辐照栅偏压不改变注 F 栅介质的抗辐照特性. 注 F 栅介质辐照敏感性的降低可归结为 F 能减小 Si/SiO₂ 界面应力, 并部分替换在辐照场中易成为电荷陷阱的应力键和弱键等的缘故.

EEACC: 2550E, 2560R; PACC: 7340Q

1 引言

在电离辐射环境中的 CMOS 器件, 其阈值电压漂移和静态漏电流的增加是器件参数退化以致失效的一个重要模式. 导致参数退化的主要原因是辐射引起的 SiO₂ 栅氧化层内氧化物电荷积累和 Si/SiO₂ 界面态的生长. 因此, 要提高器件抗电离辐射能力, 必须寻求抑制界面态增长和氧化物电荷积累的新工艺、新结构和新栅场介质, 这也是当前国际上十分重视的前沿课题.

据国外八十年代末报道, 把适量的 F 引入 MOS 栅介质, 具有减少沟道热载流子损伤和改善介质电学特性等优点^[1~3], 但这些研究主要侧重于机理探讨和理论预测, 关于注 F 栅介质的总剂量效应却很少报道, 尤其是注 F 对 CMOS 电路抗辐射加固方面的影响, 还未见报道.

近年来, 我们较系统地进行了注 F 新栅场介质抗电离辐射效应和机理的探讨研究^[4~7],

张国强 男, 1962 年生, 副研究员, 从事 MOS 新栅场介质的辐射效应和机理的研究

严荣良 男, 1935 年生, 研究员, 从事抗辐射 LSI 机理和加固的研究

赵元富 男, 1962 年生, 高工, 从事抗辐射 LSI 工艺制备研究

1994 年 8 月 6 日收到初稿, 1994 年 11 月 7 日收到修改稿

并获得抑制辐射损伤的最佳注 F 工艺条件. 在实验中, 我们发现, 注 F 层面、能量、剂量、F 注入退火、光刻前后注 F、栅氧化方式、多晶硅掺杂方式等, 强烈制约着注 F 栅介质的抗电离辐射特性.

本文报道了用注 F 工艺条件制备的 CC4007 电路, 在不同 γ 辐照栅偏置下的辐射响应行为规律, 发现栅介质中 F 的引入能明显提高电路抗总剂量辐照水平. 这对于获得抗高电离辐射高可靠的加固电路都是非常重要的.

2 样品制备及测试

实验所用样品为 Si 栅 CC4007 双互补对加反相器, 如图 1 所示. 制作在 $3\sim 4\Omega\cdot\text{cm}$ 的

N 型(100)硅衬底上, 每个 MOSFET 的沟道长为 $10\mu\text{m}$, 宽长比不等. 栅氧化工艺为高温 $\text{H}_2 + \text{O}_2$ 合成氧化, 栅氧化层厚度为 50nm , 多晶硅厚 500nm , 芯片封装在 14 脚双列直插式的管壳内.

注 F 工艺是栅氧化再淀积 500nm 多晶硅后, 注入 30keV 的 F 离子, F 注入剂量 $1\times 10^{16}\text{F}/\text{cm}^2$, 注 F 后于高温 N_2 中退火 30 分钟.

CC4007 电路辐照期间的偏压为 $V_{\text{dd}}=10\text{V}$, $V_{\text{ss}}=0\text{V}$, 第一、二互补对接成反相器, 输入端

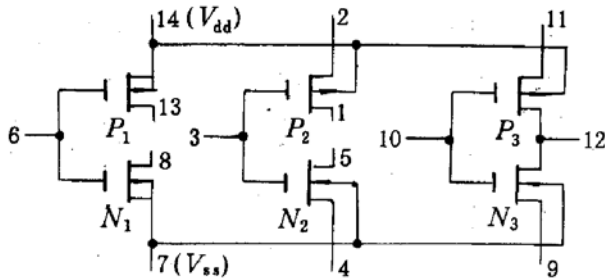


图 1 CC4007 电路的结构示意图

$V_{\text{in1}}=V_{\text{in2}}=10\text{V}$, 第三对反相器 $V_{\text{in3}}=0\text{V}$, 从而构成 CC4007 电路 N 沟和 P 沟 MOSFET 的四种辐照偏置状态 P(on)、P(off)、N(on) 和 N(off). 辐照在新疆物理所 Co^{60} 源上进行, 剂量率范围为 $1.17\times 10^3\sim 2.67\times 10^4\text{rad}(\text{Si})/\text{min}$, 辐照后 20 分钟内测完全部数据.

MOSFET 的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ 亚阈特性测试由 HP4140、HP3488、IBM-PC/XT 等组成的测试系统完成. 阈电压测试采用恒流注入法(即灌注 $I_{\text{ds}}=10\mu\text{A}$ 时所对应的 V_{gs} 值即为阈电压)而获得. 对于静态漏电流, 测量了所有栅极 V_{in} 加 0V 和 10V 两种电平所对应的 N 沟和 P 沟总漏电流.

采用亚阈技术计算了平均界面态密度 $D_{\text{it}}^{[8,9]}$. 根据“stretch out”分离技术^[10]得到辐射感生氧化物电荷密度 ΔN_{ot} 为 $\Delta N_{\text{ot}}=(C_{\text{ox}}/q)|\Delta V_{\text{mg}}|$. 式中, C_{ox} 为单位面积的栅氧化层电容; q 为电子电荷; V_{mg} 为相应 Si 表面势等于 φ_{B} 时的中带电压.

3 实验结果及讨论

3.1 F 的纵向分布

用 SIMS 法获得的 F^{19} 在注入退火前后的纵向分布如图 2 所示. 试验条件为, 一次束: Cs^+ 离子, 能量 15keV , 扫描 $250\times 250\mu\text{m}^2$, 束流 15nA . 二次束: 负离子, 能量 4.5keV , 分析区直径 $60\mu\text{m}$. 真空度小于 $1.3\times 10^{-6}\text{Pa}$.

由图可见, 30keV F 注入多晶硅后, 退火前, 注入多晶硅的 F 大部分堆积在多晶硅层内, 退火后, F 在热激扩散作用下, 穿过多晶硅进入到 SiO_2 栅氧化层内, 并在 Poly Si/ SiO_2 和

Si/SiO₂ 二界面处形成峰值。

上述结果清楚表明,为了使 F 进入 SiO₂ 栅介质并产生辐射加固作用,必须进行适量的注入退火.退火作用主要包括三方面:1)消除注入工艺本身对多晶硅和栅介质的损伤,2)把大部分 F 扩散到 SiO₂ 栅介质中,3)在高温作用下促使 F 替代对辐射敏感的 Si-OH、Si-H 弱键或 Si-O 应力键,与 Si 结键。

3.2 阈电压

图 3 和图 4 分别表示的是未注 F 和注 F 剂量为 $1 \times 10^{16} \text{F/cm}^2$ 的 CC4007 电路,两种不同辐照栅偏置的 P 沟和 N 沟 MOSFET 阈电压随辐照总剂量的依赖关系。

分析图中数据可得:

1)所有 P 沟 MOSFET 的阈电压都随辐照总剂量的增加而负向漂移,但注 F 样品的漂

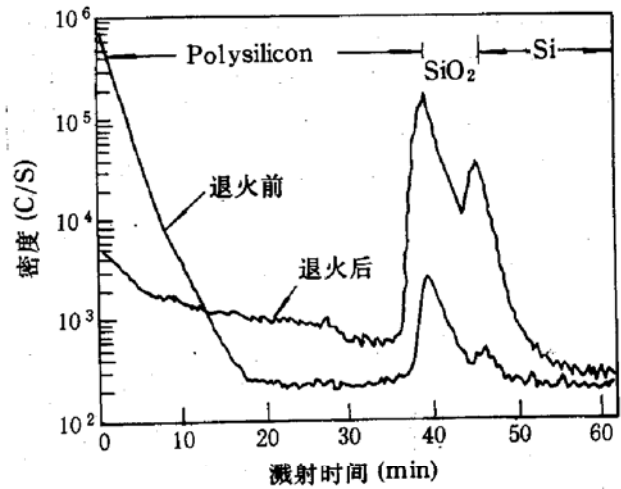


图 2 用 SIMS 法获得的 F 的纵向分布

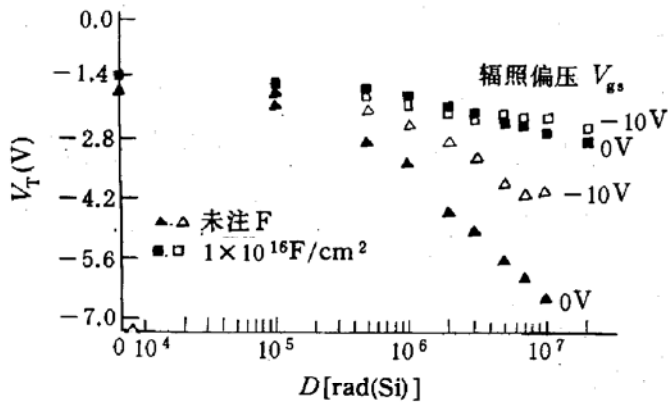


图 3 P 沟 MOSFET 阈电压随辐照总剂量的依赖关系

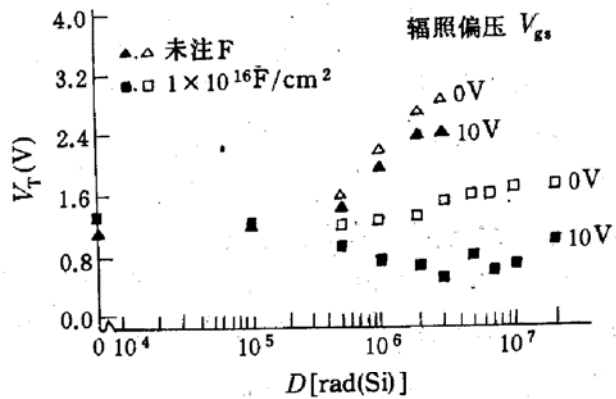


图 4 N 沟 MOSFET 阈电压随辐照总剂量的依赖关系

移明显慢于未注 F 样品。

2)所有 N 沟 MOSFET 随辐照剂量的增大,其阈电压都会出现正向漂移.但注 F 样品正向漂移速率明显慢于未注 F 样品(0V 栅偏置),或注 F 样品正向漂移出现时所对应的总剂量大于未注 F 样品(10V 栅偏置)。

3)当辐照总剂量达到 $1 \times 10^7 \text{rad(Si)}$ 时,注 F PMOSFET 的最大阈电压漂移量约为 1.4V,而未注 F PMOSFET 则约为 4.5V。

由此可见,注 F 样品具有更强的抑制辐射所引起的 PMOSFET 阈电压负向漂移和 NMOSFET 阈电压正向回漂的能力.器件导电类型和辐照栅偏置不改变注 F 样品的这种辐照特性。

3.3 静态漏电流

表 1 分别给出了注 F 与未注 F 的 CC4007 电路 N 沟和 P 沟总静态漏电流的辐照响应结果。

表 1 CC4007 电路总静态漏电流

类型	漏电流 总量 rad	N 沟漏电流/A			P 沟漏电流/A		
		样品 1	样品 2	样品 3	样品 1	样品 2	样品 3
未注 F	0	7.8×10^{-10}	5.3×10^{-10}	4.5×10^{-10}	1.4×10^{-9}	—	1.1×10^{-9}
	1×10^5	1.7×10^{-9}	1.5×10^{-9}	1.5×10^{-9}	1.3×10^{-8}	—	1.3×10^{-8}
	5×10^5	8.0×10^{-9}	5.6×10^{-9}	4.6×10^{-9}	1.2×10^{-8}	—	1.0×10^{-8}
	1×10^6	1.0×10^{-8}	9.0×10^{-9}	5.3×10^{-9}	1.0×10^{-8}	—	1.0×10^{-8}
	5×10^6	3.2×10^{-8}	2.3×10^{-4}	1.3×10^{-3}	4.7×10^{-8}	—	1.3×10^{-7}
	1×10^7	2.5×10^{-3}	2.3×10^{-4}	9.7×10^{-3}	3.3×10^{-7}	—	3.4×10^{-7}
注 F	0	9.4×10^{-10}	5.3×10^{-10}	4.6×10^{-10}	2.3×10^{-8}	1.1×10^{-9}	1.1×10^{-9}
	1×10^5	1.6×10^{-9}	1.4×10^{-9}	1.5×10^{-9}	3.8×10^{-8}	1.2×10^{-8}	9.9×10^{-9}
	5×10^5	2.2×10^{-9}	2.9×10^{-9}	1.5×10^{-9}	3.6×10^{-8}	7.1×10^{-9}	7.6×10^{-9}
	1×10^6	1.5×10^{-8}	3.1×10^{-8}	8.3×10^{-9}	2.9×10^{-8}	7.7×10^{-9}	8.5×10^{-9}
	5×10^6	2.8×10^{-7}	1.9×10^{-7}	8.7×10^{-8}	4.3×10^{-8}	3.5×10^{-8}	3.7×10^{-8}
	1×10^7	4.5×10^{-7}	4.1×10^{-7}	1.9×10^{-7}	1.5×10^{-7}	1.5×10^{-7}	1.6×10^{-7}
	2×10^7	1.4×10^{-7}	3.3×10^{-7}	1.7×10^{-7}	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}	8.1×10^{-8}

分析表中数据可以看到:

1) 随辐照剂量的增加, 将引起 N 沟漏电流出现较大的增长. 但注 F 样品增加速率明显小于未注 F 样品, 如 $1 \times 10^7 \text{ rad(Si)}$ 时, 未注 F 样品的最小 N 沟漏电流为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ A}$, 而注 F 样品仅为 $1.9 \times 10^{-7} \text{ A}$, 相差近三个量级.

2) 辐照对 P 沟漏电流影响不大, 注 F 工艺似乎对 P 沟漏电流的辐照行为影响甚微.

由此可见, 栅介质中 F 的引入能明显抑制 CC4007 电路 N 沟静态漏电流随辐照的增加.

3.4 氧化物电荷和界面态

图 5 和图 6 分别定量给出了不同辐照栅偏置下, 注 F 与未注 F 的 P 沟和 N 沟 MOSFET 中氧化物电荷密度和界面态密度增量随辐照总剂量的依赖关系.

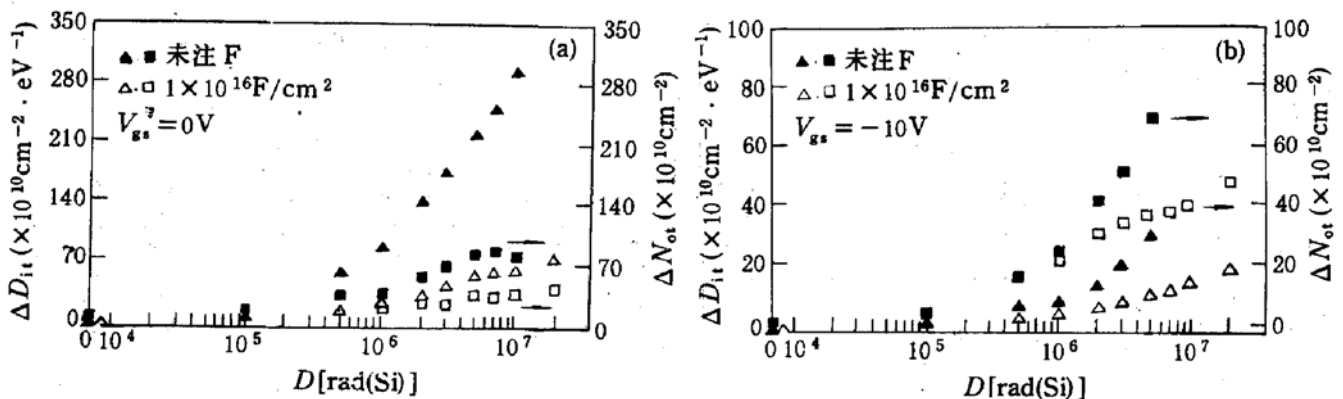


图 5 注 F 与未注 F 的 PMOSFET 氧化物电荷密度和界面态密度增量与辐照总剂量的关系

辐照偏压: (a) $V_{gs} = 0V$ (b) $V_{gs} = -10V$ ▲、△界面态 ■、□氧化物电荷.

由图中数据可以清楚看到, 注 F 样品具有较强的抑制辐射感生氧化物电荷积累和界面态增长的能力, 尤其是对界面态增长的抑制作用更为突出. 注 F 样品的这种特性不受器件导电类型和辐照栅偏压的影响.

对 PMOSFET 而言, 阈电压的负向漂移是辐射感生氧化物电荷和施主型界面态所引起的负向漂移二者之和构成. 氧化物电荷和界面态增长所引起的都是阈电压负向漂移. 对

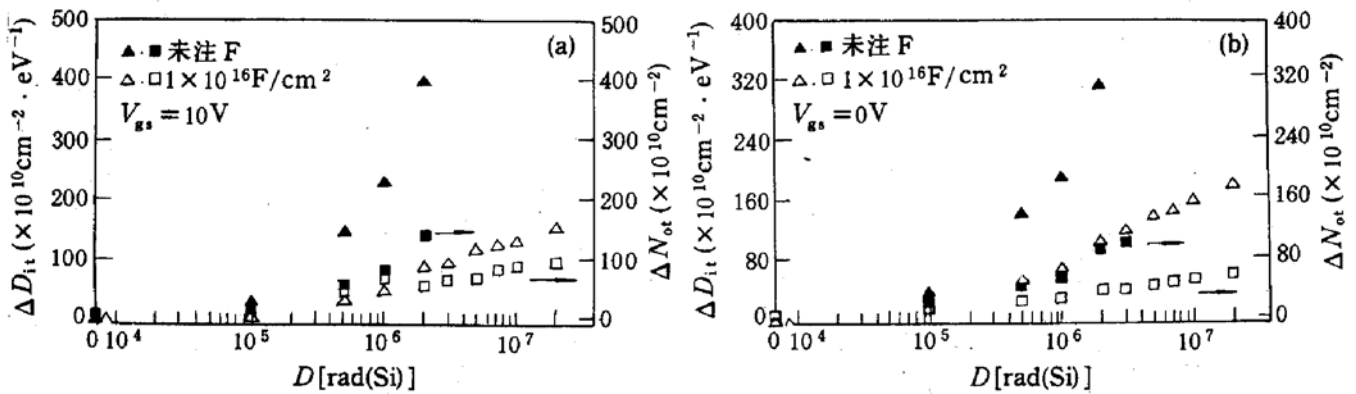


图 6 注 F 与未注 F 的 NMOSFET 氧化物电荷密度和界面态密度增量与辐照总剂量的关系
辐照偏压: (a) $V_{gs} = 10V$ (b), $V_{gs} = 0V$ ▲、△界面态 ■、□氧化物电荷.

NMOSFET, 阈值电压漂移是氧化物电荷所引起的负向漂移和受主型界面态所引起的正向漂移二者的贡献. 界面态的增加补偿了氧化物电荷积累所引起的负向阈值电压漂移. 在低辐照剂量下, 氧化物电荷积累占主导地位, 阈值电压呈负向漂移; 而高辐照剂量后, 界面态增长速率大于氧化物电荷的积累, 从而使阈值电压呈正向回漂, 甚至超过初始阈值电压值, 这称为“Rebound”现象^[11,12].

由于注 F 样品具有较小的辐射感生氧化物电荷和界面态增长速率, 且不受器件导电类型和辐照栅偏压的影响, 从而导致图 3 和图 4 所示的阈值电压辐照响应结果.

辐射感生 N 沟漏电流主要由两部分组成: 其一是 N 沟道截止时的沟道泄漏电流, 其二是 N 沟边缘场氧层漏电流. 前者随栅介质中辐射感生 Si/SiO₂ 界面态和氧化物电荷的增加而增大, 后者与辐射感生场氧层中氧化物电荷的多少相对应^[13]. 由于适量的 F 引入, 能减少栅介质和场介质^[1]中辐射感生氧化物电荷和界面态的积累, 从而导致表 1 所示的结果.

电离辐照在栅氧层或场氧层中产生的无论是界面态还是氧化物电荷, 都使得正常 P 沟管或因场氧层而形成的寄生 P 沟管的阈值负向漂移, 即向 P 沟深截止的方向漂移. 因此, 随辐照剂量的增大, P 沟漏电流变化不大.

适量的 F 离子引入 MOSFET 栅氧化物中, 由于 F 对 Si/SiO₂ 界面应力具有释放作用, 并且 F 能部分替换在辐照场中易成为电荷陷阱的 Si-H、Si-OH 弱键和 Si-O 应力键等^[1,2,5], 故 F 的引入能减少辐射感生氧化物电荷和界面态的增长积累.

4 结语

通过以上研究分析, 可以得出如下几点:

1) 注入多晶硅中的 F 经过热退火作用后, 大部分进入 SiO₂ 栅介质中, 并在 Si/SiO₂ 和 Poly Si/SiO₂ 两界面形成峰值.

2) 适量的 F 引入栅介质中能明显抑制辐射感生界面态的增长和氧化物电荷的积累, 从而引起较小的阈值电压漂移. 这种特性不受器件导电类型和辐照栅偏置的影响.

3) 注 F CC4007 电路显示出较小的辐射感生 N 沟静态漏电流的增长. 注 F 对 P 沟静态漏电流影响甚微.

4) 栅介质中 F 所具有的释放 Si/SiO₂ 界面应力、替换部分应力键和弱键的双重特性是导致辐射敏感性下降的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Y. Nishioka, T. Itoga, K. Ohyn *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, **37**(6):2026.
- [2] N. Kasai, P. J. Wright and K. C. Saraswat, IEEE Trans. Electron Devices, 1990, **37**:1426.
- [3] Y. Ono, M. Tabe and Y. Sakakibara, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**(4):375.
- [4] 张国强, 余学锋, 高文钰, 等, 固体电子学研究与进展, 1993, **13**(2):165.
- [5] 张国强, 余学锋, 高文钰, 等, 核技术, 1993, **16**(6):365.
- [6] 张国强, 严荣良, 余学锋, 等, 半导体学报, 1994, **15**(1):64
- [7] 张国强, 严荣良, 余学锋, 等, 核技术, 1994, **17**(4):348.
- [8] M. Gaitan and T. J. Russel, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6):1256.
- [9] 高文钰, 严荣良, 余学锋, 等, 半导体学报, 1992, **13**(8):475.
- [10] P. S. Winokur, J. R. Shrank, P. J. Mcwhorter *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6):1453.
- [11] J. R. Shrank, P. S. Winokur, P. J. Mcwhorter *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6):1434.
- [12] A. H. Johnston, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6):1427.
- [13] 余学锋, 任迪远, 陆妩, 等, 抗核加固, 1992, **9**(2):61.

Ionizing Radiation Effects of Fluorinated CC4007 Circuits

Zhang Guoqiang, Yang Rongliang, Lo Laihui, Yu Xuefeng and Ren Diyuan

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

Zhao Yuanfu and Hu Yuhong

(Xian Microelectronics Techniques Institute, Linton 710600)

Received 6 August 1994, revised manuscript received 7 November 1994

Abstract The ionizing radiation responses of fluorinated CC4007 circuits have been investigated. The experimental results have shown that by incorporating minute amounts of fluorine in thermal SiO₂, the generation of interface states and oxide trapped charges can be restrained, resulting in less shifts of the threshold voltage and less increase of N channel leakage current. The radiation hardness of fluorine is independent on the type of devices and irradiation gate bias. The less radiation sensitivity for fluorinated oxides should be attributed to the formation of Si-F bonds to substitute the other strained bonds which easily become charge traps under irradiation and to relax the bond stress at Si/SiO₂ interface.

EEACC: 2550E, 2560R; PACC: 7340Q