

文章编号: 2095-4980(2017)01-0134-05

一种抗辐射加固型低压差线性稳压器的研制

姚和平, 杨力宏, 刘 智, 时应璇, 赵光炜

(西安微电子技术研究所 集成电路设计事业部, 陕西 西安 710065)

摘 要: 介绍了一种抗辐射加固型低压差线性稳压器(LDO)的电路设计, 内部集成了精密基准源、误差放大器、输出调整管和上电复位时间控制等模块电路。重点介绍了采用总剂量、中子效应的器件参数变化预估方法进行仿真实验验证。芯片采用 $0.6\ \mu\text{m}$ BiCMOS 工艺制造, 测试验证结果表明, 产品在满足使用要求的同时, 具备抗电离总剂量 $3 \times 10^3\ \text{Gy}(\text{Si})$ 、抗中子注量 $0.6 \times 10^{14}\ \text{n}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的性能, 适用于核辐射环境。辐射测试结果证明了设计的正确性。

关键词: 低压差线性稳压器; 总剂量辐射; 中子辐射

中图分类号: TN433

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0134

Design of a radiation hardening Low Dropout Regulator

YAO Heping, YANG Lihong, LIU Zhi, SHI Yingxuan, ZHAO Guangwei

(Integrated Circuit Design Department, Xi'an Institute of Microelectronics Technology, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: A design of radiation hardening Low Dropout Regulators(LDO) is presented, which consists of high precision reference, error amplifier, power transistor and power reset time controlling circuit, and so on. The estimation method of the device parameters variation is introduced in detail in total ionizing dose and neutron radiation experiment by simulation. The chip is fabricated in $0.6\ \mu\text{m}$ BiCMOS technology. The results indicate that the product not only meets application requirements but also performs well in radiation hardening when the total ionizing dose attains to $3 \times 10^3\ \text{Gy}(\text{Si})$ and neutron fluence attains to $0.6 \times 10^{14}\ \text{n}\cdot\text{cm}^{-2}$. It is applicable to nuclear radiation environment and the test results prove the correctness of the design.

Keywords: Low Dropout Regulators(LDO); total ionizing dose radiation; neutron radiation

随着便携式设备的飞速发展, 低压差线性稳压器(LDO)作为电源管理系统中的一个重要模块, 由于其具有低功耗、低噪声、高精度度和高稳定性等优点, 在电子产品的电源管理系统设计中得到了广泛应用^[1-4]。尤其对于战略武器系统和卫星、航空航天电子系统中, LDO 电路则可看作是电子系统的核心。受空间辐射环境影响, 其抗辐射性能直接影响整个电子系统的加固水平, 关系着整个电子系统是否能够正常工作。因此对抗辐射加固型 LDO 的研究是十分必要并且迫切的^[1]。在 LDO 电路设计中, 双极器件由于其良好的线性特点和电流驱动能力, 以及高频、低噪声等特殊优点而被广泛采用。因此双极器件带来的总剂量效应和中子效应成为抗辐射加固的难点。电离总剂量辐射在双极器件的 Si/SiO₂ 界面引起正电荷的积累并引入界面态, 使表面势位增加, 引起表面复合大大增加, 产生过剩基极电流, 导致电流增益下降, 并引起漏电流增加。因此电流增益的衰减和漏电流的增加是双极晶体管的电离辐射效应的主要表现。中子辐射在半导体内产生位移效应, 形成间隙原子-空位对的缺陷群, 破坏了晶格原子的位能, 在禁带中形成新的能级。这种新的能级可以起到复合中心的作用, 引起多数载流子减少, 电导率下降, 电阻率增加, 少子寿命降低。

1 低压差线性稳压器设计

1.1 电路原理

研制的低压差线性稳压器电路是一款大电流、快速瞬态响应、内置上电复位功能的单路输出 LDO, 固定输

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2015-12-18

基金项目: 装备预先研究资助项目(51311050301)

出电压为 3.3 V，输出电流可达 1.5 A。对于较大的负载电流变化(1 mA~1.5 A)，电路具有快速瞬态响应特性。电路结构如图 1 所示，主要包括基准电压源、误差放大器、输出调整管、采样电阻、迟滞比较器电路。

如图 1 所示，当输入端 $\overline{\text{EN}}$ (使能信号) 为逻辑低电平时，电路正常工作。误差放大器的反相输入端连接到一个基准电压 $U_{\text{ref}}=1.183\ 4\ \text{V}$ ，而同相输入端通过分压电阻网络连接到输出端，对输出电压进行采样。基准电压由电路内部产生。输出电压变化时，通过采样电阻给误差放大器的同相输入端一个反馈信号，再与基准电压 U_{ref} 比较，并经误差放大器放大后，控制调整管的工作状态，从而使输出电压保持不变。

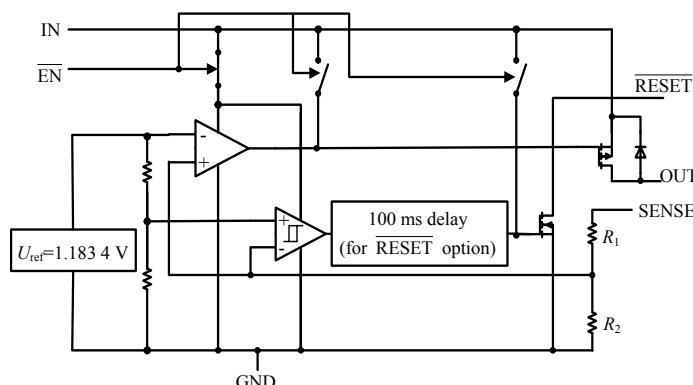


Fig.1 Functional block diagram
图 1 电路结构原理图

1.2 电路设计

带隙基准电路是 LDO 设计中的关键模块，其温度稳定性以及抗噪声性能影响着整个电路系统的精确度和性能。基准电路由于利用双极型晶体管的基极-发射极结电压和热电压来实现零温度系数，为多个电路模块提供参考电压源，因此电路设计中不可避免地引入双极晶体管。为提高 LDO 对负载的瞬态响应速度，该电路采用双环控制、快速瞬态响应技术。不同于传统 LDO 单环路电压控制模式，芯片中采用电压环路 and 电流环路同时控制的双环控制模式，使得在轻负载范围内由电压控制环路进行调节和稳压；在重负载瞬态电流突变的情况下，通过电流环路对功率 PMOS 器件直接进行控制，调节输出电压至规定范围内，极大地提高了系统的瞬态响应能力。电流环路中由于利用了双极晶体管的大电流驱动能力，不可避免地引入双极晶体管。

综上所述，目前电路由于采用 BiCMOS 工艺，2 种器件对总剂量、中子效应的敏感程度不同。双极器件抗总剂量较强而抗中子较弱，MOS 器件抗中子能力较强而抗总剂量能力较弱。因此从电路电性能和抗辐射加固指标来看，应分别针对 MOS 器件和双极器件进行加固。

2 总剂量辐射后阈值电压预估

针对 CMOS 器件的抗总剂量加固，采用了传统的 H 栅结构，如图 2 所示。通常情况下，采用场氧隔离器件很容易受总剂量辐射的影响，在薄的栅氧向较厚的场氧过渡区域，总剂量辐射引起的陷阱俘获电荷会使其反型，进而形成寄生沟道，寄生晶体管在超过一定辐射总剂量时开启而增加源漏间的泄漏电流。为了解决此类问题，最有效的方法是对器件结构采用无边缘设计，适当改变器件的栅结构，H 栅就是其中的一种，它避免了从栅氧到场氧的过渡区，即阻断了源漏间辐射感生的漏电流通道的形成，从而避免了寄生晶体管的开启^[5]。为了研究不同结构的 MOS 管抗辐射特性，针对不同单管器件结构进行 $3 \times 10^3\ \text{Gy}(\text{Si})$ 总剂量辐射试验。表 1 显示了辐射前后条栅 MOS 和 H 栅 MOS 管阈值电压(U_T)的变化情况，从表中可看出，对条栅 MOS 管，NMOS 的抗辐射特性优于 PMOS，PMOS 辐射后阈值电压漂移较为严重。采用 H 栅结构后，抗辐射特性有明显提高，H 栅 NMOS 的阈值电压变化量最大为 136 mV，H 栅 PMOS 的阈值变化量很小，最大变化量仅为 41.45 mV。由此可见，采用的 H 栅结构可有效抑制阈值电压漂移。

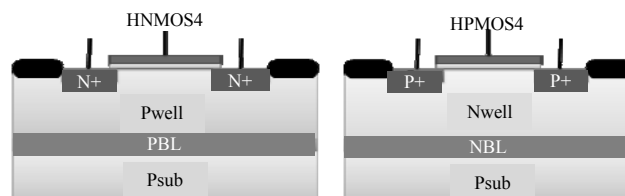


Fig.2 Vertical structural diagram of P and N-channel MOS device with H type grid
图 2 HNMOS/HPMOS 器件的剖面示意图

表 1 沟长为 $0.6\ \mu\text{m}$ 条栅 MOS 和 H 栅 MOS 管辐射前后阈值变化情况

Table1 U_T variation of H/I type MOS devices after and before irradiation (channel length is $0.6\ \mu\text{m}$)

device type	size/ μm	U_T before radiation/mV	U_T after radiation/mV	variation of U_T /mV	percentage change
I-type NMOS	0.6×0.6	617.93	197.737 6	-420.192	-68%
	8×0.6	613.02	190.036 2	-422.984	-69%
	20×0.6	607.12	176.064 8	-431.055	-71%
I-type PMOS	0.6×0.6	-840.47	-1 538.06	-697.590	83%
	8×0.6	-813.93	-1 554.61	-740.676	91%
	20×0.6	-816.60	-1 608.70	-792.102	97%
H-type NMOS	1.6×0.6	617.85	500.458 5	-117.392	-19%
	20×0.6	593.78	457.210 6	-136.569	-23%
H-type PMOS	1.6×0.6	-834.98	-860.029	-25.049 4	3%
	20×0.6	-829.07	-870.524	-41.453 5	5%

3 中子辐射后电流放大系数预估

中子环境中晶格损伤的积累, 可以导致双极器件的增益下降。如基区宽度为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的标准纵向 NPN 器件, 在 $0.5\times 10^{14}\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的中子注量下, 增益已下降到 1 以下^[6], 可见, 需要重点对 NPN 的 h_{FE} (双极晶体管电流放大系数) 值变化进行加固。

中子辐射能够在半导体材料内产生缺陷和缺陷群, 严重降低基区少数载流子寿命, 引起基区复合电流增加, 导致 h_{FE} 降低^[7-8]。 h_{FE} 和中子注量有如下关系:

$$h_{FE} = \frac{h_{FE0}}{1 + h_{FE0} t_b K \varphi} \quad (1)$$

式中: h_{FE} 是辐射后电流放大系数; h_{FE0} 是辐射前电流放大系数; t_b 是少数载流子基区渡越时间; K 是中子辐射损伤常数; φ 是中子注量。对于三极管, t_b 与特征频率 f_T 有如下关系:

$$t_b = \frac{1}{2\pi \times 1.33 \times f_T} \quad (2)$$

3.1 多晶硅发射极 NPN 管电流放大系数预估

与常态的 NPN 管的抗中子能力相比, 本文中设计的 LDO 使用了多晶硅发射极 NPN 管, 如图 3 所示, 其基区宽度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$, 特征频率(f_T)比常规扩散的三极管高得多, 如常规 NPN 的 f_T 约为 200 MHz , 而本文中设计的 LDO 多晶硅发射极 NPN 管 f_T 为 15 GHz , 通过式(2)计算, t_b 为 8 ps ; 根据各个晶体管发射极电流计算出电流密度 J_e , 并查阅反应堆对硅晶体管损伤图, K 为 $1\times 10^{-6}\text{ cm}^2\cdot\text{n}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过式(1)计算, 可知对于中子注量为 $0.6\times 10^{14}\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1 MeV 等效)的 NPN, 其 h_{FE} 由常态的 90 变为了 86。

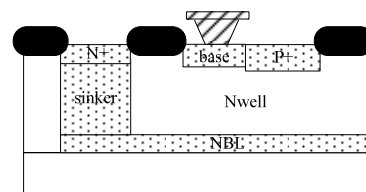


Fig.3 NPN with poly silicon emitter
图3 多晶硅发射极 NPN 管

3.2 栅控 PNP 管电流放大系数预估

栅控横向 PNP 晶体管是通过优化的 CMOS 工艺生成的寄生器件来实现的, 器件采用环形多晶硅栅作为基区的场板, 因为栅与发射极相连, 所以寄生的 PMOS 晶体管始终保持截止的状态, 由于集电极与发射极都采用 MOS 器件的自对准工艺, 所以基区的宽度很短, 这样就能够制作出高增益的横向 PNP 管, 有利于提高抗中子辐射能力。

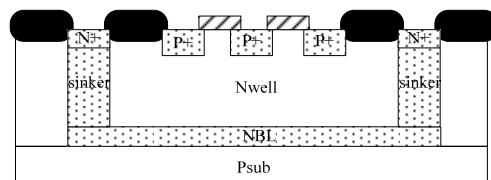


Fig.4 PNP with grid controlled
图4 栅控 PNP 管

常规 PNP 的基区宽度为 $3\text{ }\mu\text{m}$, 而本文中设计的 LDO 多晶硅发射极 PNP 管的基区宽度为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$, 如图 4 所示, f_T 为 200 MHz , 通过式(2)计算, t_b 为 600 ps ; 根据各个晶体管发射极电流计算出电流密度 J_e , 并查阅反应堆对硅晶体管损伤图, K 为 $0.5\times 10^{-6}\text{ cm}^2\cdot\text{n}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过式(1)计算, 可知对于中子注量为 $0.6\times 10^{14}\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1 MeV 等效)的 NPN, 其 h_{FE} 由常态的 60 变为了 28.8。

4 辐射后电路模拟仿真、抗辐射试验及分析

辐射指标要求总剂量为 $3\times 10^3\text{ Gy (Si)}$ 、中子注量为 $0.6\times 10^{14}\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1 MeV 等效)时, 将 CMOS 器件的阈值电压、双极器件的 h_{FE} 代入模型文件, 对整体电路进行仿真实验, 结果见表 2。由表 2 看出, 设计的电路可以满足总剂量、中子注量的辐射指标要求。

表 2 整体电路的常态及辐射后的输出电压的仿真表

Table2 Simulation results of output voltage before and after radiation

parameter	U_{out}/V	U_{out}/V	U_{out}/V
	before radiation	after radiation	difference value
$U_{in}=4.3\text{ V}$	3.297 846	3.326 710	0.028 864
$U_{in}=5.5\text{ V}$	3.298 188	3.327 499	0.029 311
$I_{load}=1.6\text{ A}$	3.298 039	3.327 154	0.029 115

4.1 总剂量试验

2014 年 11 月 6 日, 在西北核物理研究所对低压差线性电压调整器电路完成 $3\times 10^3\text{ Gy(Si)}$ 的总剂量试验。试验采用钴 60γ 射线辐射源, 剂量率为 50 rad/s 。整个试验过程中实时监测辐射板电源电流, 用示波器监测输出波形。试验结束后测试功能及电参数正常, 并进行了 $1.5\times 10^3\text{ Gy(Si)}$ 的过剂量辐射试验, 经退火试验后测试功能及电参数正常。图 5 所示为整个试验过程中, 随着总剂量效应的累积, 在线实时检测的电源电流值。

由图 5 看出, 辐射前整个辐射板电源电流为 377 mA, 这与负载设计值相符合。整个试验过程中电源电流最小值为 372 mA, 最大值为 379 mA, 输出电压稳定在 3.24~3.32 V 之间。可见试验过程中电源电流变化量不大, 电路对总剂量辐射不是很敏感。试验完成后对器件进行 FLEX 机测试, 器件功能正常, 参数测试值变化量符合指标要求。辐射前后参数变化统计情况如表 3 所示。

由表 3 统计结果可看出, 器件电参数在辐射前后变化很小, 均在指标范围之内。其中输出电压变化量范围为-76~-39 mV; 输出电压线性调整率变化范围为-0.04%~-0.02%; 输出电压负载调整率变化范围为-0.21~0.44 mV; 静态电流变化范围为 4.16~12.60 μ A; 漏失电压变化范围为-35~-24.8 mV。

经对电参数辐射前后数据分析表明, 该器件在 3×10^3 Gy(Si)总剂量效应下功能和电性能参数漂移不明显, 可达到总剂量辐射指标要求。

表 3 总剂量辐射前后器件参数对比表

		Table 3 Parameter comparison by total ionizing dose radiation experiment							
		$U_{out_4V3/V}$	$U_{out_5V5/V}$	line	load/mV	$U_{out_1A6/V}$	dropout/mV	$I_{_gnd_1mA/\mu A}$	$I_{_gnd_1A5/\mu A}$
1#	before radiation	3.286 9	3.287 6	0.02%	0.64	3.285 9	339.152 3	148.305 7	137.923 0
	after radiation	3.247 1	3.249 5	0.06%	1.00	3.246 3	366.558 6	141.382 2	133.760 5
2#	before radiation	3.323 5	3.324 5	0.02%	1.21	3.322 4	332.285 1	153.984 0	142.680 1
	after radiation	3.247 1	3.249 5	0.06%	1.00	3.246 3	366.558 6	141.382 2	133.760 5
3#	before radiation	3.318 7	3.319 7	0.02%	0.82	3.318 5	327.353 2	149.0833	112.948 2
	after radiation	3.275 7	3.277 5	0.04%	1.43	3.275 0	355.009 2	142.020 4	104.920 6
4#	before radiation	3.319 1	3.319 7	0.01%	0.99	3.317 8	334.095 5	147.282 4	110.569 7
	after radiation	3.272 7	3.274 1	0.03%	0.55	3.271 3	358.942 2	139.338 7	101.947 4
5#	before radiation	3.328 8	3.329 4	0.02%	1.12	3.328 2	333.596 0	152.638 0	111.462 0
	after radiation	3.277 2	3.279 4	0.06%	1.65	3.277 5	369.306 0	141.954 0	105.218 0

4.2 中子试验

为验证低压差线性稳压器电路的抗中子辐射能力, 制定中子辐射试验方案, 于 2014 年 10 月在西北核技术研究所进行了 0.6×10^{14} n $\cdot$ cm $^{-2}$ 中子注量下的辐射试验。试验中, 辐射状态: 稳态运行; 中子平均能量: 1.12 MeV。整个试验过程中实时监测 5 只电路的输出电压, 如图 6 所示。随着中子注量效应累积, 不同负载条件下输出电压记录值。

由上图统计结果看出, 整个试验过程中 5 路输出电压变化不明显, 变化范围在 3.24~3.38 V 之间。由于轻重负载的影响, 1#和 4#(轻载)电路输出电压范围在 3.35~3.38 V 之间, 而 2#、3#和 5#(重载)电路输出电压范围在 3.24~3.29 V 之间, 轻载电路较重载电路输出电压高约 110 mV。整个试验过程中输出电压偏差范围为 15.1~22.3 mV。可见试验过程中抗中子辐射性能良好。

经中子辐射的器件具有放射性。经一定时间器件隔离确定安全后, 取回器件在集成电路测试系统上进行单片电路测试, 试验前后参数变化统计情况如表 4 所示。

表 4 中子辐射前后器件参数对比表

		Table 4 Parameter comparison by neutron radiation experiment							
		$U_{out_4V3/V}$	$U_{out_5V5/V}$	line	load/(mV)	$U_{out_1A6/V}$	dropout/mV	$I_{_gnd_1mA/\mu A}$	$I_{_gnd_1A5/\mu A}$
1#	before radiation	3.302 5	3.303 5	0.03%	2.225 6	3.300 4	333.315 2	150.087 2	107.893 8
	after radiation	3.345 0	3.346 8	0.05%	1.030 7	3.344 3	330.467 1	145.030 0	101.675 8
2#	before radiation	3.290 6	3.291 2	0.02%	0.688 6	3.289 5	319.674 4	150.634 2	112.353 6
	after radiation	3.344 3	3.346 6	0.06%	0.799 7	3.344 1	319.666 7	150.566 4	105.838 8
3#	before radiation	3.301 8	3.302 9	0.03%	0.716 7	3.301 2	336.062 0	148.141 3	110.867 0
	after radiation	3.370 3	3.372 7	0.06%	0.270 9	3.370 9	336.585 3	148.978 5	106.136 2
4#	before radiation	3.309 3	3.310 1	0.02%	1.230 5	3.308 7	334.969 5	148.296 3	111.164 3
	after radiation	3.362 7	3.364 8	0.05%	1.367 2	3.362 8	329.561 9	147.913 2	104.946 8
5#	before radiation	3.348 0	3.349 0	0.02%	0.910 8	3.347 7	336.374 2	149.640 9	112.948 2
	after radiation	3.391 2	3.393 6	0.06%	1.451 5	3.390 1	335.992 2	149.598 6	106.136 2

由表 4 可看出, 器件电参数在辐射前后变化很小, 均在指标范围之内。其中输出电压变化范围为-69~-42 mV; 输出电压线性调整率变化范围为-0.043%~-0.019%; 输出电压负载调整率变化范围为-0.54~0.45 mV; 静态电流变化范围为-0.83~6.81 μ A; 漏失电压变化范围为 0.007 7~5.407 mV。

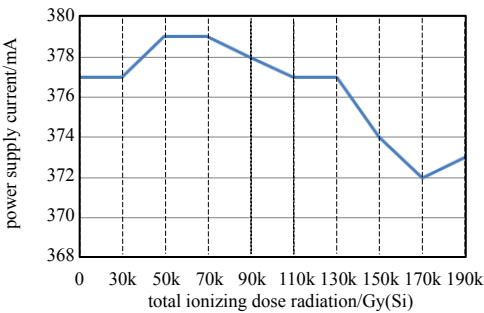


Fig.5 Power supply currents in total ionizing dose radiation experiment

图 5 总剂量试验过程中电源电流检测值

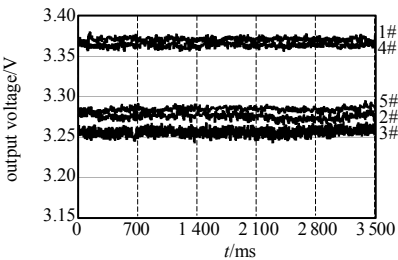


Fig.6 Output voltage results in neutron radiation experiment

图 6 中子辐射试验中输出电压检测结果

经对电参数辐射前后数据分析表明,该器件在 $0.6 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ 中子效应下功能和电性能参数变化不明显,与预期结果相同,可达到中子辐射指标要求。

5 结论

本文介绍了一种抗辐射加固低压差线性稳压器的研制过程。针对 BiCMOS 工艺特点,分别对 CMOS 器件采用传统的 H 栅器件结构,对双极器件采用了多晶硅发射极 NPN 和栅控 PNP 管,并对总剂量效应引起的阈值电压变化、中子辐射后电流放大系数变化进行预估,模拟仿真结果符合要求。经流片验证,电路的抗辐射性能水平达到了研制要求。

参考文献:

- [1] 段志奎. 高性能 LDO 设计及辐射加固[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011. (DUAN Zhikui. Design and radiation-hardening of high-performance low dropout regulator[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2011.)
- [2] 刘明亮, 明鑫, 欧雪春, 等. 一种带过温保护和折返电流限的 LDO 设计[J]. 微电子学, 2011, 41(3): 411-415. (LIU Mingliang, MING Xin, OU Xuechun, et al. Design of LDO with thermal protection and fold back current limit[J]. Microelectronics, 2011, 41(3): 411-415.)
- [3] 段杰斌, 罗志国, 刘孟良, 等. 一种用于 LDO 的低功耗带隙基准电压源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(5): 767-770. (DUAN Jiebin, LUO Zhiguo, LIU Mengliang, et al. A low power bandgap voltage reference for Low Dropout Regulator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(5): 767-770.)
- [4] 曹光明. 抗辐射加固集成稳压电源的最新设计和研究[J]. 微电子学, 1988, 18(6): 68-72. (CAO Guangming. A novel design and study of a radiation-hardened integrated voltage regulator[J]. Microelectronics, 1988, 18(6): 68-72.)
- [5] HUGHART D R, SCHRIMPF R D, FLEETWOOD D M, et al. Mechanisms of interface trap buildup and annealing during elevated temperature irradiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6): 2930-2936.
- [6] DESKO J C Jr, DARWISH M N, DOLLY M C. Radiation hardening of a high voltage IC technology (BCDMOS)[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1990, 37(6): 2083-2088.
- [7] 胡志良, 贺朝会, 张国和, 等. 超深亚微米 SOI NMOSFET 中子辐照效应数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(4): 456-460. (HU Zhiliang, HE Chaohui, ZHANG Guohe, et al. Simulation for neutron radiation effects on super deep submicron SOI NMOSFET[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(4): 456-460.)
- [8] WOLICK J E A, NAMENSON A, CARLAN A. Guidelines for developing radiation hardness assurance device specifications[S]. Washington DC: Naval Research Lab, 1995.

作者简介:



姚和平(1982-), 男, 陕西省宝鸡市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数模混合集成电路研制、抗辐射加固技术。email: yaohp1982@126.com.

时应璇(1986-), 男, 安徽省六安市人, 学士, 工程师, 主要研究方向为数模混合集成电路研制。

杨力宏(1977-), 男, 上海市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数模混合集成电路研制、抗辐射加固技术。

刘智(1972-), 男, 辽宁省锦州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为电源管理及数模混合集成电路设计、集成电路辐射效应及加固技术。

赵光炜(1989-), 男, 陕西省宝鸡市人, 学士, 工程师, 主要研究方向为数模混合集成电路研制。