

文章编号: 2095-4980(2017)01-0129-05

低压差线性稳压器瞬时电离辐射试验方法

杨力宏, 姚和平, 刘智, 赵光炜, 刘娜, 时应璇

(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: 在核爆环境下, 要求低压差线性稳压器(LDO)的输出电压能够快速恢复。本文定性分析了瞬时电离辐射后 LDO 的输出电压恢复时间与负载电阻的关系; 在“强光一号”加速器上开展了相应的瞬时电离辐射效应试验研究。对比分析不同负载条件下的输出电压恢复时间, 发现两者密切相关, 通过合理调整输出负载电阻值, 可以有效地减小瞬时电离辐射后电路的恢复时间。辐射试验结果表明, 经过瞬时电离剂量率为 1.0×10^{11} rad(Si)/s 辐照后, 采用适当负载的 LDO 的输出电压恢复时间可小于 100 μ s。

关键词: 低压差线性稳压器; 瞬时电离辐射效应; 恢复时间

中图分类号: TN433

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0129

Transient ionizing radiation effects for experimental method of LDO

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

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

Abstract: In the nuclear explosion environment, it is required that the output voltage of Low Dropout Regulator(LDO) can recover quickly. The relationship between the output voltage recovery time and the load resistance after the instantaneous ionizing radiation has been qualitatively analyzed. The experimental study is carried out on the effects of instantaneous ionizing radiation based on the “Qiang-guang-I” accelerator. The close relationship is found existing between the output voltage recovery time and the load resistance by analyzing many experimental results. The recovery time of the circuit can be effectively reduced by adjusting the load resistance value which is tested by the instantaneous ionizing radiation experiment. The test results show that LDO output voltage recovery time decreases to 100 μ s after the instantaneous ionizing radiation of 1.0×10^{11} rad(Si)/s.

Keywords: Low Dropout Regulators; transient ionizing radiation effect; recovery time

近年来, 由于低压差线性稳压器(LDO)具有低功耗、低噪声、高精确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的应用^[1-4]; 尤其对于需要工作在核辐射环境中的战略武器系统和卫星、航空航天电子系统, 其辐射性能直接关系到电子系统是否能正常工作。同时, 电源常常是一个系统中最难进行辐射加固的部件, 在强辐射期间, 有源器件可能出现短路, 过大的瞬态电流就能引起永久损伤, 致使有源器件在辐射之后不能恢复正常工作^[1]。因此对低压差线性稳压器的抗辐射加固深入研究有重要意义。本文建立一套低压差线性稳压器瞬时辐射效应在线测试系统, 结合低压差线性稳压器电路结构特点对初次试验结果进行分析, 调整辐射方案, 对不同负载条件下低压差线性稳压器 γ 瞬时辐射响应进行了试验, 得到了低压差线性稳压器瞬时辐射后恢复时间随负载条件变化关系。

1 初次试验

试验所选用的样品为工艺验证电路 LPS75333 型低压差线性稳压器。为便于试验结果分析, 减少外围电路对低压差线性稳压器的干扰, 试验电路接成正常工作模式, 采用如图 1 所示电路, 滤波电容 C_1 为 0.22 μ F, 输出电阻 R_1 为 200 Ω , 输出电容 C_2 为 47 μ F, 输入电压 U_{IN} 为 $5 \times (1 \pm 10\%)$ V; 监测输出电压 U_{OUT} 为 3.3 V。为降低

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)

强辐射环境下的干扰，每只电路上均对电源加入电容进行滤波，同时，为保证试验数据的一致性和可信度，每次试验使用相同的印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)和低压差线性稳压器。

辐照试验在西北核技术研究所的“强光一号”加速器上进行，由于加速器在产生 γ 射线过程中会产生诸如电磁脉冲等大量干扰，因此，信号传输线用同轴电缆外加金属蛇皮套进行双屏蔽，电路板放在铝屏蔽盒内并在屏蔽盒外包裹铜网进行双屏蔽，铜网与屏蔽盒绝缘并与同轴电缆的金属蛇皮套相连。整个屏蔽系统的内屏蔽层连接到试验大厅外的信号地，外屏蔽层连接到辐照装置前端地^[5]。

建立的信号测量系统，“强光一号”射出 γ 射线照射到试验器件上，射线与器件相互作用，产生效应信号，效应信号经传输电缆到示波器，由示波器记录，示波器由给定的触发信号统一触发，试验器件由屏蔽间内的供电系统经由传输电缆供电，所有测试记录设备均在屏蔽间内摆放以消除电磁干扰对测试记录设备的影响^[6-7]。

2 初次试验结果及分析

2.1 初次试验结果

在“强光一号”加速器上对工艺验证电路进行了 γ 瞬时辐照效应试验。试验过程中用示波器记录零前、零时及零后输出电压 U_{OUT} 的数据变化情况。

“强光一号”加速器试验运行条件为：主机充电电压 35 kV；平均能量：1.0 MeV；试验环境温度：(19±1) °C。本次试验共打 1 发，典型的 γ 脉冲波形如图 2 所示。3 只器件的剂量率按表 1 所示进行试验。每只器件零前、零时、零后的 U_{OUT} 波形分别如图 3 所示。

由图 3 示波器显示结果可见：1#器件受照瞬间发生扰动，扰动 14 μ s 后 U_{OUT} 上升至 4.9 V，保持 36 μ s 后下降至 2.0 V，在 220 μ s 内未见波形恢复，重新触发示波器后 U_{OUT} 恢复至辐照前水平。2#器件受照瞬间发生扰动，扰动 15 μ s 后 U_{OUT} 上升至 4.9 V，保持 70 μ s 后下降至 1.8 V，在 185 μ s 内未见波形恢复，重新触发示波器后 U_{OUT} 恢复至辐照前水平。3#器件受照瞬间发生扰动，扰动 14 μ s 后 U_{OUT} 上升至 4.8 V，保持 60 μ s 后下降至 1.8 V，在 196 μ s 内未见波形恢复，重新触发示波器后 U_{OUT} 恢复至辐照前水平。

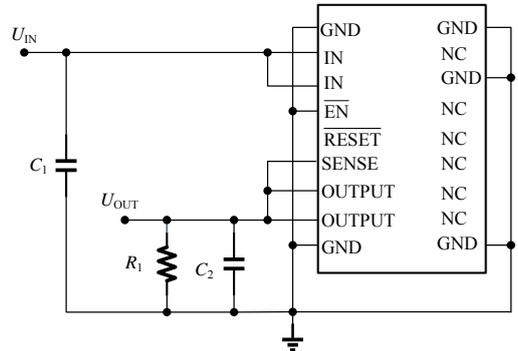


Fig.1 Typical application configuration
图 1 低压差线性稳压器正常工作模式

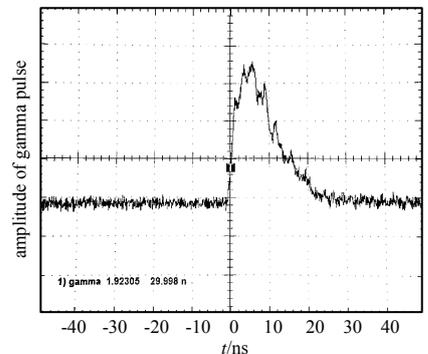


Fig.2 Typical gamma pulse
图 2 典型的 γ 脉冲波形

表 1 样品器件的剂量率

pulse-width/ns	devices number	dose rate range/(rad(Si)/s)
34	1#	2.2×10^{10}
	2#	5.3×10^{10}
	3#	5.5×10^{10}

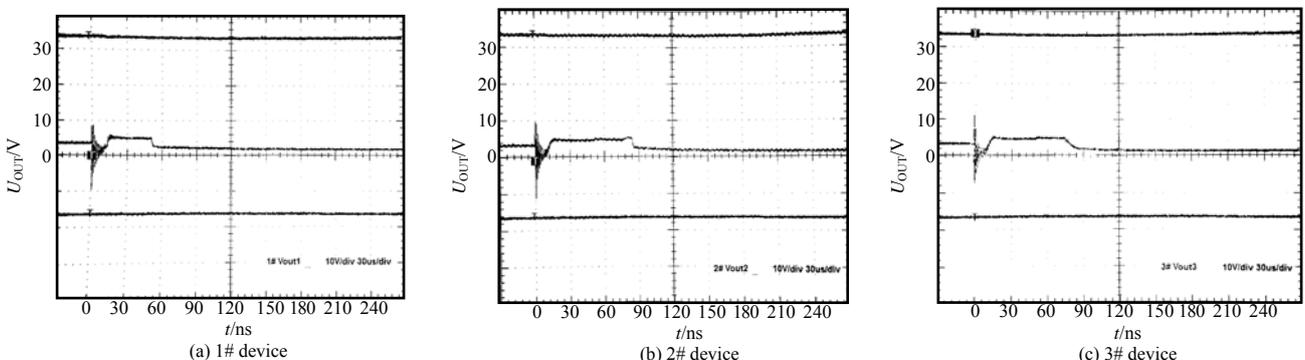


Fig.3 Transient responses of LPS75333(1#-3#) devices by gamma-ray pulse
图 3 器件 1#~3#的波形

综上所述，当瞬时辐射剂量率为 5.5×10^{10} rad(Si)/s 时，3 只试验电路(1#~3#)瞬时辐照后无永久损伤，但恢复时间远大于 100 μ s。

2.2 初次试验结果分析

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，固定输出电压为 3.3 V，输出电流可达 1.5 A。对于较大的负载电流变化(1.5 A)，电路具有快速瞬态响应特性。

电路结构如图 4 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 4 所示，当 EN 端为逻辑低电平时，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_{ref} ，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。

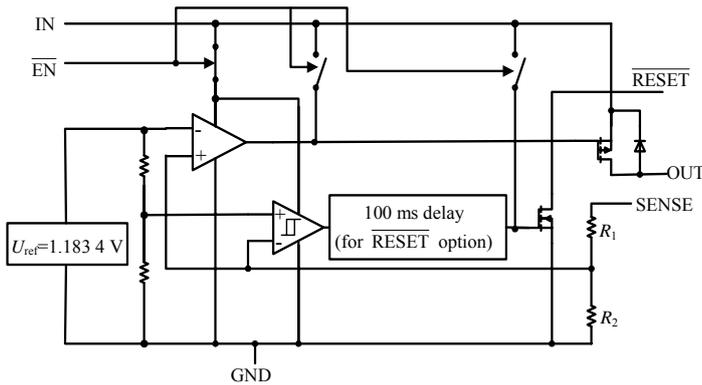


Fig.4 Functional block diagram
图 4 电路结构原理图

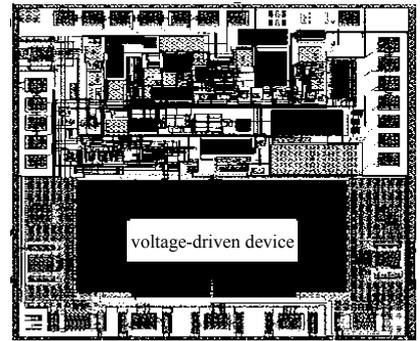


Fig.5 Layout of LPS75333
图 5 低压线性稳压器版图

该电路版图见图 5。输出调整管(PMOS)版图面积 $1\ 300\ \mu\text{m} \times 850\ \mu\text{m}$ ，整体版图面积 $1\ 850\ \mu\text{m} \times 2\ 320\ \mu\text{m}$ ，可见输出调整管(PMOS)版图面积为整体版图面积的四分之一，占有有效图形面积的 40%左右。该调整管中每 6 条栅相邻两边各有 1 条阱接触。

由输出结果可见，3 只器件约在 $15\ \mu\text{s}$ 后 U_{OUT} 都上升接近电源电压，并且保持近 $45\ \mu\text{s}$ 后下降至 2 V 左右，恢复时间近 $500\ \mu\text{s}$ 。产生上述现象的主要原因如下所述：

- 1) 输出电阻 R_1 为 $200\ \Omega$ ，输出电流为 17 mA。PMOS(N 阱工艺)辐射光电流模型如图 6 所示^[8]，当器件受照时，在输出调整管 PMOS 管的阱中产生的光电流(I_{ppdb})远大于 I_d 电流，流过输出电阻 R_1 ，则输出维持高电平。
- 2) 随着产生的光电流复合，电流逐渐减小，但由于调整管放置于一个 N 阱内，如图 7 所示，调整管中每 6 条栅的两端各有 1 条阱接触。在高剂量率辐照时，辐照感应产生的一次光电流流入阱内，在寄生 PNP 管的基极串联电阻产生电压降，特别是远离阱接触的源阱 PN 结会产生正偏，当此电压降大于晶体管导通电压时，即 $i_{pp}R_b \geq U_{BEon}$ ，寄生 PNP 晶体管开启，产生较大的二次光电流，使电流流向衬底，造成输出电压降低。
- 3) 由于电路未发生闩锁，电路经过 $500\ \mu\text{s}$ 后，恢复正常状态。

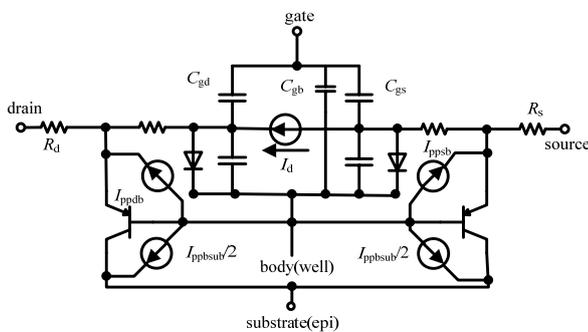


Fig.6 P-channel MOS(N-well technology) model topography including photocurrent generators
图 6 PMOS(N 阱工艺)辐射光电流模型

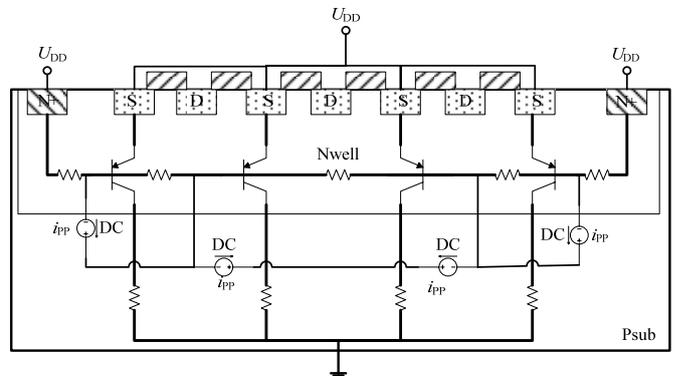


Fig.7 Well contact effects on secondary photocurrent generation in parasitic bipolar transistors in CMOS N-well technology
图 7 N 阱 PMOS 结构二次光电流效应

综上所述，为了使恢复时间少于 $100\ \mu\text{s}$ ，需要调整输出电阻，以减小输出调整管 PMOS 管的阱中产生的光电流(I_{ppdb})对电路的影响。

3 改进试验结果及分析

通过分析,仍采用如图 1 所示电路,将输出电阻 R_1 分别改为 $10\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 和 $3.3\ \Omega$,其他条件不变。于 2015 年 1 月 12 日,在西北核物理研究所“强光一号”加速器上再次对工艺验证电路进行了 γ 瞬时辐照效应试验。剂量率为 2×10^{11} rad(Si)/s 左右,其瞬时辐照输出波形如图 8~图 10 所示。

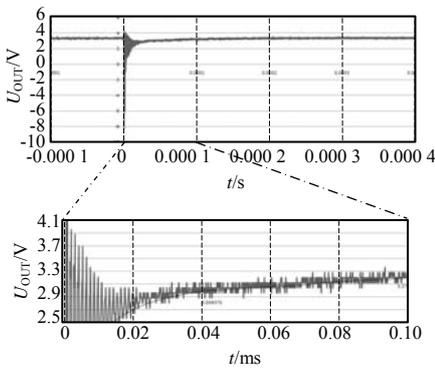


Fig.8 Waveform of 11# device
图 8 11#($R_1=10\ \Omega$)器件的波形

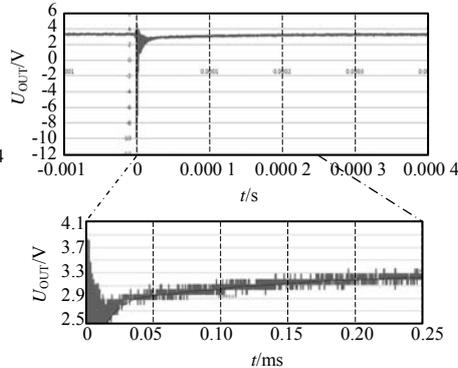


Fig.9 Waveform of 12# device
图 9 12#($R_1=5\ \Omega$)器件的波形

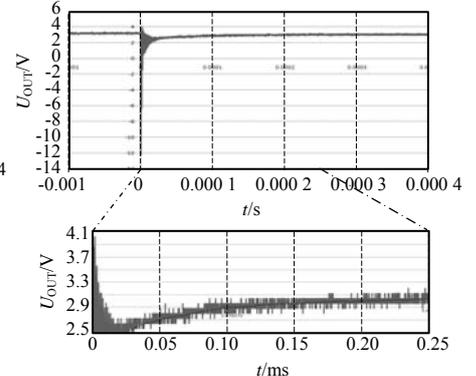


Fig.10 Waveform of 13# device
图 10 13#($R_1=3.3\ \Omega$)器件的波形

从上图及表 2 可见,经过调整输出电阻,当瞬时辐射剂量率为 2×10^{11} rad(Si)/s 时,3 只试验电路(11#~13#)瞬时辐照后无永久损伤,输出电阻为 $10\ \Omega$ 的 11# 电路,恢复时间(t_{recovery})为 $100\ \mu\text{s}$;输出电阻为 $5\ \Omega$ 的 12# 电路,恢复时间为 $250\ \mu\text{s}$;输出电阻为 $3.3\ \Omega$ 的 13# 电路,恢复时间大于 $250\ \mu\text{s}$;可见,此次试验虽然剂量率大于上次试验,但由于合理地调整输出电阻后,可满足恢复时间的指标要求。13# 电路输出电压恢复时间较长,是由于输出电阻太小,输出电容较大引起的,可以适当减小输出电容来缩短其恢复时间。此问题在应用时需综合考虑,这里不再赘述。

表 2 改进试验结果
Table2 Experiment results

devices number	output resistance R_1/Ω	output voltage U_{OUT}/V		
		$t_{\text{recovery}}=40\ \mu\text{s}$	$t_{\text{recovery}}=100\ \mu\text{s}$	$t_{\text{recovery}}=250\ \mu\text{s}$
11#	10.0	3.039 375	3.279 375	3.359 375
12#	5.0	2.881 250	3.041 250	3.281 250
13#	3.3	2.719 375	2.879 375	3.039 375

4 结论

本文通过对低压差线性稳压器瞬时电离辐射后的试验结果分析,调整瞬时电离辐射效应试验方案,观察了各种输出电阻的恢复时间,验证了通过合理调整输出电阻,可以减小电路恢复时间的定性分析结论。该产品的研制为其他抗辐射低压差线性稳压器的设计及瞬时电离辐射效应试验提供了参考。

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] 王桂珍, 龚建成, 姜景和, 等. 电子元器件及电路的剂量率效应测试技术研究[J]. 微电子学, 2001, 31(2): 130-134. (WANG Guizhen, GONG Jiancheng, JIANG Jinghe, et al. Measurement of dose rate effects on electronic devices and circuits[J]. Microelectronics, 2001, 31(2): 130-134.)

- [6] 马强,林东生,范如玉,等. 瞬时电离辐射剂量率对 BiCMOS 运放输出扰动时间的影响[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(z1):545-549. (MA Qiang,LIN Dongsheng,FAN Ruyu,et al. Transient radiation induced disturbance duration behavior of BiMOS op-amp output due to dose rate[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010,44(z1):545-549.)
- [7] OH S C,LEE N H, LEE H H. The study of the transient radiation effects on electronic devices caused by pulsed high energy gamma-ray[C]// 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems. Jeju Island,South Korea: IEEE, 2012:1233-1236.
- [8] ALEXANDER D R. Transient ionizing radiation effects in devices and circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(3):565-582.

作者简介：



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 .email:16220253@qq.com.

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.

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.

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.

刘 娜(1984-), 女, 陕西省渭南市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数模混合集成电路研制.

(上接第 128 页)

- [6] ASSADERAGHI F,SINITSKY D,PARKE S,et al. A dynamic threshold voltage MOSFET(DTMOST) for ultra-low voltage operation[C]// International Electron Devices Meeting. [S.l.]:IEEE, 1994:809-812.
- [7] GROMOV V,ANNEMA A J,KLUIT R,et al. A radiation hard bandgap reference circuit in a standard 0.13 μm CMOS technology[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007,54(6):2727-2733.
- [8] ANNEMA A J. Low-power bandgap references featuring DTMOST's[J]. IEEE J. Solid-St.Circ., 1999,34(7):949-955.
- [9] PIERRET R F. Semiconductor Device Fundamentals[M]. [S.l.]:Pearson Education, 1996.

作者简介：



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 .email:liuzhi6048@126.com.

杨力宏(1977-), 男, 上海市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事数模混合集成电路研制、抗辐射加固技术研究工作.

姚和平(1982-), 男, 陕西省宝鸡市人, 硕士, 工程师, 主要从事数模混合集成电路研制、抗辐射加固技术研究工作.

梁 希(1986-), 男, 西安市人, 硕士, 主要从事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设计.