文章编号: 2095-4980(2019)03-0515-05

一种抗辐照的光电探测芯片设计

何林彦,罗 萍,周 枭,凌荣勋

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610000)

摘 要:光电耦合器的核心模块是光电探测芯片。介绍了一种抗辐照光电探测芯片的设计, 该电路基于 0.5 μm 标准互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺研制,内部包含跨阻放大器(TIA)、基准 源和比较器等模块电路,并通过电路结构和版图设计进行抗辐照加固。测试结果表明,抗总剂量 能力达到 200 krad(Si),同时,该芯片数据传输速率可达 10 MBd,其输入高电流范围为 6~18 mA。 关键词:光电探测芯片;抗辐照加固;总剂量效应;跨阻放大器

中图分类号: TN432 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201903.0515

Design of radiation hardening optical receiver chip

HE Linyan, LUO Ping, ZHOU Xiao, LING Rongxun

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract : The core module of photoelectric coupler is optical receiver chip. A kind of radiation-hardened optical receiver chip design is introduced, and the circuit is based on 0.5 µm standard Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) technology, which consists of Transimpedance Amplifier(TIA), reference, comparator, and so on. The circuit is hardened in radiation by circuit structure and layout design. Results indicate that the chip performs well when the total ionizing dose attains to 200 krad(Si). The chip data transfer rate can be up to 10 MBd, and its high input current ranges from 6 mA to 18 mA.

Keywords: optical receiver chip; radiation hardening; total dose effect; Transimpedance Amplifier

高速数字光电耦合器由高速发光二极管(Light Emitting Diode, LED)与光电探测芯片组成,核心是光电探测芯片,其性能直接决定光电耦合器的数据传输质量^[1]。利用光电耦合器能实现输入输出完全电气隔离,并且可以高质量传输串行数字信号。常见光电探测芯片多适用于光纤通信的混合集成光电探测芯片,专门针对光电耦合器的光电探测芯片研究较少。文献[2-5]在不同尺寸的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺下通过空间调制光探测器技术或均衡器技术实现了 Gb/s 量级传输速率光电探测芯片。随着光电混合集成电路技术的发展及生产工艺的日趋成熟,光电耦合器在航空和民用领域都受到普遍青睐。对于光电耦合器在航天领域的应用,须充分考虑空间环境中各类辐射源。地外空间环境中存在质子、中子、电子、伽马射线以及核爆射线等多种辐射源。空间辐射环境中的射线主要包括银河宇宙射线、太阳宇宙射线和地球辐射带。在上述辐射源作用下,电子元器件容易受到辐照影响,导致器件性能退化甚至失效。如γ射线是在其结构中产生缺陷能级,从而产生总剂量效应^[6-9];α粒子等重粒子在集成度高的半导体器件中产生软误差,使集成电路产生扰动,产生单粒子效应^[10];中子和质子等高能粒子通过破坏原子晶格结构,改变杂质浓度,形成位移效应。光电探测芯片中大部分电路由低压 MOS 管组成,辐射环境中易受质子、电子、高能射线等轰击,产生总剂量效应,器件出现阈值电压负向漂移、泄漏电流增加以及沟道载流子迁移率降低等现象。器件参数的变化则会在不同程度上引起电路损伤,严重时会导致电路失效。针对该问题,现有设计对工艺和版图采取措施进行抗辐照加固,但针对电路的抗辐照加固设计较少。因此,设计一款用于高速数字光电耦合器且具有抗辐照能力的光电探测芯片既有广阔的市场前景,又对我国航天事业有着重要意义。

基于 0.5 μm 标准 CMOS 工艺,本文设计了一款具有抗辐照能力的光电探测芯片。该芯片在电路设计和版图 上采用了抗辐照加固,并提出一种带有自动增益控制的跨阻放大器(TIA)设计,使其达到 200 krad(Si)的抗总剂量 电离辐射的水平。

1 电路整体设计

芯片整体框图如图 1 所示,本文设计的抗辐照 加固光电探测芯片数据传输速率为 10 MBd,光电 探测芯片由光探测器、TIA、比较器、输出驱动电 路等主要模块组成。当光源 LED 发射的光信号经 由空气传播到光探测器上时,光探测器会把光信号 转化为电流信号。由于电流信号不便于直接处理, 因此通过跨阻放大器转换并提供一定增益,将电流 信号转换为电压信号。然后经由比较器整形,得到 标准的数字信号。为了使输出具有一定的驱动能 力,再增加一级输出驱动电路。

2 跨阻放大器设计

常用 TIA 结构中的电压放大器存在单级增益低,电源抑制比(Power Supply Rejection Ratio, PSRR)低等缺点。本文设计采用的 TIA 拓扑结构如 图 2 所示,其中第一级是共源放大器,提供高跨导; 第二级是电流镜,用于隔离第一级和第三级;第三 级是共源放大器和电阻构成的局部负反馈。该 TIA



中的电压放大器加入局部负反馈(R_{1,TIA}),减小了第三级电路的输入电阻,从而将开环低频次极点推高并且降低了静态功耗,增大了电路带宽和 PSRR。

假设主极点在输入端,整体 TIA 电路直流增益和带宽分别为:

$$\left|Z_{\text{TIA,DC}}\right| = R_{\text{TIA}} \tag{1}$$

$$BW_{\rm TIA} = \frac{A}{2\pi R_{\rm TIA} C_{\rm in}} \tag{2}$$

式中: A 是 TIA 中三级电压放大器的电压增益; Cin 是 TIA 中三级电压放大器的输入电容。

采用二端口分析法对上述 TIA 结构中的第三级局部跨阻放大器进行分析,可得到精确的传输函数:

$$Z_{l_{-TIA}} = \frac{A_{l}R_{l_{,TIA}} + r_{o}}{1 - A_{l} + s\left[R_{l_{,TIA}}C_{l,in} + r_{o}\left(C_{l,in} + C_{L}\right)\right] + s^{2}R_{l_{,TIA}}r_{o}C_{l,in}C_{L}}$$
(3)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1 - A_{\rm l}}{R_{\rm l,TIA} r_{\rm o} C_{\rm l,in} C_{\rm L}}} \tag{4}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\left[R_{l,\text{TIA}}C_{\text{in}} + r_{\text{o}}\left(C_{\text{in}} + C_{\text{L}}\right)\right]^{2}}{4(1 - A_{\text{l}})R_{l,\text{TIA}}r_{\text{o}}C_{l,\text{in}}C_{\text{L}}}}$$
(5)

式中: A₁是电压放大器的电压增益; r₀是电压放大器的输出电阻; C_L为负载电容和输出电容之和; C_{1,in}表示输 入电容。从上述分析可以看出,这是一个二阶系统。

根据式(3)~(5),可近似得出极点频率表达式:

$$f_{\rm nd,l} = A_{\rm l} / (2\pi R_{\rm l,TIA} C_{\rm l,in})$$
(6)

$$f_{\rm nd,2} = 1 / \left(2\pi r_{\rm o} C_{\rm L} \right) \tag{7}$$

由式(6)可知,相对于直接用电阻做为负载,该电路将系统次极点推高了A₁倍,有效拓宽电路带宽。

3 抗辐照加固设计

总剂量效应与氧化层厚度有关,当栅氧化层厚度小于 10 nm 时,栅氧层中的总剂量效应将消失^[11]。与此同时,质量较差的厚场氧中总剂量效应的影响将会更显著。本文使用 0.5 μm 标准 CMOS 工艺,可忽略栅氧层中总

剂量效应对器件的影响。而相对较厚的场氧中堆积正电荷,使 P 型衬底中产生反型层,源漏极间发生边缘漏电,如图 3 所示。NMOS 管源极与 N 阱之间也因此发生导通,产生场氧漏电流,如图 4 所示。



3.1 电路加固

针对总剂量效应对电路的影响,专门在电路方面 进行了抗辐照加固。辐照效应使光探测器中的载流子 寿命降低,扩散电流减小,从而出现响应度降低现象。 为了保证电路在辐照条件下正常工作,应使后级电路 对光电流退化留有一定裕度。在 TIA 中加入自动增益 控制管,增大其动态输入范围,具体电路如图 5 所示。

输入光电流经过反馈电阻流入 MP3 管,随着输入 光电流增大,TIA 输出电压也不断增大。当输入光电 流超过一定值时,则会导致 MP3 管进入线性区,电路 呈现非线性工作状态。为避免在电路中引入饱和非线 性环节,对TIA 增益进行动态控制,引入 MP4 管。输 入光电流较小时,输出电压也较小,MP4 管截止,反



馈电阻为 R_{TIA}。输入光电流不断增大,输出电压也增大,使得自动增益控制管 MP4 导通, MP4 处于亚阈值导通。 此时的等效反馈电阻等于 R_{TIA} 与 r_{ds,MP4} 并联, r_{ds,MP4} 是 MP4 管等效电阻,相比输出电压较小时的反馈电阻要小。 即等效跨阻增益减小,输出电压不易发生饱和,保证了电路不会进入饱和非线性状态。

3.2 版图加固

针对总剂量效应引起的 MOS 管漏电流增大,电路中所有 NMOS 都 由环栅 NMOS 代替。环栅 MOS 管的版图种类繁多,本设计采用截角正 方形栅^[12],如图 6 所示。源极和漏极间只有厚度较小且质量更优的栅氧, 不存在厚场氧。在辐照环境下,栅氧层中累积电荷较厚场氧大大减少, 有效抑制源极和漏极间边缘漏电。为方便仿真,在现有工艺库基础上完 成了环栅器件仿真库的建立。

4 测试结果及分析

所设计光电探测芯片在理化技术研究所进行了 200 krad(Si)的总剂 量试验。试验采用钴 60γ射线辐射源头,剂量率为 50 rad/s 或 100 rad/s。 整个试验过程中实时监测芯片电源电流,并在剂量结点用示波器检测输 出波形,读取传输延迟时间。表 1 是整个试验过程中,辐照前后测试数据的对比结果。



Fig.6 Layout of enclosed-gate NMOS 图 6 环栅 NMOS 版图

经过性能参数传输延迟时间辐照前后对比,所设计的芯片在总剂量为 200 krad(Si)时仍能正常工作,且参数 变化不明显。目前国内相关产品的抗辐照能力多数低于 200 krad(Si),文献[13-15]中测试产品的辐照剂量达到 100 krad(Si)。因此,本芯片实现了更为优异的抗辐照能力。

Table1 Parameter comparison by total ionizing dose radiation experiment						
number of chip		quiescent current/mA	dynamic current/mA	t _{PLH} /ns	t _{PHL}	
#1	before radiation	5.519	12.665	1 060	10	
	after radiation	5.529	12.880	1 040	6	
#2	hafara radiation	5 272	12 509	1 200	4	

表 1 总剂量轴	ā射前后芯片参数比对表

tPLH: propagation delay time, low to high level output t_{PHL}: propagation delay time, high to low level output

结论 5

本文介绍了一种抗辐照加固光电探测芯片的设计。分析对比传统电路结构的优缺点,提出一种静态功耗小, PSRR 高的 TIA 结构。在此基础上,针对本次设计所采用的 0.5 μm 标准 CMOS 工艺,对芯片进行了抗辐照加固 设计。电路方面,在 TIA 结构中加入自动增益控制管以拓宽动态输入范围;版图方面,完成环栅 NMOS 建库工 作,将设计中 NMOS 管全部替换成环栅 NMOS。同时,绘制版图过程中尽可能多地添加隔离环,防止辐照环境 下管子间的场氧漏电。经过流片验证,芯片的抗总剂量能力达到 200 krad(Si),完成研制要求。

参考文献:

- [1] 万宵鹏. 基于 CMOS 工艺的抗辐照加固光电探测芯片设计[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (WAN Xiaopeng. Design of rhbd optical receiver chip based on CMOS process[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [2] PAN Quan, WANG Yipeng, LU Yan, et al. An 18 Gb/s fully integrated optical receiver with adaptive cascaded equalizer[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016,22(6):361-369.
- [3] DONG Yunzhi, MARTIN K W. 4 Gbps POF receiver using linear equalizer with multi-shunt-shunt feedbacks in 65 nm CMOS[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II :Express Briefs, 2013,60(10):617-621.
- [4] CARUSONE A C,YASOTHARAN H,KAO T. CMOS technology scaling considerations for multi-Gbps optical receivers with integrated photodetectors[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011.46(8):1832-1842.
- [5] LEE D,HAN J,CHANG E. An 8.5 Gb/s CMOS OEIC with on-chip photodiode for short-distance optical communications[C]// 2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010:362-363.
- [6] FARUK M G,WILKINS R,DWIVEDI R C,et al. Proton and neutron radiation effects studies of MOSFET transistors for potential deep-space mission applications[C]// 2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky,MT,USA:IEEE, 2012:1-13.
- 刘佰清,刘国柱,吴健伟,等. 栅氧化方式对 NMOS 器件总剂量电离效应的影响[J]. 电子与封装, 2017,17(11):44-48. [7] (LIU Baiqing,LIU Guozhu,WU Jianwei, et al. The effect of oxide methods on TID radiation[J]. Electronic & Package, 2017, 17(11):44-48.)
- [8] JAMES R S. Radiation effects in MOS oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008,55(4):1833-1853.
- [9] 李致远. 半导体器件辐射效应及抗辐射防护加固[J]. 电子技术, 2006(19):138-141. (LI Zhiyuan. Radiation effect and reinforce of radiation resistance for semiconductor device[J]. Electronic Technique, 2006(19):138-141.)
- ZHANG Z,LEI Z,YANG Z,et al. Single event effects in COTS ferroelectric RAM technologies[C]// 2015 IEEE Radiation [10] Effects Data Workshop(REDW). Boston, MA, USA: IEEE, 2015:167-171.
- BENEDETTO J M, BOESCH H E, Mclean F B. Hole removal in thin-gate MOSFETs by tunneling[J]. IEEE Transactions on [11] Nuclear Science, 1985,32(6):3916-3920.
- 印琴,蔡洁明,刘士全,等. 集成电路总剂量加固技术的研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2): [12] 148-152. (YIN Qin,CAI Jieming,LIU Shiquan, et al. Research progress on the technology of total dose radiation hardened[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):148-152.)
- 郝娜. 空间辐射对光电耦合器件性能影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. (HAO Na. The study on [13] radiation effect of optocoupler[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [14] 李铮,于庆奎,罗磊,等. 宇航用双极器件和光电耦合器位移损伤实验研究[J]. 航天器环境工程, 2017,34(1):86-90. (LI Zheng, YU Qingkui, LUO Lei, et al. Experimental study on displacement damage of aerospace bipolar and optocoupler devices[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017,34(1):86-90.)
- 黄绍艳,刘敏波,姚志斌,等.光电耦合器不同辐照剂量率下的伽玛总剂量适应[J].强激光与粒子束,2014,26(8): [15] 084001-1-084001-5. (HUANG Shaoyan,LIU Minbo,YAO Zhibin,et al. Total dose effect on optocouplers subjected to different dose rate irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(8):084001-1-084001-5.)