BiCMOS工艺PWM主控器总剂量效应研究

雷雨涵[1,3,4,5], 王锦春[2], 周　东[1,3,4], 张　丹[1,3,4,5], 文　林[1,3,4], 郭　旗[1,3,4], 李豫东[1,3,4]
（1. 中国科学院 新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471099; 3. 特殊环境条件功能材料与器件全国重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
4. 新疆极端环境电子学重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 5. 中国科学院大学, 北京 100049）

摘　要： 针对UCC2800型PWM主控器开展总剂量辐射损伤效应研究,分析了PWM主控器输出脉冲和占空比的变化规律,探讨了PWM主控器单元模块构成的DC-DC电源转换器在不同负载电流条件下的输出电压退化规律,揭示了升压型DC-DC电源转换器辐射损伤退化机理。研究结果表明,PWM主控器中的误差放大器退化会导致PWM主控器输出波形变化,输出波形的变化会导致占空比变大,占空比的变化导致功率开关管MOSFET导通时间变大,进而导致DC-DC电源转换器输出电压退化;负载电流越大,PWM主控器输出占空比越大,DC-DC电源转换器输出电压退化越严重。

关键词： 总剂量效应; PWM主控器; 占空比; 负载电流; 输出电压
中图分类号：TN433;V443;TP273　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004-3365(2025)06-1089-06
DOI：10.13911/j.cnki.1004-3365.250145

Study of Total Ionizing Dose Effects on BiCMOS PWM Controller

LEI Yuhan[1,3,4,5], WANG Jinchun[2], ZHOU Dong[1,3,4], ZHANG Dan[1,3,4,5], WEN Lin[1,3,4], GUO Qi[1,3,4], LI Yudong[1,3,4]
（1. *Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *P. R. China*;
2. *Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang, Henan* 471099, *P. R. China*;
3. *State Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environmental Conditions, Urumqi* 830011, *P. R. China*;
4. *Xinjiang Key Laboratory of Extreme Environment Electronics, Urumqi* 830011, *P. R. China*;
5. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *P. R. China*）

Abstract: The total dose radiation damage effect of the UCC2800 PWM controller was investigated, and the variation law of the output pulse and duty cycle of the PWM controller was analyzed. Through the output voltage degradation law of the DC-DC power converter composed of PWM controller unit modules under different load current conditions, the influence of the radiation damage of the PWM controller on the performance degradation of the boost DC-DC power converter was revealed. The experiment results showed that the degradation of the differential amplifier in the PWM controller will lead to the change of the output waveform of the PWM controller, which in turn leads to the degradation of the output voltage of the DC-DC power converter. The larger the load current induced the larger output duty cycle of the PWM controller, and the more serious the degradation of the output voltage of the DC-DC power converter.

Key words: total ionizing dose effect; PWM controller; duty cycle; load current; output voltage

收稿日期：2025-04-14;**定稿日期：**2025-09-04
基金项目：航空科学基金(ASFC-202200240Z8001);中国科学院青年创新促进会(2021437);中国科学院重点部署基础科研项目(JCPYJJ-22011)
作者简介：雷雨涵(2000—),女(汉族),陕西西安人,硕士研究生,主要从事红外探测器及读出电路辐射效应的研究。
周　东(1986—),男(汉族),河南镇平人,博士,研究员,主要从事半导体材料与器件辐射效应的研究。通信作者。

0 引 言

近年来,由于我国航天事业的迅速发展,半导体电子器件在空间领域的应用越来越广泛,电子系统趋于高度集成化[1-2]。DC-DC电源转换器常被用作二次电源,对航天电子系统进行供电,其可靠性直接决定了电子设备性能[3-4]。脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,PWM)主控器是DC-DC电源转换器的核心模块,PWM主控制器电路抗辐射性能直接影响DC-DC电源转换器输出功能的稳定性[5-6]。空间中存在的大量带电粒子以及高能射线,对半导体器件会产生辐射损伤,而空间辐射损伤效应中的电离总剂量效应(Total Ionizing Dose Effect,TID)以下简称总剂量效应,会引起PWM主控器性能参数退化,从而导致DC-DC电源转换器功能失效[7-8]。因此,研究PWM主控器的总剂量效应具有重要意义。

在辐射效应研究上,P. C. Adell等人针对由误差放大器、基准源、比较器组合的混合型脉冲宽度调制(Hybrid Pulse Width Modulation,H-PWM)主控器电路开展总剂量效应研究,研究结果表明,误差放大器失效会导致PWM输出脉冲异常[9]。L. Hwan等人针对CMOS工艺电流控制型脉冲宽度调制(Inductor Current Pulse Width Modulation,I-PWM)主控器开展总剂量效应研究,研究结果表明,PWM输出脉冲信号缺失导致DC-DC电源转换器输出功能失效[10]。W. H. The等人提出了负载电流对集成式DC-DC电源变换器总剂量效应的影响[11]。目前针对BiCMOS工艺I-PWM主控器在不同负载电流条件下输出脉冲变化规律开展的研究并不充分,未揭示PWM主控器输出功能失效机理。

本文针对PWM主控器以及PWM主控器构成的DC-DC电源转换器开展总剂量效应试验研究,分析I-PWM主控器在不同负载电流条件下的总剂量效应退化规律及主控器电路参数退化机理,揭示DC-DC电源转换器输出功能失效机制。本文主要目的在于提高对I-PWM主控器总剂量效应的认识,并为DC-DC电源转换器抗辐射性能评估方法建立提供理论支撑。

1 样品信息与实验细节

辐照实验采用的PWM主控器是一款集成式BiCMOS工艺的电流型脉宽调制器,其内部集成了误差放大器、比较器、基准源等器件,与功率开关MOSFET共同构成Boost升压型DC-DC电源转换器模块,该模块典型输入电压为11 V,输出电压为16.8 V,工作电流最大可以达到0.4 A,典型工作电流为0.2 A。

图1为Boost升压型变换器典型电路图。当PWM主控器电路输出高电平脉冲时,功率开关管NMOSFET(Q_1)管打开,电感将磁能转化为电能为负载提供能量;当PWM主控器电路输出低电平时,功率开关管PMOSFET(Q_2)管打开,电感将电能转化为磁能[12]。

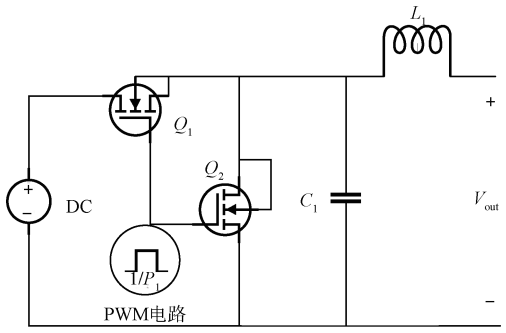

图1 升压型DC-DC电源变换器典型电路图

图2为PWM主控器脉宽调制过程典型电路图。PWM主控器由误差放大器、锯齿波发生器和比较器组成。基准电压V_{REF}连接误差放大器同相输入端,反馈电压V_{FB}连接误差放大器反向输入端,二者比较后得到误差放大器输出电压V_{COMP}。锯齿波发生器产生恒定峰值和恒定周期的锯齿波,输入到比较器的正向端。误差放大器输出电压V_{COMP}与锯齿波输入电压进入比较器进行比较,当锯齿波输入电压超过V_{COMP}时,PWM输出脉宽调制信号;当锯齿波输入电压小于V_{COMP}时,PWM输出信号被锁定,输出关闭[13-14]。

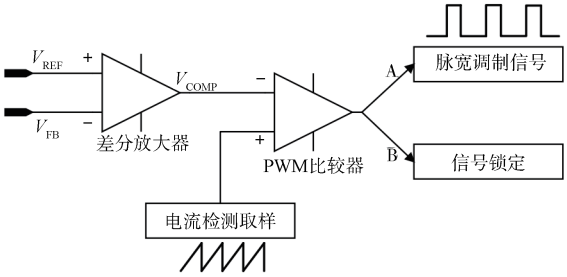

图2 PWM主控器工作原理图

PWM主控器中,基准源电压、反馈电压、误差放大器输出电压以及DC-DC电源转换器输出电压

之间的关系为：

$$V_{COMP}=k(V_{RRF}-V_{FB}) \tag{1}$$

$$V_{FB}=V_{out}\cdot\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right) \tag{2}$$

式中，k为常数，R_1和R_2为分压电阻。

Boost 型电源转换器输入电压 V_{in}、输出电压 V_{out}、占空比 D、导通时间 T_{on}之间的关系为：

$$D=\frac{T_{on}}{T} \tag{3}$$

$$V_{out}=\frac{1}{1-D}\cdot V_{in} \tag{4}$$

辐照实验选择中国科学院新疆理化技术研究所 ^{60}Co－γ射线为辐照源。辐照实验过程中，样品输入电压为 11 V，负载电流分别是 0 A、0.1 A 和 0.2 A，辐照剂量率为 0.1 Gy(Si)/s，设置 5 个测试剂量点分别为 0、30、60、90、120 Gy(Si)，每辐照到设定测试剂量点，对样品性能进行测试，直至达到最大辐照剂量，实验条件见表 1。样品性能测试系统如图 3 所示，该测试系统基于数字万用表、程控电子负载与直流电源、示波器等分立仪器，通过编写 LabVew 程序实现了自动测试 DC-DC 电源转换器的输出电压。辐照和测试过程均在室温下完成。

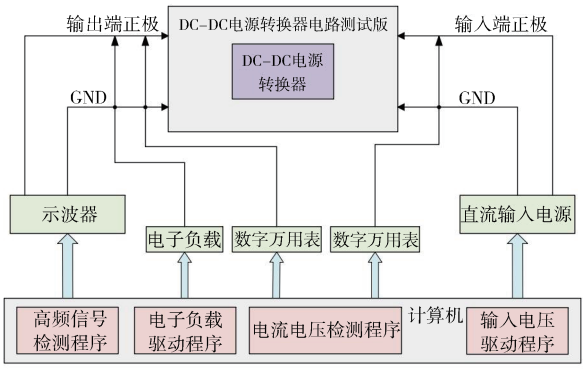

图 3　测试系统框图

表 1　实验条件

输入电压/V	负载电流/A	剂量率/[Gy(Si)/s]	剂量点/Gy(Si)
11	0, 0.1, 0.2	0.1	0, 30, 60, 90, 120

2　实验结果

2.1　总剂量辐照对 PWM 占空比的影响

图 4 为负载电流为 0.2 A 条件下，占空比 D 随总剂量变化的函数关系图。从图中可以看出，当辐照总剂量累积至 60 Gy(Si)时，占空比随总剂量增加而增大，超过 60 Gy(Si)，PWM 输出占空比功能失效，无信号输出。图 5 为该负载电流条件下，占空比的函数波形变化图。从图中可以看出，当总剂量累积至 60 Gy(Si)时，功率 MOSFET 平均导通时间 T_{on}较大。

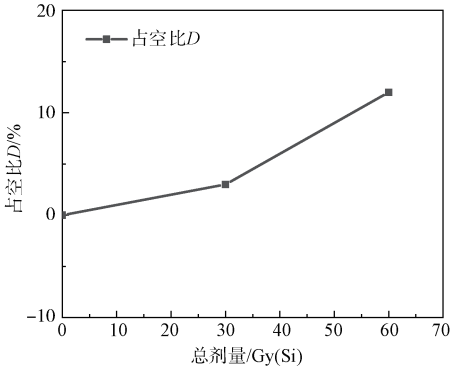

图 4　负载电流相同条件下，占空比随总剂量变化的关系

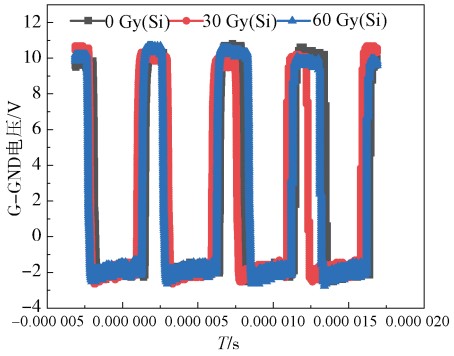

图 5　PWM 波形随辐照剂量的变化情况

2.2　负载电流对 PWM 占空比退化的影响

图 6 为不同负载电流条件下的占空比 D 随总剂量变化的函数关系图。从图中可以看出，当累积总剂量至 30 Gy(Si)时，占空比变化比较缓慢。当总剂量累积至 60 Gy(Si)时，占空比发生急剧退化，不同负载电流之间的占空比退化程度开始出现显著差异，0.2 A 负载电流条件下的占空比退化程度最为显著，占空比已完全退化。图 7 为不同负载电流条件下，当辐照总剂量累积至 60 Gy(Si)时，占空比的函数波形图。从图中可以明显看出，负载电流为 0.1 A 和负载电流为 0.2 A 条件下，功率开关管导通时间 T_{on}较大，负载电流为 0.2 A 的 T_{on}最大。综上所述，负载电流越大，占空比退化程度越大，导通时间越大。

2.3　总剂量辐照对误差放大器的影响

图 8 为负载电流为 0.2 A 条件下，误差放大器

输出电压随总剂量变化的函数关系图。从图中可以看出，当辐照剂量累积至30 Gy(Si)时，误差放大器输出电压随总剂量的增加而缓慢增大。当累积剂量超过30 Gy(Si)时，误差放大器输出电压随总剂量的增加而急剧增大。当总剂量超过60 Gy(Si)时，误差放大器输出电压开始减小，直至小于初始值。

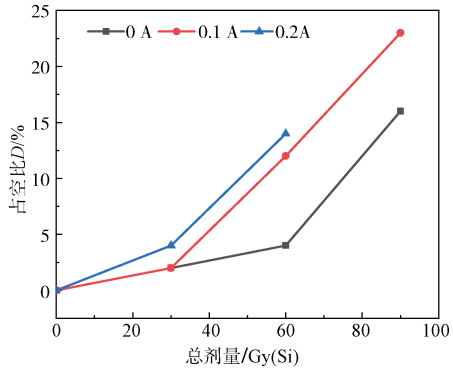

图6　不同负载电流条件下，占空比随总剂量变化的关系

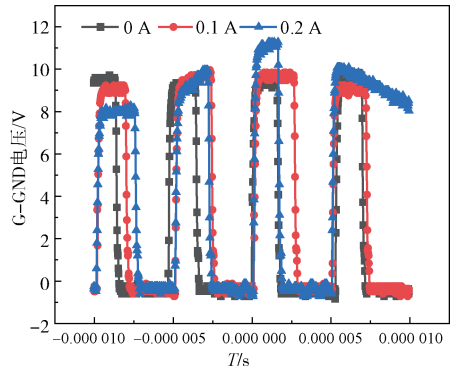

图7　不同负载电流条件下，占空比的变化波形

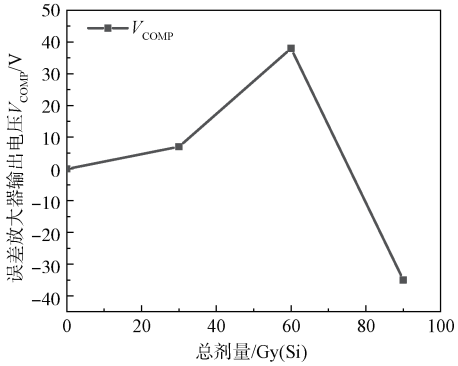

图8　同一负载电流辐照条件下，误差放大器输出电压随总剂量变化的关系

图9为该负载电流条件下，反馈电压V_{FB}随总剂量增加而变化的函数关系图。从图中可以显著看出，当辐照剂量累积至30 Gy(Si)时，反馈电压V_{FB}随总剂量的增加而缓慢增大。当总剂量超过30 Gy(Si)时，反馈电压V_{FB}随总剂量的增加而迅速增大。当总剂量超过60 Gy(Si)时，反馈电压V_{FB}开始减小，直至小于初始值，此时，输出电压已退化至约等于输入电压。

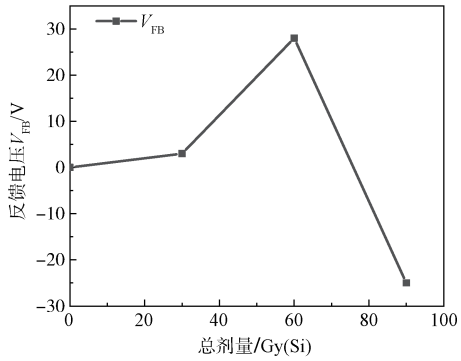

图9　同一负载电流条件下反馈电压随总剂量变化的关系

图10为基准电压V_{REF}随总剂量变化的函数关系图。从图中可以明显看出，基准电压随总剂量的增加而增大。当总剂量小于30 Gy(Si)时，基准电压随总剂量的增加而缓慢增大，基准电压退化较小。当辐照剂量超过30 Gy(Si)时，基准电压随总剂量的增大，其退化趋势变快。当总剂量累积至90 Gy(Si)时，基准电压值增大至初值两倍。

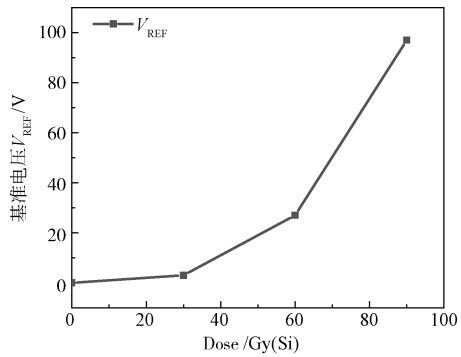

图10　同一负载电流条件下，基准电压随总剂量变化的函数关系

2.4　负载电流对DC-DC输出电压的影响

图11为不同负载电流条件下，输出电压随总剂量变化的函数关系图。从图中可以看出，当总剂量累积至30 Gy(Si)时，输出电压随总剂量的增加而出现微小增大。当总剂量累积至60 Gy(Si)时，输出电压随总剂量增加而显著增大，负载电流为0.2 A辐照条件下，输出电压退化程度最严重。当总剂量超过60 Gy(Si)时，负载电流为0.2 A辐照条件下的输出电压开始反方向退化，直至退化值小于初值，并接近输入电压值。当总剂量超过90 Gy(Si)时，0 A和0.1 A辐照条件下的输出电压开始同时出现反方向退化，综

上所述，负载电流越大，输出电压退化程度越严重。

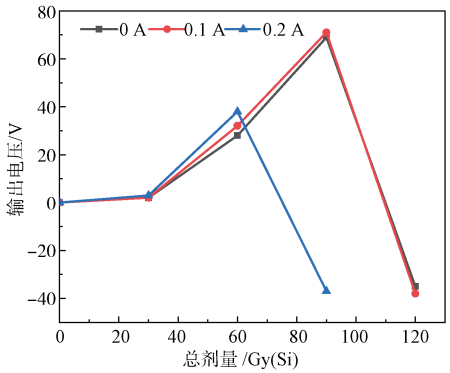

图 11　不同负载电流条件下，输出电压随总剂量的变化关系

3　结果分析

PWM 主控器内部集成了基准源、误差放大器、比较器等核心部件，其关键性能参数在电离总剂量效应影响下均发生退化。

基准源的核心是基于双极型晶体管的带隙基准电路。前期研究表明，经过总剂量辐照后，双极晶体管 SiO_2 钝化层及 Si-SiO_2 界面处将产生氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷[15]。氧化物陷阱电荷导致耗尽区向基区扩展，增加耗尽层面积，界面态陷阱电荷在界面处起复合中心的作用，增加表面复合速率，二者共同作用引起基极电流增大，最终导致基准电压 V_{REF} 随辐照剂量的增大而增大[16]。

对比图 9 和图 10 可知，总剂量辐照导致基准电压和反馈电压均发生退化，由于 V_{REF} 随总剂量增加而退化的程度大于 V_{FB} 的退化程度，因此，由式(1)可知，误差放大器的输出电压随总剂量的增加而增加。

如图 12 所示，通过 PWM 主控器工作原理可知，V_{COMP} 通过与锯齿波电压 V_{max} 比较控制 PWM 波形输出。总剂量辐照导致 PWM 主控器误差放大器输出电压退化，随着总剂量增加而增加，导致导通时间增加 T_{on}，由式(3)可得，导通时间增大使 PWM 波形占空比 D 增大。因此，由式(4)可得，占空比 D 增大导致输出电压增大。

DC-DC 电源转换器电路中，功率 MOSFET 作为开关元件控制电路充电与放电过程。图 13 为 MOSFET 开关管导通时的典型电路图，图 14 为 MOSFET 开关管导通时的典型电路图。当 MOSFET 开关管导通，电源为负载提供能量，同时，电感将电能转化为磁能，电感不断地积累能量；当 MOSFET 开关管关断，电感将磁能转换成电能输出，输出功率与电流成正比。经过辐照后，氧化物陷阱电荷导致了功率开关管 MOSFET 阈值电压负向漂移[17]，使 MOSFET 在更低电压下导通，从而导致 MOSFET 导通时间增大，此时负载电流越大，电感储能越多，进而导致输出电压退化更严重。

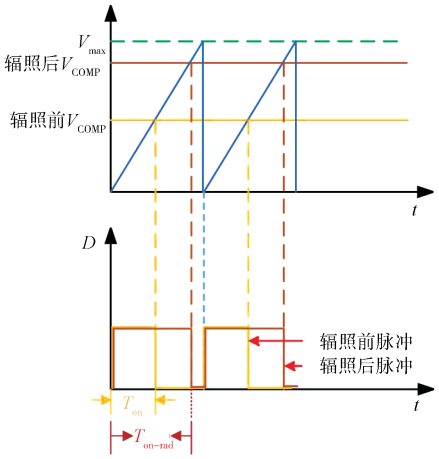

图 12　仿真误差放大器输出电压退化对导通时间的影响

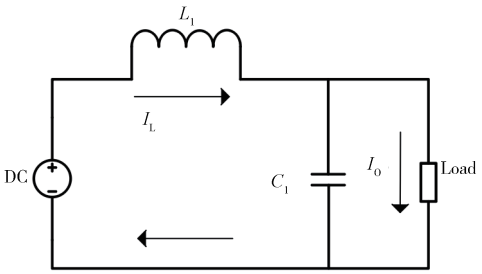

图 13　MOSFET 开关管导通时的典型电路图

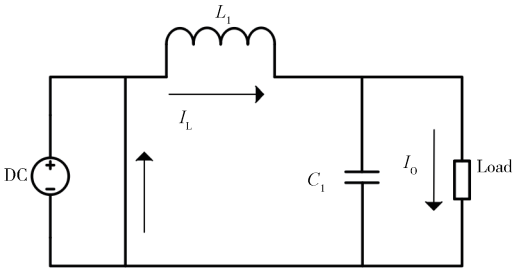

图 14　MOSFET 开关管关断时的典型电路图

从输出电压随辐照总剂量的变化情况可以得出，输出电压随辐照剂量的增大而增大，当达到一定阈值后，输出电压急剧减小，此时输出电压与输入电压相等。由不同负载电流条件下占空比 D 的退化规律分析可得，输出电压减小的阈值与 PWM 控制器失效阈值相同。由于 PWM 控制器失效导致无输出波形，结合输出电压、占空比、输入电压的关系，因

此输出电压、反馈电压与误差放大器输出电压呈现先增大后减小的变化趋势。

4 结 论

本文针对PWM主控器以及PWM主控器构成的DC-DC电源转换器开展总剂量效应试验研究。总剂量辐照引起双极晶体管基极电压退化,导致PWM主控器基准电压、反馈电压和误差放大器输出电压随辐照剂量增加而增大;误差放大器输出电压增大导致PWM主控器占空比增大,从而使DC-DC电源转换器输出电压升高;辐照导致功率MOSFET阈值电压漂移,导通时间增大,此时负载电流越大,电感储能越多,进而导致输出电压退化更严重;DC-DC电源转换器通过PWM主控器波形控制电压输出,PWM主控器占空比随辐照剂量增加而增大,输出电压随之增大,当PWM主控器失效无波形输出后,此时输出电压等于输入电压,因此输出电压、反馈电压和误差放大器输出电压呈现随辐照剂量增加先增大后减小的现象。

参 考 文 献:

[1] LI P W, ZENG L, LI X J, et al. The investigation on single-event transients from DC/DC power converters for space application[C]//2017 Prognostics and System Health Management Conference. Harbin, China. 2017: 1-4.

[2] BELLONI F, MARANESI P G, RIVA M. DC/DC converter for the international space station[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 623-634.

[3] BUSSARAKONS T. Military satellites pose engineering challenges in DC-DC converter development[J]. RF DESIGN, 2004, 27(5; SUPP): 6-12.

[4] MANANDHAR U, WANG B F, ZHANG X N, et al. Joint control of three-level DC - DC converter interfaced hybrid energy storage system in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2248-2257.

[5] REN Y, SHI S T, CHEN L, et al. Correlation of heavy-ion and laser testing on a DC/DC PWM controller[J]. Journal of Electronic Testing, 2013, 29(4): 609-616.

[6] ZHAO J K, IU H H C, FERNANDO T. A design of single-switch two-stage DC-DC converters with PWM and PFM for off-grid solar power system[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 3(3): 44-51.

[7] ADELL P C, SCHRIMPF R D, HOLMAN W T, et al. Total-dose and single-event effects in DC/DC converter control circuitry[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6): 1867-1872.

[8] PAPPALARDO S, ARDIZZONE C, PRINCIPATO O, et al. RHPWM01 Radiation hardened dual channel current mode PWM[C]//2019 European Space Power Conference. Juan-les-Pins, France. 2019: 1-8.

[9] ADELL P C, SCHRIMPF R D, CHOI B K, et al. Total-dose and single-event effects in switching DC/DC power converters [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6): 3217-3221.

[10] HWAN L, SUNG H, YONG L. A study on radiation effects on PWM-IC controller of DC/DC power buck converter[C]//2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems. Gwangju, Korea. 2014: 1754-1757.

[11] TEH W H, BONING D S, WELSCH R E. Multi-strata stealth dicing before grinding for singulation-defects elimination and die strength enhancement: Experiment and simulation[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2015, 28(3): 408-423.

[12] TITUS J L, GEHLHAUSEN M A, DESKO J C, et al. Characterization of a fully resonant, 1-MHz, 25-Watt, DC/DC converter fabricated in a rad-hard BiCMOS/high-voltage process[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1995, 42(6): 2143-2148.

[13] WU T F, CHEN Y K. Modeling PWM DC/DC converters out of basic converter units [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(5): 870-881.

[14] 梁盛铭. 一种抗辐射电流型脉宽调制器的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[15] FLEETWOOD D M. Total ionizing dose effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 1706-1730.

[16] 唐卫斌. 抗辐照加固Boost型DC/DC转换器的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

[17] 高博, 余学峰, 任迪远, 等. Total ionizing dose effects and annealing behavior for domestic VDMOS devices [J]. 半导体学报, 2010, 31(4): 41-45.