

宇航用硅基高压快恢复整流二极管 单粒子烧毁效应研究

刘艳秋¹, 张洪伟¹, 于庆奎¹, 石文坤², 梅博¹, 李鹏伟¹, 周嵘², 曹爽¹

(1. 中国航天科技集团公司第五研究院, 北京 100029;

2. 中国振华集团永光电子有限公司, 贵阳 550000)

摘要: **目的** 针对宇航用硅基高压快恢复整流二极管开展单粒子效应研究。**方法** 针对型号常用的各种工艺结构高压快恢复整流二极管系统, 研究地面单粒子效应试验方法, 包括粒子选择及注量率、单粒子效应检测系统、基于等效制样的单粒子效应试验样品匹配、试验流程, 并选取三款典型器件进行单粒子评估试验, 根据试验结果对硅基二极管单粒子烧毁失效的机理进行初步分析。**结果** 得出了三款典型器件在各偏置电压下抗单粒子烧毁的 LET 阈值。**结论** 形成了较为系统的高压二极管单粒子评估的试验方法, 并可工程化应用。

关键词: 高压二极管; 硅基二极管; 单粒子效应

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.010

中图分类号: V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)03-0059-06

Single Event Burnout Effect on Silicon-based High Voltage Fast Recovery Rectifier Diodes for Aerospace

LIU Yan-qiu¹, ZHANG Hong-wei¹, YU Qing-kui¹, SHI Wen-kun²,
MEI Bo¹, LI Peng-wei¹, ZHOU Rong², CAO Shuang¹

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100029, China;

2. China Zhenhua Group Yongguang Electronics Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the single event effect of silicon-based high voltage fast recovery rectifier diodes for aerospace applications. The ground single event test method was studied for the high voltage fast recovery rectifier diodes with various types of commonly used process structures, including ion selection and flux rate, single event effect detection system, sample matching based on equivalent sample preparation and test flow. Three typical devices were selected for single event evaluation test. The single event evaluation test was carried out for selected typical devices. The mechanism of single event burnout failure of silicon-based diodes was analyzed initially based on the test result. The single particle burned LET threshold of the three typical devices under different bias voltage resistance was obtained. Systematic test methods for single event evaluation of high voltage diodes are developed and can be applied to engineering.

KEY WORDS: high voltage diodes; silicon-based diodes; single event effect.

我国在研制的新一代航天器, 为了提高性能, 降低质量, 需要使用高压快恢复整流二极管, 如新一代

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2019-08-28

Received: 2019-07-25; Revised: 2019-08-28

作者简介: 刘艳秋 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为分立器件应用验证。

Biography: LIU Yan-qiu (1987—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: discrete device application verification.

长寿命平台卫星将采用电推进技术,需要使用 1200 V 高压快恢复整流二极管。航天器电源系统减重对高压功率器件提出了迫切的应用需求。美国 NASA 以太阳能电源系统为例进行推算,使用 300 V 电压的太阳能电池阵,相比 120 V 电压方案,可降低质量 2457 kg,实现越高的电压就会节省越多的质量^[1]。高压快恢复二极管是新一代航天器的关键元器件,具有广泛的应用前景。

航天器工作在空间辐射环境中,空间辐射效应会引起电子器件的性能退化,甚至失效,危害航天器在轨工作的长期连续稳定性能。电子器件空间辐射效应包括单粒子效应、电离总剂量效应、位移损伤效应^[2],因此,对航天器用电子器件有抗辐射指标要求,如对于地球同步轨道长寿命卫星,一般要求抗电离总剂量大于 100 krad(Si),抗单粒子烧毁 (Single Event Burnout, SEB)、单粒子锁定 (Single Event Latchup, SEL) 线性能量传输 (Linear Energy Transfer, LET) 大于 75 MeV·cm²/mg。同时,为了确保航天器的长期可靠性,元器件使用必须满足可靠性降额准则,根据航天器一级降额准则,1200 V 高压快恢复整流二极管安全工作区应不低于 720 V。

早期型号应用的二极管反向击穿电压不高,一般认为二极管对单粒子不敏感。随着新技术的发展,对二极管反向电压提出了更高要求,但是对于高压二极管单粒子效应研究相对较少,因此文中展开了硅基高压快恢复整流二极管的单粒子效应的部分研究。

1 试验方法

有效的单粒子评估试验方法是评估器件抗单粒子能力的基础,为器件在型号中的安全应用提供数据支撑。高压快恢复整流二极管由于耐压高,器件本身的工艺结构特殊,给单粒子评估试验带来很大难度,亟需系统研究高压二极管单粒子效应试验方法。

1.1 粒子选择及注量率

目前,国内常用的单粒子效应模拟试验辐射源有回旋加速器 HIRFL (中科院近代物理研究所)、串列静电加速器 HI-13 (中国原子能科学研究院),见表 1。回旋加速器 HIRFL 可将离子加速到很高的能量,加速后离子的 LET 值可超过 95 MeV·cm²/mg。加速离子的射程长,可在大气环境进行试验,注量率在 1~10⁴/(cm²·s) 区间快速连续可调,但改变离子种类的时间较长,一般需要 3~4 天时间。串列静电加速器 HI-13 可以相对快速地改变离子的种类和能量,最快只需 30 min,但调整离子注量率时间较长 (大约 30 min),提供的离子能量相对较低,离子射程一般较短,满足最小射程 (大于 30 μm) 要求的离子,最大 LET 仅为 37.2 MeV·cm²/mg 左右。

表 1 拟选取的重离子及其特性

辐射源地点	加速器	离子种类	能量/MeV	线性能量传输/(MeV·cm ⁻² ·mg ⁻¹)	射程/μm
北京	HI-13 串列静电加速器	C	80	1.73	127.1
		F	104	4.33	76.6
		Al	140	7.96	60.4
		Si	126	9.6	46.6
		Cl	138	13.9	38.9
		Ti	149	22.6	30.8
兰州	HIRFL 回旋加速器	Ge	230	37.0	32.8
		Kr	407	38.6	50.1
		Xe	1032	69	75.81
		Ta	1044	81.4	83.4
		Bi	1731	91	93.5

根据加速器现状和各种离子调出的难易程度,综合考虑离子种类、能量、硅中的 LET 值及射程,选择试验用离子。地面单粒子效应试验通常用高注量率进行,注量率一般在 1~10⁴/(cm²·s)。

1.2 单粒子效应检测系统

单粒子效应检测系统需要实时监测被测器件发生单粒子烧毁,且能够远程控制,并能对阴极至阳极的漏电流实时检测,并限制电流和调节反向电压。单粒子效应检测系统包括实验室内和实验室外两部分:实验室内主要完成单粒子效应试验过程中的信号采集与分析,实验室外主要是实现对检测系统的远程监测和控制。整个检测系统包括:试验子板、器件单粒子效应测试装置、高压程控电源、主控机箱和远程监控 PC。被测器件置于试验子板上,放在加速器装置中进行单粒子效应试验,试验子板与器件单粒子效应试验测试装置连接。单粒子效应检测系统、路由器通过网线与 PC 相连。PC 控制单粒子效应检测系统启动试验电路板运行,自动采集并分析试验电路板传回的数据。

单粒子效应试验过程中,高压二极管两端加反向电压,保持辐照偏置状态,并实时监测器件阴极至阳极的漏电流 I_R 。正常状态下,漏电流很小,为 nA 级。为准确地提取和测量微小电流信号,采用高精度运算放大器的 nA 级电流放大和检测电路。检测电路根据反馈电流放大测量原理设计,将电流转换为电压信号,微信号采集原理如图 1 所示。

1.3 单粒子效应试验样品制备

对于传统台面工艺的玻璃钝化封装二极管,玻璃钝化对终端的耐压和漏电特性具有重要的作用^[4]。器件结构外观如图 2 所示。玻璃钝化层厚度达毫米级,目前地面试验用重离子射程最大约为 100 μm,直接

试验无法确保试验数据的有效性。一旦将产品开封，PN 结表面将失去络合及保护层，二极管的反向击穿特性由体内击穿变为表面电场击穿，其击穿电压曲线将出现严重退化。在极短时间内，PN 结表面形成大漏电沟道，导致产品失效。同时，台面工艺二极管在

未涂覆玻璃钝化层的情况下，两极接上正常的工作电压必然会击穿两个钼电极之间的空气介质，形成电火花，使器件导通。因此使用台面工艺玻璃钝化封装高压快恢复整流二极管进行单粒子效应试验存在一定难度。

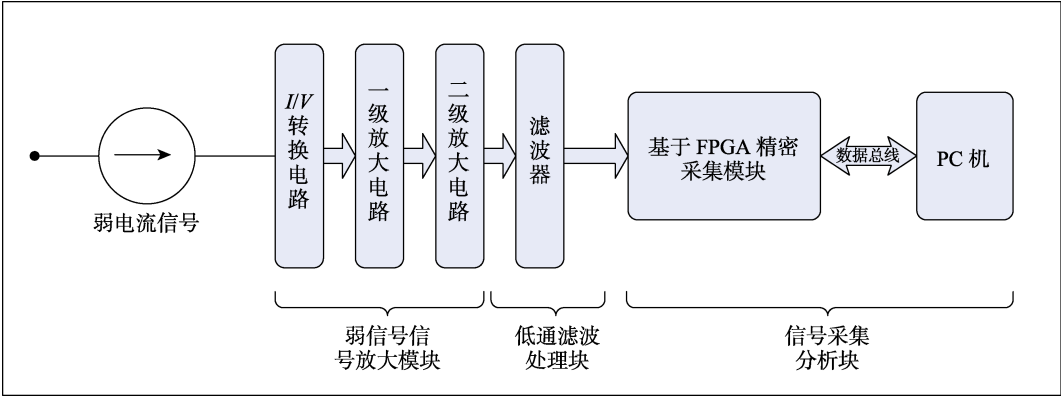


图 1 微信号采集原理
Fig.1 Principle of WeChat ID acquisition

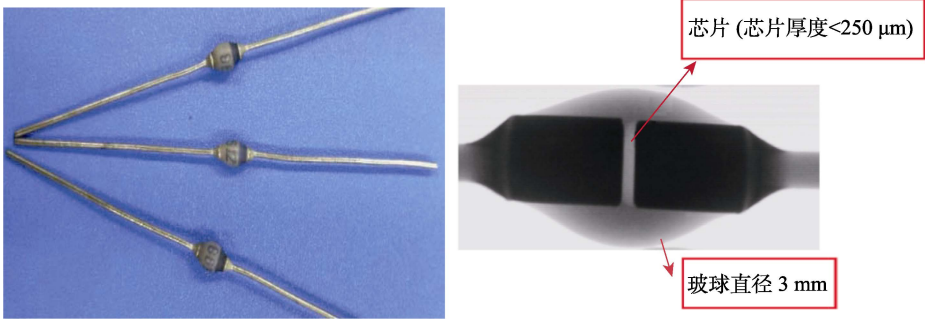


图 2 玻璃钝化封装二极管结构尺寸
Fig.2 Structure size of glass passivated diode

针对台面工艺玻璃钝化封装高压快恢复整流二极管无法通过外力进行“开帽”或“磨剖”的问题，采用“等效制样”的方案。通过玻璃内钝化工艺（如图 3 所示）对台面深结结构的高压二极管芯片实现芯片的钝化保护，改成金属封装，有效开展台面工艺高压二极管的单粒子效应试验。为了便于单粒子效应试验，将采用如图 4 所示的 TO 封装外形。

时，监测并记录辐照过程中器件阴极至阳极的漏电流 I_R 变化。当 I_R 明显增大或达到规定值，且重新加电后器件导通，则判定发生单粒子烧毁效应；辐照至该反向电压 V_R 条件下器件出现失效或注量达到 $1 \times 10^7 / \text{cm}^2$ ，

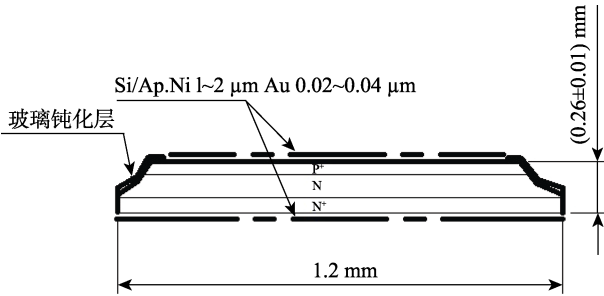


图 3 玻璃内钝化芯片结构
Fig.3 Structure of internal glass passivated chip

1.4 单粒子评估试验流程

单粒子效应检测试验流程如图 5 所示。开始辐照

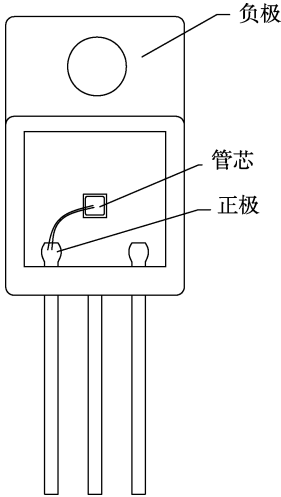


图 4 内钝化芯片封装外形
Fig.4 Packaging appearance of internal passivated chip

停止辐照,并对辐照后样品进行漏电流 I_R 复测,复测 I_R 值大于一定值时,判定器件发生单粒子烧毁^[9]。测试需满足以下条件之一方可停止试验:样品在每一种偏置条件和 LET 下辐照累积注量达到 $1 \times 10^7 / \text{cm}^2$; 发生 1 次 SEB。

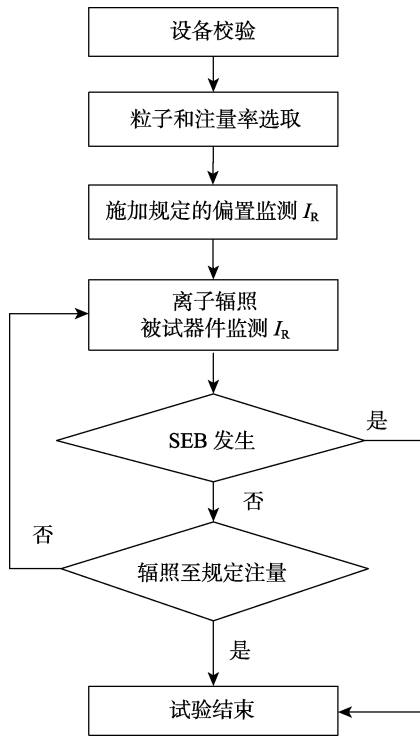


图 5 单粒子评估试验流程
Fig.5 Process of single event evaluation test

2 结果及分析

2.1 试验器件信息

选取三款典型高压快恢复整流二极管进行地面单粒子效应试验,分别对三家公司 1200 V 快恢复整流二极管进行了试验,试验器件信息见表 2。

表 2 试验器件信息
Tab.2 Information of test device

器件	额定值		封装形式	试验样品制备后封装
	V_R/V	$I_{F(AV)}/A$		
A 公司 1200 V 器件	1200	11($t_C=100\text{ }^\circ\text{C}$)	金属封装	金属封装
B 公司 1200 V 器件	1200	1($t_A=100\text{ }^\circ\text{C}$)	玻钝封装	金属封装
C 公司 1200 V 器件	1200	15($t_C=25\text{ }^\circ\text{C}$)	金属封装	金属封装

2.2 试验数据及结果

对 A 公司 1200 V 快恢复整流二极管按照前述试验流程进行单粒子效应试验,试验数据见表 3。

表 3 A 公司 1200 V 器件单粒子效应试验数据结果
Tab.3 Single event effect test data results of 1200 V device developed by Company A

样品编号	V_R/V	粒子	线性能量传输/ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{mg}^{-1}$)	粒子总数/ cm^2	SEB 数
#1	1200	Ta	81.35	150 742	1
#2	720	Ta	81.35	10 000 000	0
#2	1000	Ta	81.35	13 639	1
#3	720	Ta	81.35	10 000 000	0
#3	820	Ta	81.35	10 000 000	0
#3	920	Ta	81.35	534 424	1
#4	820	Ta	81.35	10 000 000	0
#4	720	Ta	81.35	10 000 000	0

采用 LET 为 $81.35\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的 Ta 离子辐照 A 公司 1200 V 硅快恢复整流二极管,施加反向偏置电压进行测试。在 $V_R=1200\text{ V}$ 条件下,1#发生单粒子烧毁;在 $V_R=720\text{ V}$ 条件下,辐照至 $1 \times 10^7/\text{cm}^2$,2#、3#、4#均未发生单粒子烧毁;在 $V_R=1000\text{ V}$ 条件下,2#发生单粒子烧毁;在 $V_R=820\text{ V}$ 条件下,辐照至 $1 \times 10^7/\text{cm}^2$,3#、4#均未发生单粒子烧毁;在 $V_R=920\text{ V}$ 条件下,3#发生单粒子烧毁。因此在 $V_R=820\text{ V}$ 偏置电压下,该器件抗单粒子烧毁的 LET 阈值大于 $81.35\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。

对 B 公司研制的 1200 V 快恢复整流二极管按照前述等效制样方法进行单粒子效应试验样品制备,并按前述试验流程进行单粒子效应试验,试验数据见表 4。

表 4 B 公司 1200 V 器件单粒子效应试验数据结果
Tab.4 Single event effect test data results of 1200 V device developed by Company B

样品编号	V_R/V	粒子	线性能量传输/ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{mg}^{-1}$)	粒子总数/ cm^2	SEB 数
#11、#12、#13	600	Ta	81.35	10 000 000	0
#11、#12、#13	720	Ta	81.35	10 000 000	0
#11、#12、#13	940	Ta	81.35	10 000 000	0

采用 LET 为 $81.35\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的 Ta 离子辐照 B 公司 1200 V 硅快恢复整流二极管,施加反向偏置电压进行测试。在 V_R 为 600、720、940 V 条件下,器件未发生单粒子烧毁。因此在 $V_R=940\text{ V}$ 偏置电压下,该器件抗单粒子烧毁的 LET 阈值大于 $81.35\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。

对 C 公司研制的 1200 V 快恢复整流二极管按照前述试验流程进行单粒子效应试验,试验数据见表 5。

采用 LET 为 $79.24\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的 Ta 离子辐照 C 公司 1200 V 器件硅快恢复整流二极管,施加反向偏置电压进行测试。在 $V_R=840\text{ V}$ 偏压条件下,辐照至

表 5 C 公司 1200 V 器件单粒子效应试验数据结果
Tab.5 Single event effect test data results of 1200 V device developed by Company C

样品 编号	V_R/V	粒子	线性能量传输/ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{mg}^{-1}$)	粒子总数/ cm^{-2}	SEB 数
#21	840	Ta	79.24	10 000 000	0
#22	840	Ta	79.24	10 000 000	0
#23	960	Ta	79.24	1 113 900	1

$1\times10^7/\text{cm}^2$ ，器件未发生单粒子烧毁；在 $V_R=960\text{ V}$ 偏压条件下，辐照至 $1.11\times10^6/\text{cm}^2$ 注量的过程中，检测到器件发生单粒子烧毁效应。因此在 $V_R=840\text{ V}$ 偏置电压下，该器件抗单粒子烧毁的 LET 阈值大于

$79.24\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ ；在 $79.24\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 下，抗单粒子烧毁的安全工作电压范围在 $840\sim960\text{ V}$ 之间。

2.3 烧毁失效机理

二极管发生单粒子烧毁的位置既可能位于器件的终端结构，也可能位于有源区结构。对于平面型高压二极管器件，终端主要采用如图 6 所示的场限环+场板结构^[5-6]。当高能粒子从终端区入射时，由于终端表面区域没有空穴载流子的抽取路径，入射产生的空穴不得不从终端等位环处流出。这易使该区域瞬态电流急剧增加，导致该区域的温度急剧增加，产生击穿点，从而引起器件产生 SEB 失效^[7]。

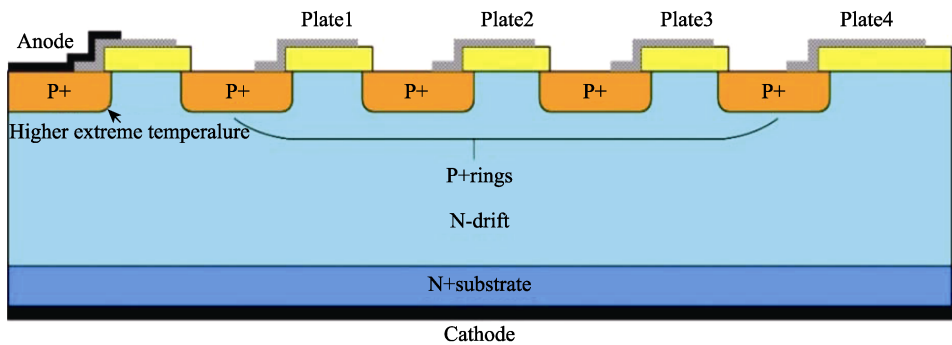


图 6 器件结构示意图
Fig.6 Device structure

在有源区结构中，高能重粒子入射后，在 高能粒子轨迹附近会产生大量的电子-空穴对，并在电场的作用下分别向阳极和阴极运动，形成电流。在该电流的作用下，耗尽层电场分布将发生改变。随着电流的增大，耗尽层电场分布如图 7 所示^[10]。局部电流会造成 N-、N+ 结附近的电子密度增加，雪崩倍增效应显著，发生雪崩击穿。在高的工作电压下，器件于单粒子的入射轨迹附近发生动态雪崩，在高压和局部大电流的同时作用下，导致器件的局部过热引起失效^[8]。

以上为根据试验结果对硅基二极管单粒子烧毁失效的初步分析，后续将开展更为深入的失效机理研究。

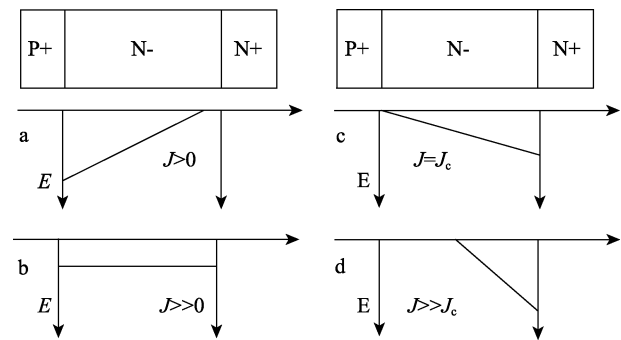


图 7 辐照后电场分布
Fig.7 Electric field distribution after irradiation

3 结语

文中针对宇航型号用的硅基高压快恢复整流二极管的单粒子效应展开了部分研究，形成了较为系统的高压二极管单粒子评估的试验方法，并可工程化应用。对典型高压快恢复二极管进行了单粒子效应试验评估，获得了试验数据，可以为宇航型号应用提供了数据支撑，同时也为国内外相关研究及研制单位加固设计提供了基本数据。

参考文献：

[1] MERCER C R, MCGUIRE M L, OLESON S R, et al. Solar Electric Propulsion Concepts for Human Space Exploration[R]. Cleveland, Ohio: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2015.

[2] ECOFFET R. On-orbit Anomalies: Investigations and Root Cause Determination[Z]. IEEE NSREC 2011 Short Course Notes, Section IV, 2011.

[3] XAPSOS M A, O'NEILL P M, O'BRIEN T P. Near-earth Space Radiation Models[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 1691-1705.

[4] BALIGA B J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[5] PUGH R D, JOHNSTON A H, GALLOWAY K F. Char-

- acteristics of the Breakdown Voltage of Power MOSFETs after Total Dose Irradiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1986, NS-33(6): 1460-1464.
- [6] 刘恩科, 朱秉升. 半导体物理学[M]. 第七版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- LIU En-ke, ZHU Bing-sheng. Semiconductor Physics[M]. The Seventh Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [7] THEISS J, MOISION R M, FORAN B, et al. Simulation for Risk Assessment of Diode Single Event Burn-out[C]// IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 2015.
- [8] WROBEL T F, COPPAGE F N, HASH G L. Current Induced Avalanche in Epitaxial Structures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, 32(6): 3991-3995.
- [9] 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- TAN Wei-zhi, HU Jin-gang. Spacecraft System Engineering[M]. Beijing: Science and technology of China press, 2009.
- [10] JAVANAINEN A, GALLOWAY K F, FERLET-CAVROIS V, et al. Charge Transport Mechanisms in Heavy-Ion Driven Leakage Current in Silicon Carbide Schottky Power Diodes[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2016, 16(2): 208-212.