

柔直换流阀用4.5 kV IGBT器件大气中子辐射失效率物理建模

杨 柳^{1,3}, 梁世维^{2*}, 周月宾³, 饶 宏³, 涂欣易¹, 姚茗瀚³, 徐启扬², 黄守道^{2,4}, 彭 超⁵

(1. 湖南大学国家卓越工程师学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 3. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东广州 510663; 4. 海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室, 湖南长沙 410082; 5. 工业和信息化部电子第五研究所电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东广州 511370)

摘 要: 高海拔地区柔性直流输电系统中的绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT)长期承受较高阻断电压, 易受到大气中子辐射诱发的单粒子烧毁(Single-event Burnout, SEB)威胁, 其失效率的准确评估直接关系到换流阀器件选型、运行降额和安全裕度设计。现有失效率模型多依赖经验拟合或单一修正因子, 难以同时描述海拔环境与偏置电压对器件辐射失效的耦合作用。本文依托中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)大气中子辐照谱仪(Atmospheric Neutron Irradiation Spectrometer, ANIS), 对两类4.5 kV IGBT在多组偏置电压和等效海拔条件下开展大气中子加速辐照试验, 以漏电流达到10 mA作为失效判据, 并依据JEDEC JESD89A和GB/T 4937.44-2025/IEC 60749-44.2016计算自然环境失效率及95%置信区间。在此基础上, 首先依据国际标准大气模型建立“海拔高度—大气密度—中子通量”关系; 随后结合高压阻断状态下中子诱发二次带电粒子的电荷沉积、载流子漂移、局部电场重构、碰撞电离、雪崩倍增及电热反馈过程, 采用局部电场失效概率描述高场敏感区的主导作用, 并以二次泰勒展开表征重构峰值电场随偏置电压的非线性增强, 最终构建海拔环境与电压器件响应项耦合的大气中子辐射失效率物理模型, 利用试验数据完成关键参数提取。试验结果表明, 两类IGBT的失效率均随海拔升高和偏置电压增加显著上升, 且不同器件表现出明显的结构敏感性。模型验证结果显示, IGBT-A预测绝对误差不超过0.01 FIT、相对误差不超过0.90%; IGBT-B预测绝对误差不超过0.01 FIT、相对误差不超过0.51%。进一步基于模型获得了不同海拔和偏置电压共同作用下的失效率分布及1 FIT安全工作边界, 可为高海拔柔直换流阀中IGBT的可靠性评估、电压降额和运行安全设计提供定量依据。

关键词: IGBT; 换流阀; 大气中子辐射; 失效率; 物理建模

基金项目: 国家自然科学基金(No.U25B6015)

中图分类号: TN302; TM46

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(XXXX)XX-0001-11

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20260930

Physical Modeling of Atmospheric Neutron Radiation-Induced Failure Rate in 4.5 kV-Rated IGBT for Converter Valves in VSC-HVDC System

YANG Liu^{1,3}, LIANG Shiwei^{2*}, ZHOU Yuebin³, RAO Hong³, TU Xinyi¹, YAO Minghan³, XU Qiyang²,
HUANG Shoudao^{2,4}, PENG Chao⁵

(1. National Graduate College for Elite Engineers, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

3. State Key Laboratory of HVDC Transmission Technology (Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd.),
Guangzhou, Guangdong 510663, China;

4. State Key Laboratory of Offshore Wind Power Equipment and Efficient Wind Energy Utilization, Changsha, Hunan 410082, China;

5. Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, China Electronic Product Reliability
and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou, Guangdong 511370, China)

Abstract: Insulated gate bipolar transistors (IGBTs) employed in high-altitude voltage-source-converter high-voltage direct-current (VSC-HVDC) transmission systems are continuously subjected to high blocking voltages and are therefore particularly vulnerable to atmospheric-neutron-induced single-event burnout (SEB). Accurate evaluation of the corresponding radiation-induced failure rate is essential for device selection, voltage derating, reliability assessment, and safety-margin design of converter valves. However, most existing failure-rate models are based on empirical fitting,

manufacturer-specific correction factors, or simplified single-variable scaling relations, and consequently have limited capability to simultaneously describe the coupled effects of altitude-dependent atmospheric neutron exposure and bias-voltage-dependent device response. To address this limitation, accelerated atmospheric-neutron irradiation experiments were carried out on two types of 4.5 kV IGBTs using the Atmospheric Neutron Irradiation Spectrometer (ANIS) at the China Spallation Neutron Source (CSNS). The devices were tested under multiple blocking-voltage and equivalent-altitude conditions, with a leakage current of 10 mA adopted as the failure criterion. According to JEDEC JESD89A and GB/T 4937.44-2025/IEC 60749-44:2016, the accumulated neutron fluence and number of failed samples were converted into failure rates under the natural atmospheric environment, and 95% confidence intervals were further calculated to quantify the statistical uncertainty of the experimental results. Based on the irradiation data and the underlying radiation-response physics, a physics-based atmospheric-neutron-induced failure-rate model was established. First, the relationship among altitude, atmospheric density, and neutron flux was derived from the International Standard Atmosphere, thereby representing the variation in the external neutron environment caused by the reduction in atmospheric shielding with increasing altitude. Second, the voltage-dependent device response was formulated by considering the physical sequence following the generation of neutron-induced secondary charged particles under high-voltage blocking conditions, including localized charge deposition, carrier drift, electric-field reconstruction, impact ionization, avalanche multiplication, and electrothermal feedback. Because the probability of SEB is predominantly governed by localized high-field regions rather than by the relatively weak field in the central region of the device, a local-electric-field-dependent failure probability was introduced to describe the contribution of the sensitive high-field region. In addition, the nonlinear enhancement of the reconstructed peak electric field with increasing bias voltage was represented using a second-order Taylor expansion, from which a voltage-dependent device failure cross section was derived. Finally, the altitude-dependent neutron-flux term was coupled with the voltage-dependent device-response term to construct a unified altitude-voltage-dependent failure-rate model, and the key model parameters were extracted from the experimental data. This formulation explicitly separates the external radiation exposure from the intrinsic susceptibility of the device while retaining their coupled contribution to the overall failure rate, thereby establishing a direct physical correspondence among altitude-induced neutron-flux enhancement, voltage-induced electric-field intensification, and the resulting increase in SEB probability. The experimental results show that the atmospheric-neutron-induced failure rates of both IGBT types increase markedly with increasing altitude and blocking voltage, while the two devices exhibit clear structure-dependent radiation sensitivities. Model validation shows excellent agreement between the predicted and measured failure rates over the investigated operating range. For IGBT-A, the absolute prediction error is below 0.01 FIT and the relative error does not exceed 0.90%; for IGBT-B, the absolute prediction error is also below 0.01 FIT and the relative error does not exceed 0.51%. On the basis of the validated model, failure-rate distributions under the combined effects of altitude and bias voltage were further obtained, and the corresponding 1-FIT safe-operating boundaries were determined. The proposed model provides a physically interpretable and quantitatively accurate framework for extrapolating accelerated irradiation results to practical high-altitude operating conditions and offers a theoretical basis for reliability assessment, voltage derating, and operational safety-margin design of 4.5 kV IGBTs in VSC-HVDC converter valves.

Keywords: insulated gate bipolar transistor; converter valve; atmospheric neutron irradiation; failure rate; physical modeling

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U25B6015)

0 引言

在能源互联网快速发展的背景下,柔性直流输电(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)技术凭借控制灵活、响应速度快、适应新能源并网和异步电网互联等优势,已成为高比例新能源电力系统中的重要输电方式^[1-2]。柔性直流换流阀是VSC-HVDC系统的核心装备,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为换流阀功率单元中的关键器件,其电压等级、通流能力和长期可靠性直接影响系

统安全运行^[3-4]。随着高海拔新能源基地和直流输电工程建设推进,柔性直流系统可靠性评估与标准化需求进一步提升^[5-6]。在高海拔地区,大气层屏蔽能力减弱,中高能大气中子通量显著增加,使处于高压阻断状态的IGBT面临更高的单粒子烧毁(SEB)风险^[7-11]。

地面大气中子主要来源于初级宇宙射线与大气原子核相互作用形成的级联反应^[12]。高能中子穿透器件封装并进入有源区后,可与硅原子核发生核反应,产生反冲核或二次带电粒子;这些粒子在器件内部沉积能量并形成高密度电子-空穴对。在高压阻断

条件下,瞬态载流子在强电场作用下发生漂移、碰撞电离和雪崩倍增,并可能进一步触发寄生晶体管或晶闸管结构,形成局部高电流丝和热失控,最终导致SEB失效^[13-16]。因此,面向高海拔柔直换流阀的IGBT大气中子辐射失效率预测,已经成为器件选型、运行降额和寿命评估中的关键问题。

围绕功率器件宇宙射线和大气中子诱发失效,国内外已从加速辐照试验、自然环境验证、工程换算方法和失效机理分析等方面开展了较多研究。在试验与标准方法方面,Shoji等采用白光中子束研究了IGBT中子诱发单粒子烧毁(SEB)特性,发现集电极偏置电压升高会显著提升器件失效率,并揭示了明显的电压门槛效应^[13]。JEDEC JESD89A对地面宇宙射线诱发软错误的测试、统计和报告方法进行了规范,为加速辐照试验结果向自然环境失效率换算提供了重要参考^[14]。Gollapudi和Omura进一步讨论了高功率半导体器件失效率的海拔依赖计算方法,指出海拔变化对宇宙射线失效率评估具有重要影响^[15]。Prado和Gajo对功率半导体器件宇宙射线失效问题进行了分析,指出高压功率器件在阻断状态下面临较高的宇宙射线失效风险^[16]。Findeisen等人较早通过散裂中子束加速辐照试验,并结合400 m和3 580 m海拔自然环境测试,对2.5 kV和3.3 kV IGBT芯片开展了失效率外推研究,验证了加速辐照试验用于IGBT自然环境失效率预测的可行性^[17]。Borovina等人针对3.3 kV IGBT模块开展了中子诱发失效试验,发现超过一定偏置电压后器件失效率迅速升高,进一步丰富了高电压等级IGBT的试验数据^[18]。Foro等人研究了栅极偏置对沟槽栅截止IGBT中子诱发SEB的影响,并结合TCAD仿真分析了失效机理^[19]。Oda等人则从电场分布角度研究了功率器件宇宙射线失效机理,指出耗尽区平均电场与器件失效密切相关,加深了对电场分布和SEB触发关系的认识^[20]。

近年来,国内学者也围绕柔性直流换流阀功率器件、高海拔宇宙射线环境和大气中子谱开展了相关研究。蔡希鹏等人针对柔性直流换流阀功率器件开展了大气中子辐照效应研究,为换流阀用功率半导体器件辐射可靠性评估提供了直接实验依据^[7]。Yang等人分析了高海拔环境下宇宙射线对柔性直流换流阀失效率的影响,说明高海拔工况会显著提高换流阀功率器件的可靠性风险^[8]。欧阳文敏等人针对柔性直流用4.5 kV IGBT开展高海拔宇宙射线失效影响规律研究,并结合试验和仿真分析了电压与中子辐照应力下的失效特性^[21]。此外,Yu等人对中国散裂中子源大气中子辐照谱仪(ANIS)的宽能谱特性进行了评价,为后续开展接近自然大气中子能谱条件下的加速

辐照试验奠定了平台基础^[22]。

在失效率建模方面,现有方法主要包括基于厂家经验参数的ABB/Kaminski模型和基于局部电场的Zeller模型以及仅考虑中子通量比例换算的简化模型。Kaminski模型是纯数学模型,以电压、温度和海拔作为修正因子,可将参考条件下的失效率换算到实际应用工况,但模型自身无明确的物理含义,不具备推广性^[23];Zeller模型则从局部电场出发,将宇宙射线诱发的局部失效概率表示为局部电场强度的函数,能够反映高场区对功率器件失效的主导作用,但该模型存在理想化的电场假设,且只能用于不同电压下的失效率预测^[24]。上述模型为功率器件宇宙射线失效率预测提供了重要基础,但仍无法满足高海拔地区IGBT器件大气中子辐射失效率精准预测的需求。例如,本文采用Kaminski模型分析高海拔地区柔直换流阀中常用的两种4.5 kV IGBT器件大气中子加速辐照失效率时发现,现有模型虽然能够反映失效率随海拔和偏置电压升高而增加的基本趋势,但模型预测结果和实测数据最大相对误差达到17.37%。这表明,仅依赖通用经验修正因子或单一电场/通量修正关系,难以准确描述不同IGBT器件在高海拔和高偏置电压共同作用下的辐照失效规律。

综上,现有研究虽然已从试验测试、工程换算和机理分析等方面揭示了IGBT大气中子辐射失效的基本规律,但在高海拔柔性直流换流阀应用场景下,仍需要进一步建立能够同时考虑外部自然中子通量变化和器件偏置电压的精准失效率模型。基于此,本文依托中国散裂中子源(CSNS)大气中子辐照谱仪(ANIS)开展的两类4.5 kV IGBT器件大气中子加速辐照数据,基于国际大气标准模型和辐射失效机理,构建海拔—电压耦合的IGBT器件大气中子辐射失效率物理模型,模型中将海拔升高导致的大气屏蔽减弱和中子通量增强作为前级环境因素,将偏置电压升高引起的电场增强、雪崩倍增和电热反馈作为后级器件响应项,并通过试验数据提取关键模型参数,实现了对不同海拔和不同偏置电压下IGBT辐照失效率的准确预测。

1 高压IGBT器件大气中子加速辐照试验与结果分析

1.1 IGBT大气中子加速辐照试验设置

本文利用大气中子辐照谱仪(ANIS)开展了中子辐照试验,ANIS中子能谱形状与大气中子能谱高度相似,能谱对比如图1左图所示,但ANIS中子通量较地面天然环境增加了约 1.65×10^8 倍,中子能量最高可达1.6 GeV左右,可有效加速等效模拟自然大气中子对功率器件的影响^[22,25]。大气中子加速辐照试验过

程中,IGBT处于正向阻断状态,同时通过传感器对其漏电流进行实时监测,当漏电流达到10 mA时则判定该器件发生辐射失效。测试装置及其原理如图1右图所示。试验在室温下针对不同工作电压和等效海拔条件进行,每种电压-海拔组合下同时测试多个器

件。由于中子穿透能力强,所有样品可置于同一束斑内同时辐照。中子束面积为10 cm×6 cm,可完全覆盖器件有源区域。若试验过程中累积中子注量达到 $3.87 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ 仍未发生失效,则停止辐照;若中子注量未达设定目标但器件损坏数量达30只,则停止试验。

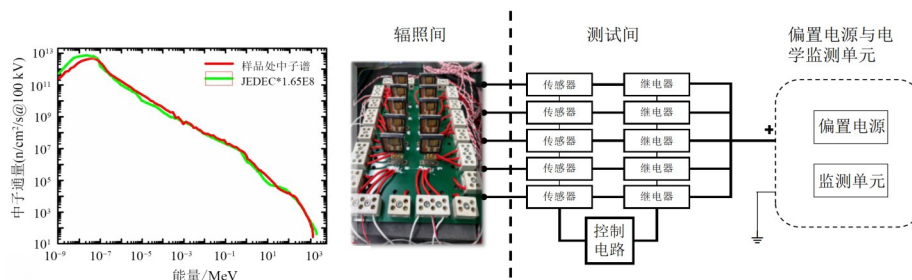


图1 辐射源能谱图(数据来源于文献[22,25])及大气中子辐照试验的实验装置示意图

Figure 1 Energy spectrum of the irradiation source (data from Refs. [22, 25]) and schematic diagram of the experimental setup for the atmospheric neutron irradiation test

1.2 IGBT大气中子加速辐射实验结果及其分析

本文利用大气中子加速辐射试验完成了两种IGBT器件的大气中子辐射失效率评估。试验结果整

理如表1所示,可以发现随着偏置电压增加,即使大气中子累积有效注量未达到预定值,两种IGBT器件的失效数量已经呈现出成倍增加的趋势。

表1 2种高压IGBT的大气中子辐射失效率

Table 1 Atmospheric neutron irradiation-induced failure rates of two types of IGBTs

IGBT 器件	偏置电压/V	样品数	有效中子注量 ($\times 10^{11} \text{ n/cm}^2$)	失效 数量	失效率及其置信度为95%的置信区间/FIT		
					@4 000 m	@2 000 m	@海平面
IGBT-A	2 500	30	1.170	0	<0.99 [0.000, 3.650]	<0.273 [0.000, 1.010]	<0.053 8 [0.000, 0.198]
	2 650		1.160	2	2.00 [0.242, 7.220]	0.551 [0.067, 1.990]	0.109 [0.013, 0.394]
	2 700		1.060	4	4.39 [1.200, 11.200]	1.21 [0.330, 3.100]	0.238 [0.065, 0.609]
	2 800		0.511	9	20.40 [9.330, 38.700]	5.64 [2.580, 10.700]	1.11 [0.508, 2.110]
	2 900		0.415	17	47.60 [27.700, 76.200]	13.1 [7.630, 21.000]	2.58 [1.500, 4.130]
IGBT-B	2 000	30	1.210	0	<0.96 [0.000, 3.540]	<0.265 [0.000, 0.978]	<0.051 3 [0.000, 0.189]
	2 050		1.180	2	1.96 [0.237, 7.080]	0.541 [0.066, 1.950]	0.105 [0.013, 0.379]
	2 100		1.130	3	3.08 [0.635, 9.00]	0.849 [0.175, 2.480]	0.164 [0.034, 0.479]
	2 200		0.783	11	16.3 [8.140, 29.200]	4.49 [2.240, 8.030]	0.871 [0.435, 1.560]
	2 300		0.354	23	75.40 [47.800, 113.000]	20.8 [13.200, 31.200]	4.03 [2.550, 6.050]

为了更加准确地描述高压IGBT器件在大气中子辐射下的失效趋势,本文依据JEDEC JESD89A和GB/T 4937.44-2025/IEC 60749-44.2016等标准计算大气中子辐射导致的IGBT失效率。在大气中子加速辐射过程中,所有试验器件累积的有效中子总注量可通过式(1)计算得到:

$$T_{\text{sum}} = \sum n_i \quad (1)$$

其中, T_{sum} 为所有试验器件的有效中子总注量; i 为第 i 只试验样品; n_i 为第 i 只样品失效时的中子注量,若该样品未发生失效,则 n_i 为结束时累计的中子注量。根据大气中子加速试验结果,可计算出实际自然环境中大气中子辐射IGBT失效率 λ_{CR} :

$$\lambda_{\text{CR}} = \frac{r}{T_{\text{sum}}} \times \Phi_n \times 10^9 \quad (2)$$

其中, r 为大气中子加速辐射试验中观察到的失效器件数量, Φ_n 为实际自然环境中的大气中子通量,已有测量发现海拔4 000 m处10 MeV以上中子通量约为 $116 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,海拔2 000 m处约为 $32 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,海平面处约为 $6 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [15,26]。

因此,可以计算得到高压IGBT器件在不同偏置电压和不同海拔高度下的大气中子辐射失效率。考虑到在大气中子加速辐射试验中,总样本量相对于实际工程应用仍然偏小,因此仅给出失效率的点估计值难以反映估计结果的不确定性。计算置信区间能够

在给定置信水平下量化真实失效率的可能范围,从而评估估计精度与结果可靠性,为器件可靠性评估和工程决策提供更严谨、科学的统计依据。因此,本文引入卡方检验增加大气中子辐射IGBT失效率估计的可靠性,失效率置信区间采用式(3)计算:

$$(2T_{\text{sum}})^{-1} X_{\alpha/2}^2(2r) < \lambda_{\text{ACC}} < (2T_{\text{sum}})^{-1} X_{1-\alpha/2}^2(2r) \quad (3)$$

其中, X^2 为自由度为 $2r$ 的卡方函数, α 为显著性水平, λ_{ACC} 为 IGBT 大气中子加速辐射失效率。根据大气中子加速辐照试验结果,按照 95% 的置信度计算置信区间,可以分别得到对应海拔 4 000 m、2 000 m 和海平面处的器件失效率置信区间,如表 1 所示。

2 高压 IGBT 器件大气中子辐射失效率建模

2.1 IGBT 辐照失效率物理建模

大气中子诱发的 IGBT 失效具有典型的多因素耦合特征。一方面,海拔升高会削弱大气层对宇宙射线级联粒子的屏蔽作用,使到达器件表面的高能中子通量增加;另一方面,IGBT 在正向阻断状态下承受较高的集电极-发射极电压,器件漂移区和结区电场增强,中子入射后产生的二次带电粒子更容易触发电荷输运、碰撞电离和局部电热反馈。因此,失效率模型需要同时描述外部辐射环境项和器件内部电场响应项。本文将 IGBT 大气中子辐射失效率分解为海拔依赖的大气中子通量变化关系、偏置电压依赖的 IGBT 器件大气中子辐射失效率截面,并在此基础上建立统一的海拔-电压耦合模型。

2.1.1 不同海拔高度下 IGBT 辐射失效率建模

在对流层范围内,大气密度随海拔升高而降低。根据国际标准大气模型^[27],海拔 h 处的大气密度可表示为

$$\rho(h) = \rho(0) \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{4.255} \quad (4)$$

其中, $\rho(0)$ 为海平面标准大气密度, H 为对流层密度标高, h 为海拔高度。随着海拔升高,由于大气密度降低和大气层对中子的阻碍距离缩短,大气中子通量会快速增加。基于朗伯-比尔型衰减关系,可用式(5)描述自然大气中子通量随大气屏蔽能力减弱而升高的过程:

$$\Phi(h) = \Phi(0) \exp \left[\frac{\rho(0) - \rho(h)}{\rho_{\text{scale}}} \right] \quad (5)$$

其中, $\Phi(h)$ 为海拔 h 处 10 MeV 以上自然大气中子通量, $\Phi(0)$ 为海平面处对应中子通量, ρ_{scale} 为大气密度标度参数,是由自然大气中子通量与大气密度降低量之间的关系标定得到的半经验参数,其数值越小说明中子通量对大气密度变化越敏感,即海拔升高引起的通量增强越显著。

将式(4)代入式(5),得到大气中子通量与海拔高度之间的关系:

$$\Phi(h) = \Phi(0) \exp \left\{ \frac{\rho(0) \left[1 - \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{4.255} \right]}{\rho_{\text{scale}}} \right\} \quad (6)$$

随着大气中子通量的增加,单位时间内辐射到器件单位面积的大气中子数量成比例增加,进而会导致器件的大气中子辐射失效率增加。根据大气中子加速辐射等效原理,器件自身的辐射敏感程度与自然环境因素不相关,也即器件的大气中子辐射失效率和大气中子通量呈线性变化。因此,本文采用式(7)描述 IGBT 大气中子辐射失效率与大气中子通量的直接关系:

$$\lambda(h) = \sigma \times \Phi(h) \quad (7)$$

其中, $\lambda(h)$ 为海拔 h 下的 IGBT 大气中子辐射失效率, σ 为 IGBT 器件的大气中子辐射失效率截面。

2.1.2 不同偏置电压下 IGBT 辐射失效率建模

偏置电压作为 IGBT 工作过程中的关键参数,通过改变器件内部电场强度和载流子的输运行为, Kaindl 等研究表明,高压 IGBT 内部固有的寄生双极晶体管结构能够显著放大粒子诱导瞬态电流,该电流放大机制是影响器件宇宙射线耐受能力的重要因素^[28]。在高压阻断状态下,IGBT 的集电极-发射极之间施加的偏置电压会在芯片内部形成强电场,当大气中子入射产生带电二次粒子后,这些粒子在强电场作用下会被加速,获得足够高的动能:一方面,高速运动的带电粒子会形成瞬时大电流,该电流在器件内阻上产生的焦耳热会导致局部温度急剧升高;另一方面,高能粒子与晶格原子发生碰撞时,会引发强烈的碰撞电离效应,产生更多的电子-空穴对,进一步增强瞬态电流和电热耦合效应^[29]。当这种电热应力超过器件的承受极限时,就会导致器件发生大气中子辐射失效,因此偏置电压越高,电场强度越大,失效风险越高^[30]。图 2 展示了 IGBT 遭受大气中子辐射后,器件内部电场强度随时间的演化规律。在大气中子入射前,IGBT 内电场呈经典的梯形分布;当大气中子入射进器件后,在器件内产生大量的电子-空穴对,这些电子和空穴在偏置电压形成的电场作用下,电子向器件背面漂移,空穴向器件表面漂移,由于势垒的阻挡作用,电子和空穴先分别在背面和正面聚集,并导致电场分布重构,在器件两侧形成极大的电场尖峰,当峰值电场达到临界击穿电场强度,IGBT 内部出现雪崩击穿,进而可能诱发单粒子栅穿或触发门锁和单粒子烧毁。

图 2 表明,大气中子入射后 IGBT 内部电场重构主要表现为局部高场尖峰的形成,而器件中部区域电

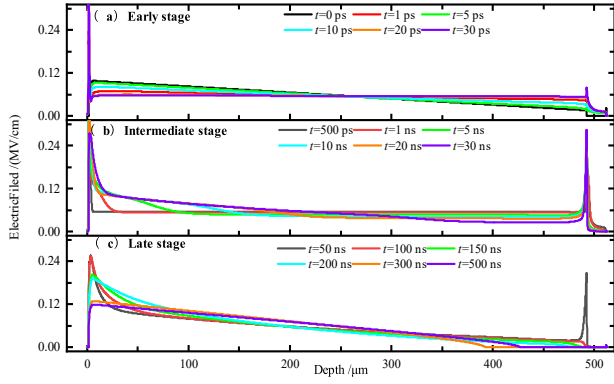


图2 辐射瞬间IGBT内电场演变过程

Figure 2 Evolution of electric field in IGBT after irradiation

场分布相对平缓。由于局部失效概率随电场强度呈指数变化,SEB的触发主要由电场尖峰区域主导;中间平缓电场区因电场强度较低,对总失效率的贡献受到明显抑制。因此,本文在建立电压依赖模型时采用等效电场响应描述高场敏感区域对失效率的主导作用,忽略中间电场较低区域的影响。Zeller对功率器件的宇宙射线失效数据进行了归一化分析,提出局部失效率可用局部电场函数表示为^[24]

$$P(E(x)) = P_0 \exp\left[-\frac{E_b}{E(x)}\right] \quad (8)$$

其中, P_0 为在参考宇宙射线通量条件下单位敏感体积内的局部失效率密度,该参数与电场强度无关,代表中子与硅原子核发生核反应产生高能反冲核或二次粒子后,在无电场增强情况下能够引发后续雪崩或热失控的基础概率; E_b 为特征电场强度,反映了硅材料中碰撞电离系数或雪崩倍增过程的特征尺度。式(8)表明,局部电场越强,中子诱发的瞬态载流子越容易触发碰撞电离和电热正反馈,器件发生SEB的概率越高。对于硅基功率器件,根据大量高压功率器件(GTO、晶闸管、二极管及IGBT)宇宙射线失效试验数据分析, P_0 的典型值为 $680 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, E_b 的典型值为 3 MV/cm ^[23]。

考虑到大气中子辐射响应过程中,入射中子与硅原子核发生核反应产生的二次带电粒子会在器件局部区域沉积大量电荷,引起显著的空间电荷效应并导致局部电场发生明显重构。这种重构后的局部电场不再保持均匀分布,而是呈现出明显的非线性特征,如图2所示。这种非线性电场分布会进一步放大大局局部电离和碰撞电离效应,使器件内部的电热耦合过程更加剧烈,从而显著影响最终的大气中子辐射失效率。

图2清晰展示了在大气中子辐射响应过程中,IGBT内部局部电场强度随偏置电压增加的演变规

律,表明重构后的电场呈现明显的非线性增长。为获得工程上实用的解析表达式,本文采用二次泰勒展开的方法对重构电场峰值进行近似描述:

$$E(V) = E_0 + k_1 V + k_2 V^2 \quad (9)$$

其中, E_0 为无外加电压时的内建电场, k_1 表征偏置电压升高后电场近似线性增强的贡献, k_2 表征偏置电压作用下瞬态电荷积累和电场重构引起的峰值电场非线性增强。

将式(9)代入式(8),并将局部失效率在器件敏感体积内积分,可得到宏观不同偏置电压下IGBT器件大气中子辐射失效截面 $\sigma(V)$ 的表达式:

$$\sigma(V) = \int P_0 \exp\left[-\frac{E_b}{E_0 + k_1 V + k_2 V^2}\right] d\Omega \quad (10)$$

$$\text{令 } A = \ln(P_0 \Omega) - \frac{E_b}{E_0}, B = \frac{E_b k_1}{E_0^2}, C = \frac{E_b k_2}{E_0^2} - \frac{E_b k_1^2}{E_0^3},$$

其中 Ω 为IGBT器件中对大气中子诱发失效敏感的等效敏感体积。考虑大气中子通量,则不同偏置电压下IGBT器件的大气中子辐射失效率可写为

$$\lambda(V) = \exp(A + BV + CV^2) \times \Phi \quad (11)$$

其中, A 、 B 和 C 分别为电压模型的结构基准项、平均电场增强项和非线性高场重构项。 A 表征器件敏感区域大小和内建电场等器件参数; B 反映偏置电压升高后漂移区平均电场增强所带来的载流子加速输运、碰撞电离和雪崩倍增起始概率提高; C 描述偏置电压导致的瞬态电荷积累和电场重构诱导的局部电场峰值骤增,进而加速器件雪崩倍增和触发寄生门锁等失效增强过程。

2.1.3 大气中子辐射失效率海拔-电压依赖性模型

从加速辐照试验的失效率换算角度看,器件级失效率本质上由外部中子入射率和器件对入射中子的失效响应共同决定。海拔升高主要改变自然大气中子通量,即单位时间内到达器件有源区的高能中子数量;偏置电压则通过改变漂移区和结区的电场分布,影响中子诱发二次带电粒子能否进一步触发碰撞电离、电场重构、寄生门锁和电热失控。从完整的大气中子辐射过程来看,海拔高度引起的大气中子通量变化属于前级的环境影响因素,而偏置电压引起的器件体内电场分布和强度及其诱导的辐射响应强度改变属于后级的器件响应项。因此,IGBT器件在海拔和偏置电压综合作用下的大气中子辐射失效率可表示为

$$\lambda(h, V) = \Phi(h) \times \sigma(V) \quad (12)$$

其中, $\Phi(h)$ 表示不同海拔高度下IGBT器件遭受大气辐照的中子通量, $\sigma(V)$ 表示不同偏置电压下IGBT器件大气中子辐射失效截面。代入式(6)和式(10),最

终得到大气中子辐射 IGBT 器件失效率的海拔-电压依赖性模型:

$$\lambda(h, V) = \Phi(0) \exp \left(\frac{\rho(0) \left[1 - \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{4.255} \right]}{\rho_{\text{scale}}} \right) \times \exp(A + BV + CV^2) \quad (13)$$

2.2 模型参数提取

表2中汇总了海平面、海拔高度为2 000 m和4 000 m处的大气密度和大气中子通量。根据公式(5),可以发现, $\ln(\Phi(h)/\Phi(0)) = \Delta\rho(h)/\rho_{\text{scale}}$ 。因此, $1/\rho_{\text{scale}}$ 是 $\Delta\rho(h) \sim \ln(\Phi(h)/\Phi(0))$ 关系的斜率。

表2 不同海拔下大气密度和大气中子通量

Table 2 Air density, and natural neutron flux at different altitudes

海拔 h/m	$\rho(h)/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\Delta\rho(h)/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\Phi(h)/(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$\ln(\Phi(h)/\Phi(0))$
0	1.225 0	0	6.2	0
2 000	1.006 5	0.218 5	32	1.641
4 000	0.819 2	0.405 8	116	2.929

令 $x_j = \Delta\rho(h_j)$, $y_j = \ln[\Phi(h_j)/\Phi(0)]$, 采用最小二乘法, 可以得到

$$\rho_{\text{scale}} = \frac{\sum_j x_j^2}{\sum_j x_j y_j} \quad (14)$$

结合表2中不同海拔高度处的大气密度和大气中子通量数据, 可计算得到 $\rho_{\text{scale}} = 0.137 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

根据大气中子加速辐射等效原理, 认为在器件结构和偏置电压保持不变时, 器件等效失效率近似不变, 器件失效率主要随单位时间内入射中子数量呈线性变化。因此, 海拔高度对失效率的影响不再通过额外的非线性指数表征, 而是直接由中子通量修正因子 $\Phi(h)/\Phi(0)$ 描述。这一处理与加速辐射实验中 $\lambda(h) \propto \Phi(h)$ 的失效率换算关系一致。

为了提取电压模型 $\lambda(V)$ 的参数, 可采用海平面的大气中子辐射失效率数据以简化提取过程。对式(11)取对数处理, 并令 $z_i = \ln\lambda(V_i)$, 则式(11)可写为矩阵形式:

$$\mathbf{z} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (15)$$

其中

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & v_1 & v_1^2 \\ 1 & v_2 & v_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & v_m & v_m^2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (16)$$

因此, 可以计算得到 $\boldsymbol{\beta}$ 为

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{z} \quad (17)$$

根据表1中测试的 IGBT 器件大气中子辐射失效率数据, 计算得到电压模型参数如表3所示。

表3 不同偏置电压下 IGBT 辐射失效率模型参数提取结果

Table 3 Extracted parameters of the IGBT radiation failure rate model under different bias voltages

模型参数	IGBT-A	IGBT-B
A	-230.56	13.81
B	0.15	-0.03
C	-2.53×10^{-5}	9.94×10^{-6}
R^2	0.998 4	0.996 3

由此, 结合以上模型参数提取结果, 可以得到 IGBT-A 和 IGBT-B 器件大气中子辐射失效率海拔-电压依赖性模型分别为

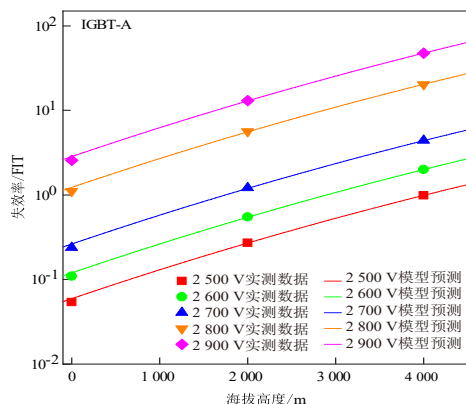
$$\lambda_A(h, V) = e^{\frac{7.60 \times \left[1 - \left(1 - \frac{h}{44\,330} \right)^{4.255} \right]}{0.137}} \times e^{-230.56 + 0.15V - 2.53 \times 10^{-5} V^2} \quad (18)$$

$$\lambda_B(h, V) = e^{\frac{7.60 \times \left[1 - \left(1 - \frac{h}{44\,330} \right)^{4.255} \right]}{0.137}} \times e^{13.81 - 0.03V + 9.94 \times 10^{-6} V^2} \quad (19)$$

3 高压 IGBT 器件大气中子辐射失效率物理模型验证

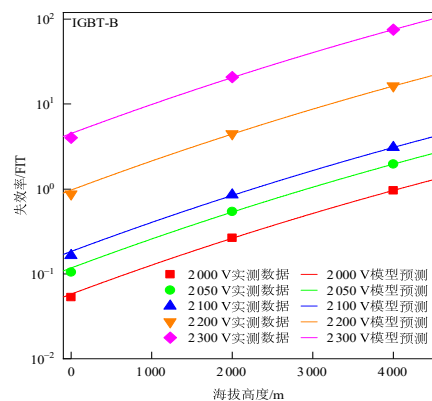
为验证所建立物理模型的准确性, 本文基于在中国散裂中子源(CSNS)实验平台开展的大气中子加速辐射试验数据, 对两种4.5 kV IGBT 器件在不同海拔和偏置电压下的辐照失效率模型进行验证。图3(a)和图3(b)分别对比了 IGBT-A 器件和 IGBT-B 器件在不同海拔高度下的实测数据和模型预测的辐照失效率, 其中各散点为大气中子加速辐照试验数据, 曲线为基于式(18)和式(19)的物理模型预测结果。从图中可以清晰看出, 两种 IGBT 的失效率均随海拔升高呈显著的指数增长趋势。这一变化趋势与理论分析完全一致, 即海拔升高导致大气密度降低, 大气中子通量增加, 器件受到的辐射损伤加剧, 失效率随之升高。

图4(a)和图4(b)分别对比了 IGBT-A 和 IGBT-B 在不同偏置电压下实测数据和模型预测的辐照失效率, 其中散点为 CSNS 大气中子加速辐射实验测得的失效率数据, 曲线为基于式(18)和式(19)的物理模型预测结果。从图4中可以看到, IGBT 大气中子辐射失效率模型可以非常精准地预测器件的失效率, 这一趋势与模型描述的物理机制完全一致, 即偏置电压升高增强了 IGBT 内部的电场强度, 使得中子诱发的电荷沉积、电场重构和电热耦合效应骤增, 器件失效率呈现明显的非线性增长。



(a) 不同电压下 IGBT-A 的失效率与海拔高度关系

(a) The relationship between the failure rate of IGBT-A under different voltages and altitude

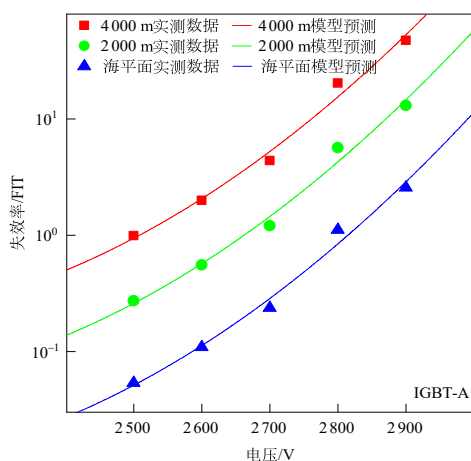


(b) 不同电压下 IGBT-B 的失效率与海拔高度关系

(b) The relationship between the failure rate of IGBT-B under different voltages and altitude

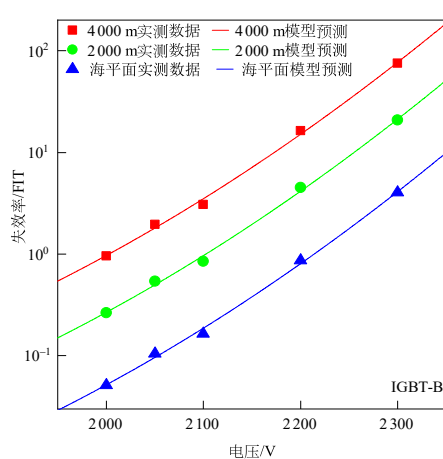
图3 实测数据和模型预测不同海拔高度下两款IGBT的大气中子辐射失效率对比

Figure 3 Comparison of tested and model-predicted atmospheric neutron irradiation-induced failure rates for two IGBTs at different altitudes



(a) 不同海拔下 IGBT-A 的失效率与偏置电压关系

(a) The relationship between the failure rate of IGBT-A and the bias voltage at different altitudes



(b) 不同海拔下 IGBT-B 的失效率与偏置电压关系

(b) The relationship between the failure rate of IGBT-B and the bias voltage at different altitudes

图4 实测数据和模型预测不同偏置电压下两款IGBT的大气中子辐射失效率对比

Figure 4 Comparison of tested and model-predicted atmospheric neutron irradiation-induced failure rates for two IGBTs at different bias voltages

图3和图4展示了IGBT大气中子辐射失效率模型可以非常准确地预测器件在不同海拔高度和不同偏置电压下的失效率。通过对比大气中子加速辐射试验实测失效率和模型预测数据,发现IGBT-A的模型预测绝对误差不超过0.01 FIT,相对误差 $\leq 0.90\%$; IGBT-B的模型预测绝对误差不超过0.01 FIT,相对误差 $\leq 0.51\%$ 。这充分证明了IGBT大气中子辐射失效率物理模型具有极高的预测精度和可靠性,能够为高海拔高压工况下IGBT的可靠性评估提供准确、可靠的理论支撑。

为了保障柔性直流输电系统的安全稳定可靠运行,实际工程应用要求IGBT器件的大气中子辐射失效率低于1 FIT。因此,从保障高海拔地区柔直换流阀中IGBT安全可靠运行考虑,基于IGBT大气中子辐射失效率物理模型预测,图5(a)和(b)分别绘出了IGBT-A和IGBT-B在不同海拔高度和偏置电压共同作用下大气中子辐射失效率分布曲面,并标定了两款IGBT器件在失效率为1 FIT的安全工作区边界,如图中红色曲线所示,为高海拔地区柔直换流阀中IGBT器件的降额运行和安全裕度设计提供了重要的参考依据。

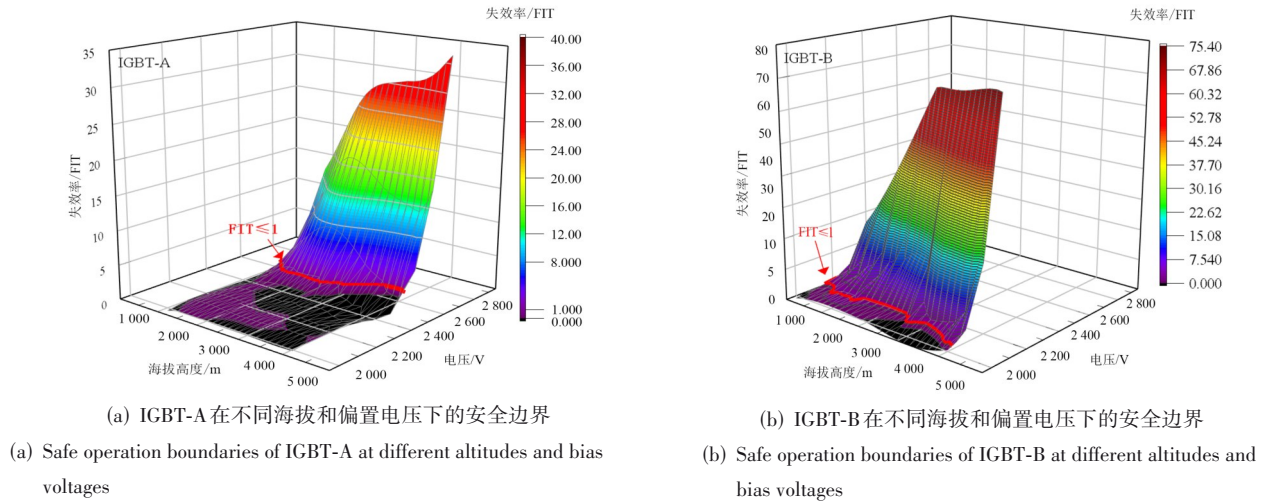


图5 两款IGBT在不同海拔高度和偏置电压下的安全边界
Figure 5 Safe operation boundaries for two IGBTs at different altitudes and bias voltages

4 结论

本文依托中国散裂中子源(CSNS)大气中子辐照谱仪(ANIS),针对柔直换流阀中两款常用的4.5 kV IGBT开展了大气中子加速辐照试验和失效率建模研究,掌握了高海拔环境下IGBT在不同海拔高度和偏置电压下的失效规律,建立了IGBT大气中子辐射失效率的海拔-电压依赖性物理模型,主要结论如下:

(1)开展了IGBT大气中子加速辐照试验,发现IGBT大气中子辐射失效率随海拔升高和偏置电压增加均呈显著指数型上升趋势。海拔高度由海平面升至4 000 m时,由于大气中子通量骤增,IGBT-A在2 500 V偏置电压下的辐射失效率0.05 FIT上升至0.99 FIT,IGBT-B在2 300 V偏置电压下的辐射失效率从4.03 FIT上升至75.40 FIT;在4 000 m高海拔处,当IGBT-A的偏置电压从2 500 V提高至2 900 V时,其辐射失效率从0.99 FIT上升至47.90 FIT,当IGBT-B的偏置电压从2 000 V提高至2 300 V时,其辐射失效率从0.96 FIT上升至75.40 FIT。

(2)基于国际大气标准模型,构建了海拔高度-大气密度-大气中子通量-辐射失效率的IGBT大气中子辐射失效率海拔高度依赖性模型;基于辐射响应物理过程和失效分析,构建了偏置电压-重构电场分布及电场峰值强度-辐射失效率的IGBT大气中子辐射失效率偏置电压依赖性模型;进而从大气中子辐射物理过程出发,将海拔引起的大气屏蔽减弱和自然中子通量增强作为前级环境因素,将偏置电压引起的电场增强、电场重构和雪崩倍增作为后级器件响应强度影响因素,搭建IGBT大气中子辐射失效率海拔-电压依赖性模型框架,并通过实验数据提取模型参数,建立了柔直换流阀常用的两种IGBT器件大气中子辐射失效率物理模型。

率物理模型。

(3)完成了两种IGBT器件大气中子辐射失效率物理模型的验证,IGBT-A的模型预测绝对误差不超过0.01 FIT,相对误差不超过0.90%;IGBT-B的模型预测绝对误差不超过0.01 FIT,相对误差不超过0.51%。结果表明,本文建立的IGBT大气中子辐射失效率物理模型实现了对高海拔、高偏置条件下IGBT辐射失效风险的精准定量预测,能够为高海拔环境下IGBT的可靠性评估提供有力的模型支撑。同时,基于所建立的失效率物理模型,预测了两种IGBT器件在不同海拔和偏置电压下的安全工作区边界,为高海拔柔性直流换流阀中IGBT器件安全运行提供指导。

致谢 本文中大气中子加速辐照试验得到了中国散裂中子源科学中心等工作人员的大力支持,在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Alassi A, Bañales S, Ellabban O, et al. HVDC transmission: Technology review, market trends and future outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 530-554. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.062.
- [2] 李峰, 刘浪, 陈丹青, 等. 大规模海上风电直流直送负荷中心拓扑选取影响因素分析与构建原则[J]. 南方电网技术, 2026, 20(1): 143-152.
Li Feng, Liu Lang, Chen Danqing, et al. Influencing factors and construction principles of topology selection for large-scale offshore wind power HVDC direct transmission to load centers[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(1): 143-152. (in Chinese)
- [3] 王彦峰, 李峰, 余梦泽, 等. 基于6.5 kV压接式功率器件

- 的MMC柔性直流功率模块设计和验证[J]. 南方电网技术, 2025, 19(12): 63-74.
- Wang Yanfeng, Li Feng, Yu Mengze, et al. Design and validation of MMC VSC-HVDC power modules based on 6.5 kV press-pack power devices[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(12): 63-74. (in Chinese)
- [4] 杨柳, 饶宏, 袁智勇, 等. 电力电子器件在柔性直流输电中的应用与发展[J]. 机车电传动, 2023(5): 184-190.
- Yang Liu, Rao Hong, Yuan Zhiyong, et al. Application and development of power electronic devices in VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(5): 184-190. (in Chinese)
- [5] 罗琴, 李丹, 潘广泽, 等. 中国柔性直流输电系统可靠性标准需求研究[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 121-129.
- Luo Qin, Li Dan, Pan Guangze, et al. Requirements analysis on reliability standards for flexible DC transmission system in China[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 121-129. (in Chinese)
- [6] Kim C, Lee S. Redundancy determination of HVDC MMC modules[J]. Electronics, 2015, 4(3): 526-537.
- [7] 蔡希鹏, 杨柳, 周月宾, 等. 柔性直流换流阀功率器件大气中子辐照效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(9): 3589-3597.
- Cai Xipeng, Yang Liu, Zhou Yuebin, et al. Research on atmospheric neutron irradiation effect of power semiconductor devices for VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3589-3597. (in Chinese)
- [8] Yang Liu, Zhang Zezhao, Zhou Yuebin, et al. Effect of cosmic rays on the failure rate of flexible direct current converter valves in high-altitude environment[J]. Electronics, 2024, 13(23): 4790.
- [9] Technologies Infineon. Impact of cosmic radiation on power semiconductor devices[EB/OL]. (2024-02-11)[2025-04-13]. <https://community.infineon.com/t5/Knowledge-Base-Articles/Impact-of-Cosmic-Radiation-on-Power-Semiconductor-Devices/ta-p/692794>.
- [10] Li Qiang, Wang Yongsheng, Su Chunqiang, et al. Study on the failure rate of high-power thyristors irradiated by artificial neutron irradiation under different DC bias voltages[J]. Energy Reports, 2023, 9(S7): 1826-1835.
- [11] 姜彦涛, 马元社, 李强, 等. 高海拔环境下高压直流输电换流阀系统中晶闸管的可靠性寿命模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 33-39.
- Lou Yantao, Ma Yuanshe, Li Qiang, et al. Research on reliability life model of thyristor in HVDC converter valve system at high altitude environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 33-39. (in Chinese)
- [12] Ziegler J F. Terrestrial cosmic rays[J]. IBM Journal of Research and Development, 1996, 40(1): 19-39.
- [13] Shoji T, Nishida S, Ohnishi T, et al. Neutron induced single-event burnout of IGBT[C]//Proceedings of 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA. Piscataway: IEEE, 2010: 142-148.
- [14] JEDEC JESD89A Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray induced soft errors in semiconductor devices[S].
- [15] Gollapudi S, Omura I. Altitude dependent failure rate calculation for high power semiconductor devices in aviation electronics[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60(SB): SBBD19.
- [16] Prado R A, Gajo C N L. Power semiconductor failures due to cosmic rays[C]//Proceedings of 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). Piscataway: IEEE, 2017: 1-6.
- [17] Findeisen C, Herr E, Schenkel M, et al. Extrapolation of cosmic ray induced failures from test to field conditions for IGBT modules[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6/7/8): 1335-1339.
- [18] Borovina D L, Bradley J T, Pieck M, et al. Neutron-induced failure tests of 3300-V IGBTs for the Spallation Neutron Source accelerator[C]//Proceedings of 2003 Particle Accelerator Conference. Piscataway: IEEE, 2003: 1168-1170.
- [19] Foro L L, Touboul A D, Wrobel F, et al. Gate voltage contribution to neutron-induced SEB of trench gate fieldstop IGBT[C]//Proceedings of the 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. Piscataway: IEEE, 2013: 1-6.
- [20] Oda T, Arai T, Furukawa T, et al. Electric-field-dependence mechanism for cosmic ray failure in power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(7): 3505-3512.
- [21] 欧阳文敏, 王成昊, 彭超, 等. 高海拔宇宙射线对柔性直流用 4.5 kV IGBT 失效影响规律研究[J]. 电网技术, 2025, 49(12): 5325-5332.
- Ouyang Wenmin, Wang Chenghao, Peng Chao, et al. Study on the effect of high-altitude cosmic ray induced failure in 4.5 kV IGBT for flexible DC application[J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 5325-5332. (in Chinese)
- [22] Yu Quanzhi. Evaluating the broad neutron spectrum of ANIS[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2024, 203: 111075.
- [23] Kaminski N, Kopta A. Cosmic ray failures in power electronics: ABB application note 5SYA 2042-04[R]. Lenzburg: ABB, 2011.
- [24] Zeller H R. Cosmic ray induced failures in high power semiconductor devices[J]. Solid-State Electronics, 1995, 38(12): 2041-2046.
- [25] Yu Quanzhi, Shen Fei, Yuan Liubin, et al. Physical

design of an atmospheric neutron irradiation spectrometer at China Spallation Neutron Source[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 386: 111579.

- [26] Normand E, Baker T J. Altitude and latitude variations in avionics SEU and atmospheric neutron flux[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(6): 1484-1490.
- [27] Doc 7488 Manual of the ICAO standard atmosphere[S].
- [28] Kaindl W, Soelkner G, Schulze H J, et al. Cosmic radiation-induced failure mechanism of high voltage IGBT [C]//Proceedings of the 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD).

Piscataway: IEEE, 2005: 199-202.

- [29] Suzuki K, Yoshiura Y, Uryu K, et al. Tight relationship among field failure rate, single event burn-out (SEB) and cold bias stability (CBS) as a cosmic ray endurance for IGBT and diode[C]//Proceedings of 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Piscataway: IEEE, 2018: 184-187.
- [30] Dobynde M, Harikumar J, Guo Jingnan, et al. Cosmic radiation reliability analysis for aircraft power electronics[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 344-352.

作者简介



杨 柳 女, 1989年出生于河南省驻马店市。现为南方电网科学研究院有限责任公司教授级高级工程师, 湖南大学在读博士研究生。主要研究方向为大功率电力电子、柔性直流输电及功率器件可靠性。兼任全国电工电子产品可靠性与维修性标准化技术委员会委员。

E-mail: yangliu3@csg.cn



姚茗瀚 男, 2000年出生于辽宁省本溪市。现为南方电网科学研究院有限责任公司助理工程师。主要研究方向为功率半导体器件设计、测试及可靠性。

E-mail: yaominghan@csg.cn



梁世维 男, 1993年出生于湖南省泸溪县。现为湖南大学电气与信息工程学院副教授、博士生导师。主要研究方向为宽禁带功率芯片设计与制备, 功率器件测试分析、建模、可靠性, 空间电源等。IEEE Member, 担任多个电力电子与功率半导体领域国际期刊审稿人。

E-mail: swliang@hnu.edu.cn



徐启扬 男, 2003年出生于安徽省池州市。现为湖南大学硕士研究生。主要研究方向为功率半导体器件可靠性及辐射效应。

E-mail: m15715664985@163.com



周月宾 男, 1987年出生于陕西省渭南市。现为南方电网科学研究院有限责任公司高级工程师, 博士。主要研究方向为直流输电与电力电子技术。兼任全国电工术语标准化技术委员会委员, 长期从事高压直流输电及柔性直流输电技术与工程应用研究。

E-mail: zhoubin@csg.cn



黄守道 男, 1962年出生于湖南省郴州市。现为湖南大学二级教授、博士生导师, 海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室主任。主要研究大型风力发电技术、特种永磁电机及电力电子系统。获国家技术发明二等奖1项、国家科技进步一/二等奖5项。

E-mail: hsd1962@hnu.edu.cn



饶 宏 男, 1961年出生于湖北省武汉市。现为中国工程院院士、教授级高级工程师。主要研究方向为高压直流输电、柔性直流输电及交直流电网安全运行技术。长期从事直流输电重大工程及交直流电网运行领域的系统研究、设计和建设工作, 2021年当选中国工程院院士。

E-mail: raohong@csg.cn



彭 超 男, 1994年出生于湖南省常德市。现为工业和信息化部电子第五研究所正高级工程师。主要研究方向为半导体器件辐射可靠性、辐射效应试验测试及失效机理。长期从事SOI器件、功率半导体器件中子辐照及辐射诱导失效研究。

E-mail: pengchao@ceprei.com



涂欣易 女, 2003年出生于湖北省宜昌市。现为湖南大学硕士研究生。主要研究方向为功率半导体器件可靠性及辐射效应。

E-mail: tuxinyi0321@163.com