

# 大气中子辐照谱仪束流参数对 SiC 功率器件单粒子烧毁效应的影响\*

莫莉华<sup>1)2)3)</sup> 胡志良<sup>1)2)3)</sup> 于全芝<sup>1)4)†</sup> 周斌<sup>1)2)3)</sup> 李梦朝<sup>1)2)</sup>  
赵齐<sup>1)2)</sup> 沈飞<sup>1)2)</sup> 梁天骄<sup>1)2)3)‡</sup>

1) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

2) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

3) (粤港澳中子散射科学技术联合实验室, 东莞 523800)

4) (中国科学院物理研究所, 北京 100049)

(2026 年 1 月 10 日收到; 2026 年 3 月 12 日收到修改稿)

本文基于 SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管功率器件, 研究中国散裂中子源 (Chinese Spallation Neutron Source, CSNS) 大气中子辐照谱仪 (atmospheric neutron irradiation spectrometer, ANIS) 束流参数对功率器件单粒子烧毁试验的影响. 研究结果验证了不同注量率下效应的一致性, 以及不同能谱下效应的差异性, 并基于 Geant4 工具以及 TCAD 仿真分析了引起差异的原因. 本文研究不仅验证了 ANIS 的性能, 还积累了谱仪注量率和能谱相关的试验数据与技术, 为更多基于 ANIS 的用户开展相关试验提供了经验参考.

**关键词:** 单粒子烧毁, 大气中子辐照谱仪, 束流参数, SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管

**DOI:** 10.7498/aps.75.20260044

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260044

## 1 引言

大气中子单粒子效应是影响地面轨道交通、智能电网、航空飞行器及临近空间飞行器安全可靠运行的重要威胁之一. 初级宇宙射线与大气原子的级联反应, 产生中子、 $\pi$  介子、 $\mu$  子等次级粒子, 形成大气辐射环境<sup>[1-3]</sup>. 其中, 大气中子因其不带电、穿透能力强, 即使存在屏蔽层也可能在电子器件内部诱发显著的辐射损伤, 成为导致器件故障的因素之一, 直接影响其长期工作的稳定性与可靠性<sup>[2,4-10]</sup>. 基于加速器的散裂中子源装置可以有效模拟大气中子辐射环境, 为相关研究提供高通量、可控的辐

射模拟条件. 目前, 美国、英国、日本等国已建成多个基于加速器的脉冲散裂中子源, 并设立了专门用于模拟大气中子辐射环境的试验终端<sup>[11-13]</sup>. 近年来, 中国散裂中子源 (Chinese Spallation Neutron Source, CSNS) 建成大气中子辐照谱仪 (atmospheric neutron irradiation spectrometer, ANIS), 标志着我国首个用于模拟大气中子辐射环境的装置正式投入运行.

作为第三代半导体的代表, 碳化硅 (SiC) 功率金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 因其优异的耐高压、耐高温与高开关频率特性, 已成为新能源汽车、轨道交通、智能电网等关键领域现代电力电子系统的核心器件<sup>[14-17]</sup>. 这些系统常工

\* 广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2022A1515111111, 2021B1515120043)、国家自然科学基金 (批准号: 12505342) 和国家电网公司科技项目 (批准号: 5500-202320184A-1-1-ZN) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tjliang@ihep.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: qzhyu@iphy.ac.cn

作于复杂的大气环境中,使得 SiC MOSFET 面临大气中子诱发单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 的严峻威胁<sup>[10,18,19]</sup>,可能直接导致系统失效.为评估其失效率,目前普遍采用加速辐照试验方法.其中,散裂中子源因其能谱与真实大气中子能谱最为接近,被公认为理想的辐射源. Asai 等<sup>[20]</sup>于 2014 年率先利用散裂中子源开展了 SiC MOSFET 单粒子烧毁的试验研究,揭示了器件 SEB 概率与漏极偏置电压的强相关性,这一关键结论在后续多项研究中得到了印证<sup>[21-26]</sup>.中子与 SiC 晶格相互作用产生的次级离子及其径迹电离效应为 SiC MOSFET 发生 SEB 提供了初始的触发条件. Ball 等<sup>[27,28]</sup>的模拟研究表明,低线性能量传输 (linear energy transfer, LET) 离子撞击器件的沟道敏感位置时,沿离子径迹电离产生大量电子空穴对,这些载流子在器件内部高电场作用下被加速,形成的高度局部化的能量脉冲,并引发强烈的能量耗散,最终导致 SEB 的发生.现有研究多聚焦于电偏置条件 (如漏极电压、栅极电压) 对 SEB 的影响<sup>[22,24,25,29,30]</sup>,对于散裂中子源本身的关键参数 (如注量率与能谱特征) 的影响,尚缺乏系统性的探索.一方面,高注量率是实现快速加速试验的基础,不同注量率的试验结果是否一致直接影响测得的失效率是否可外推至实际应用场景;单粒子效应的截面是随中子能量变化的,能谱直接影响单粒子效应发生的概率与严重程度<sup>[29,31-33]</sup>,因此有必要研究注量率和能谱变化对单粒子效应试验的影响.另一方面,全球用于加速软错误测试的其他宽谱高能中子源装置 (如 LANSCE, TRIUMF, ISIS, RCNP),在快速调整束流注量率、能谱等参数方面存在困难. CSNS 的大气中子辐照谱仪是国内唯一能精确模拟真实大气中子能谱的地面加速测试装置<sup>[34,35]</sup>,其束流参数 (能谱、通量) 的可调性是研究 SEB 效应参数依赖性的唯一实验基础.鉴于此,本研究依托中国散裂中子源大气中子辐照谱仪可精准调控束流参数的优势,以 SiC MOSFET 为对象,探究不同束流参数配置对器件 SEB 响应的影响.这不仅对评估该器件在实际辐射环境下的可靠性具有重要工程意义,也可为建立准确的加速模拟试验方法提供关键数据支持.

## 2 试验细节

### 2.1 试验装置

中国散裂中子源的大气中子辐照谱仪是世界范围内少数能够开展航空电子设备与半导体器件大气中子辐射效应加速测试的重要平台之一,其中子能量覆盖范围从毫电子伏特 (meV) 到吉电子伏特 (GeV),在性能上可媲美美国 LANSCE 与英国 ISIS 的同类装置.尤其值得注意的是,CSNS ANIS 的中子能谱在 MeV 以上能量区间的占比 (1—10 MeV, 10—100 MeV, >100 MeV) 相比 LANSCE 和 ISIS 等束线更接近国际通用标准 JEDEC JESD89B(2021)<sup>[36]</sup>以及 IEC62396-1(2016)<sup>[37]</sup>给出的大气中子能谱<sup>[36]</sup>,具体如表 1 所示<sup>[11,12,36,38-41]</sup>.

表 1 大气中子能谱占比 (%)<sup>[11,12,35-37,39,41]</sup>

Table 1. Spectral distribution of atmospheric neutron energy (in %)<sup>[11,12,35-37,39,41]</sup>.

中子源	1— 10 MeV	10— 100 MeV	> 100 MeV	能量上限
CSNS ANIS (I5-II3, 24.5 m)	35	35	30	1.6 GeV
LANSCE IEC	52	26	22	800 MeV
ISIS ChipIR	20	35	45	800 MeV
TRIUMF TNF	24	54	21	500 MeV
TSL ANITA	65	28	7	174 MeV
JESD89 B	35	35	29	>GeV
IEC62396-1	37	37	26	>GeV

为适应不同种类样品的实验需求,ANIS 的束流调节系统设计较为复杂,其主要部件和总体布局如图 1 所示,具体物理设计参见文献<sup>[34]</sup>.该谱仪配备两级准直器,每级均有不同孔径供选择,主要用于控制束斑尺寸及调节中子注量率以满足不同实验需求,并能有效屏蔽来自外部的次级辐射与杂散本底.样品处的束斑大小主要由第 2 级准直器的孔径决定.通量调节器由 5 块不同厚度的钨 (W) 构成,通过组合使用可调节样品位置的中子注量率与能谱;在不使用通量调节器的“直通束”模式下,所获得的能谱与 JEDEC 标准谱最为接近.热中子过滤器由碳化硼和含硼聚乙烯两种材料组成,主要用于调控低能中子注量率 (<1 MeV 的中子).由此可见,通过选择不同的准直器孔径、钨块组合及过滤器配置,ANIS 可实现对其束流参数 (包括注量率、能谱与束斑尺寸) 的灵活调控.此外,CSNS 加

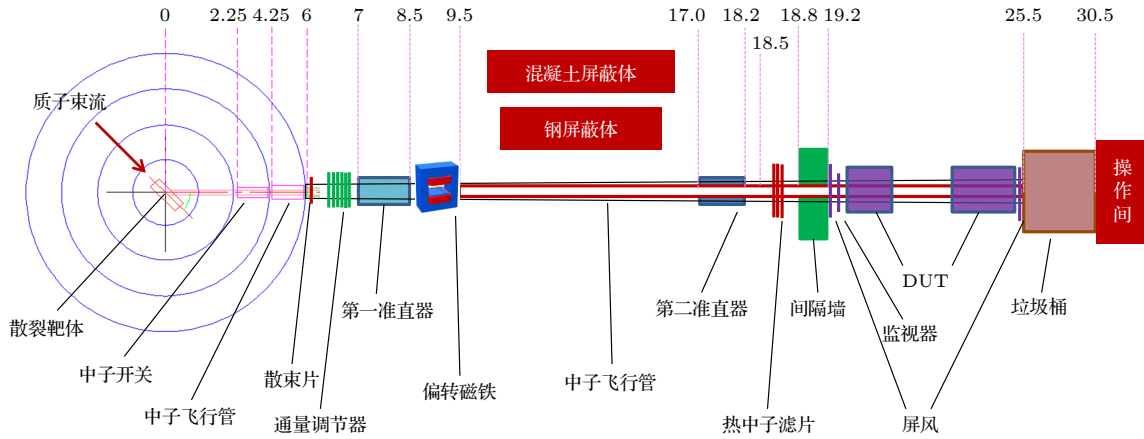


图 1 ANIS 示意图, 包括其主要部件和总体布局<sup>[34]</sup>

Fig. 1. Schematic diagram of ANIS, including its main components and overall layout<sup>[34]</sup>.

速器目前运行功率达到 170 kW, 未来 CSNS-II 的运行功率计划达到 500 kW, 届时 ANIS 的注量率也将相应提高. 因此, 系统研究 ANIS 束流参数对单粒子效应测试结果的影响, 对保障实验数据的可靠性与可比性具有重要意义.

## 2.2 器件及测试系统

选择同规格器件为辐照对象, 器件额定电压 1200 V, 导通电阻 80 mΩ. 在辐照之前, 对待测器件 (device under test, DUT) 进行了电气特性分析, 并对所有器件进行了筛查, 以确保其电气功能正常. 在本文的所有测试和模拟中, 器件都处于关断状态, 即栅极和源极设置为 0 V 或者 -4 V ( $V_{GS} = 0\text{ V}, -4\text{ V}$ ), 漏极用正高压偏置 ( $V_{DS} > 0\text{ V}$ ), 最高设置为 1200 V. 在 SEB 事件发生的瞬间, 检测系统通过监测漏极测试点的电流变化, 即可实现对 SEB 事件的判定, 其测试原理如图 2 所示. 在中子辐照试验中, 当漏极电流发生瞬态跳变且电流增量  $\Delta I$  约等于  $V_{DS}/R_1$  且无法恢复时, 判定发生了 SEB. 通过限流电阻将多个 SiC MOSFET 并联, 并利用多通道电流监测系统对各通道电流进行实时采集. 微控制器对采集的电流数据进行处理, 并通过以太网传输至计算机软件进行显示.

## 2.3 试验设置

辐照试验在中国散裂中子源的大气中子辐照谱仪开展, 实验设置如图 3 所示. 该系统每次辐照运行最多可控制 40 个器件. 在中子辐照期间, 测试系统以 1 ms 的时间分辨率监测和测量被测功率 MOSFET 器件的漏电流, 包括漏极漏电流  $I_{DS}$

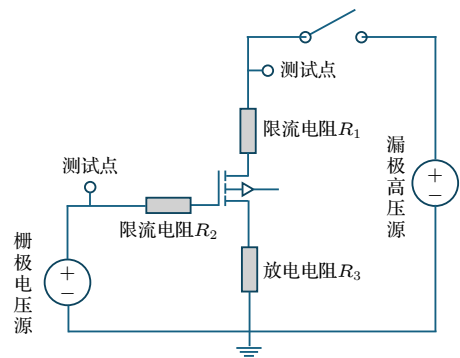


图 2 SEB 检测原理图

Fig. 2. SEB detection schematic diagram.

和栅极漏电流  $I_{GS}$ . 当发生单粒子烧毁的器件数达到 80%, 或者器件注量超过  $1 \times 10^{10}\text{ n/cm}^2$  时停止辐照.

## 3 试验结果

功率器件的海平面故障时间 (failure in time, FIT) 可以通过实验数据计算出来, 以评估由地面中子引起器件故障的灵敏度. 参考 JEDEC 标准 JEP151 A 测试流程<sup>[42]</sup>, 对于电力电子设备加速辐照试验产生的器件故障率  $\lambda_{CR}$  可以通过以下公式计算得到:

$$\lambda_{CR}[\text{FIT}] = \frac{N_{\text{fails}}}{\sum_{i=1}^{i=N_{\text{fails}}} \Delta f(t_i) \times n(t_i)} \times 13 \times 10^9,$$

其中,  $N_{\text{fails}}$  是记录的失效次数,  $\Delta f(t_i)$  是自上次失效以来的辐照通量, 单位为  $\text{neutrons/cm}^2$ ,  $n(t_i)$  为试验中失效时间  $t_i$  之前未失效的 DUT 数量. 单

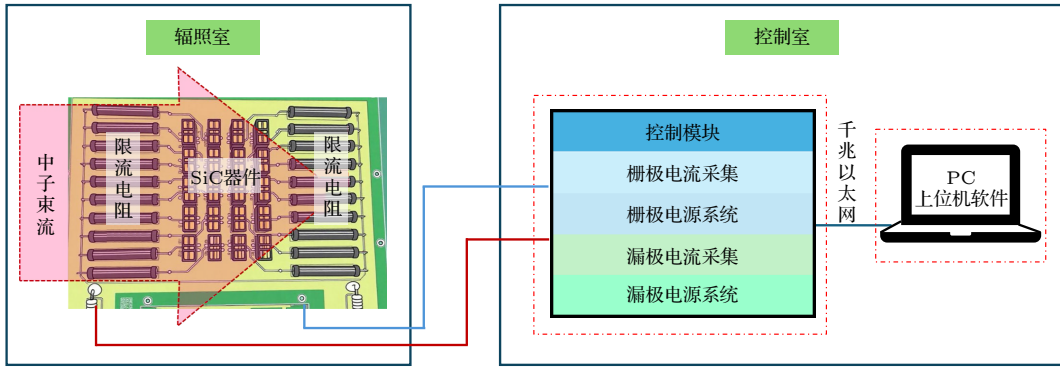


图 3 中子辐照布局示意图(非等比例)

Fig. 3. Neutron irradiation layout diagram (not to scale).

位 FIT 对应于  $10^9$  个设备小时内发生 1 次故障. 假设海平面的平均中子通量为  $13 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $E_n > 10 \text{ MeV}$ ). 误差棒表示的置信水平为 90%.

### 3.1 注量率的一致性

基于加速器的散裂中子源装置, 其中子注量率与加速器功率呈正相关. 在不改变 ANIS 工况的情况下, 随加速器质子打靶功率的提升, ANIS 样品处注量率是呈现线性增加的趋势. 根据 ANIS 所设置工况的计算结果, 加速器运行功率分别为 125 kW, 135 kW, 160 kW 时, 对应样品处能量高于 10 MeV 的中子注量率依次为  $8.7 \times 10^5$ ,  $9.4 \times 10^5$ ,  $1.1 \times 10^6 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . 在 meV—1 MeV 量级能区, 注量率的计算结果已经与测量结果进行对比验证, 具体的计算以及验证方法参见文献 [35].

实验结果如图 4 所示, 不同加速器功率下, 器件 SEB 效应具有较好的一致性. 这表明在注量率成比例增大的条件下, SiC MOSFET 的故障率并未发生显著偏移, 进一步支持了中子单粒子效应主要来源于高能中子与半导体原子核发生散裂反应产生次级离子的物理机制, 其发生率与注量率之间在该范围内基本服从线性关系. 值得指出的是, 中子辐照未观测到类似高 LET 重离子辐照所诱发的单粒子泄漏电流 (SELC) 效应 [43].

调整样品处中子注量率可通过两种途径实现: 一是提升加速器打靶功率, 即通过增强质子束流强度来增大中子产额, 从而在源头上提高注量率; 二是在束流应用端, 通过选用不同孔径的准直器对束流进行几何约束, 进而调节到达样品的中子注量率. 为研究改变准直器调整注量率对辐照效应的影响, 本实验通过选择不同孔径的准直器, 在  $V_{DS} =$

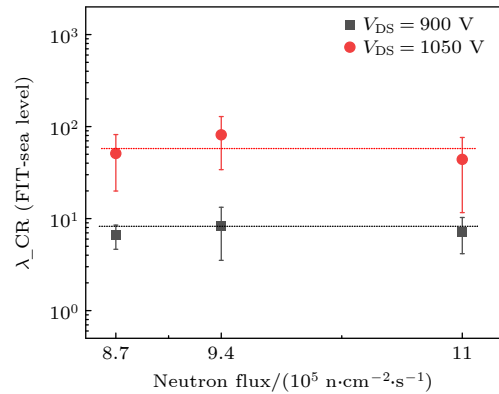


图 4 加速器功率引起的注量率变化对 SiC MOSFET ( $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ) 的 FIT 实验结果的影响, 分别对应加速器功率为 125 kW, 135 kW, 160 kW

Fig. 4. The effect of flux changes due to accelerator power on the FIT experimental results of SiC MOSFET, correspond to accelerator power: 125 kW, 135 kW, 160 kW.

900, 1050, 1200 V 偏置条件下分别设置了  $9.4 \times 10^5$ ,  $4.5 \times 10^6$ ,  $7.3 \times 10^6 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  三种注量率 ( $> 10 \text{ MeV}$ ). 实验结果如图 5 所示, 在不同注量率条件下, 器件故障率表现出较高的一致性. 这说明在本实验所覆盖的注量率范围内 (跨越近一个数量级), SiC MOSFET 的故障概率并未表现出明显的超线性或亚线性行为. 该结果与前述通过改变加速器功率调节注量率的实验结论相吻合, 共同表明在注量率变化幅度内, 器件的中子单粒子效应敏感性未发生显著改变, 进一步印证了基于注量率线性外推进行失效预估在此类器件中的适用性.

上述结果表明, 基于散裂中子源的加速辐照测试方法, 可在一定程度上用于评估器件或设备在高通量环境下的单粒子效应可靠性. 这为地面模拟大气中子单粒子效应提供了一种高效率、高可信度的实验途径. 尤其在中子能谱与真实大气中子谱

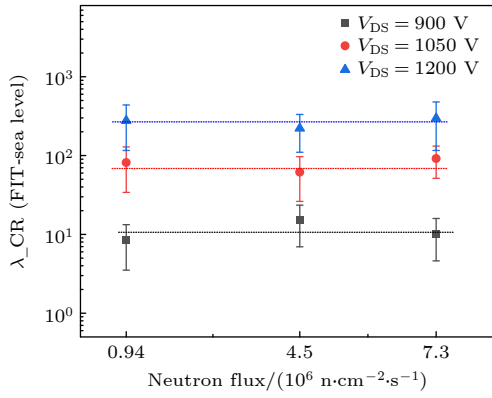


图5 ANIS准直器孔径引起注量率变化对SiC MOSFET ( $V_{GS} = 0$  V)的FIT实验结果的影响

Fig. 5. Effect of flux variation from first collimator aperture changes on FIT results of SiC MOSFET ( $V_{GS} = 0$  V).

经过适当匹配和论证的基础上,该方法获得的加速测试数据,可结合解析模型或蒙特卡罗模拟,用于预测器件在真实辐射环境中的失效率,从而显著缩短抗辐射加固设计的验证周期.此外,实验也证实,在测试系统分辨率与统计置信度允许的范围内,适当提高注量率可大幅缩短数据采集时间,从而显著提升实验效率,为快速评估与筛选大批量器件的抗中子辐照性能提供可行且可靠的技术路径.

### 3.2 能谱的差异性影响

在电子系统与器件大气中子单粒子效应可靠性评估中,其类型的复杂性导致其对中子注量率的需求具有多样性.前文已在一定程度上表明,在能谱基本不变的前提下调整注量率,对测试结果影响并不显著.然而在实际测试中,为实现特定注量率,常需借助束流阻挡手段进行调节,这往往会引起束流线上中子能量分布的变化,即中子能谱形状发生改变.如图6所示,以ANIS为例,通过引入不同厚度与组合的钨块作为通量调节器,以及含硼聚乙烯、碳化硼作为热中子过滤器,样品位置处的中子能谱结构可发生系统性改变.能谱的具体计算方法参考文献[35].

如表2所示,在不使用通量调节器的直通束(I4-III1)条件下,1—10 MeV中子通量占比为24.6%,10—100 MeV占比为29.4%,能量高于100 MeV的中子合计占比约46%.引入阻挡材料后,能谱结构发生系统性变化,整体呈现明显的“硬化”趋势.具体来看,直通束条件下1—10 MeV中子占比为24.6%;加入1 cm钨块后,该比例降至21.4%;当

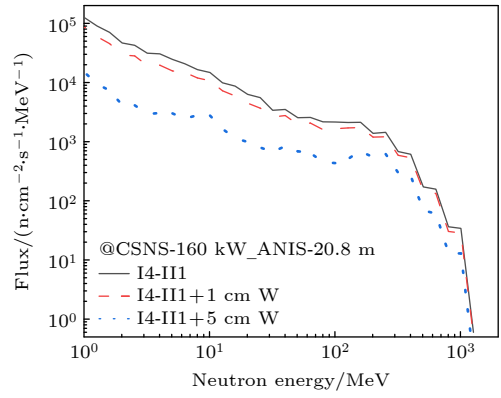


图6 ANIS不同工况样品位置中子能谱的对比(MCNPX计算谱)

Fig. 6. Comparison of neutron energy spectra at sample positions under different operating conditions of ANIS (MCNPX-calculated spectra).

表2 ANIS不同工况的中子能谱占比(%)  
Table 2. Proportions of neutron energy spectrum under different operating conditions of ANIS (%).

> 1 MeV 能谱占比	1—10 MeV	10—100 MeV	>100 MeV
I4-III1 直通束	24.6	29.4	46.0
I4-III1+1 cm W	21.4	28.4	50.2
I4-III1+5 cm W	11.1	23.0	65.9

钨块厚度增至5 cm时,进一步下降至11.1%,同时>100 MeV的高能段占比显著上升至65.9%,表明能谱进一步向高能区域集中.

不同能量的中子通量占比变化源于中子与不同材料的相互作用机制:钨有较大的中子散射截面,对能量>1 MeV的中子,通过中子散射的过程,将其通量进行衰减.添加钨块阻挡后的中子能谱明显“硬化”,即高能中子占比提升.在单粒子效应评估中,能谱形态直接影响Weibull曲线各能区的有效注量权重,进而影响故障率的计算结果.特别是<100 MeV的能段通常对应曲线的上升区(对能谱变化敏感),而高能段(如>100 MeV)往往对应SEB截面饱和区[33].尽管当前基于JEDEC标准的器件失效率计算通常只考虑能量高于10 MeV的中子注量,但Akturk等[29]的研究表明,低于10 MeV的中子亦可能诱发SiC MOSFET发生单粒子烧毁.因此,实验中若为调节注量率而引入阻挡材料,须评估由此引发的能谱畸变对故障率评估带来的潜在偏差,以确保可靠性测试结果的准确性与可比性.

为探究能谱变化对器件可靠性评估的具体影响,本研究基于CSNS ANIS开展中子辐照实验,

获得并分析不同能谱条件下诱发 SiC MOSFET 故障率的变化规律. 实验结果如图 7 所示, 随着钨块厚度的增加, 器件的失效率 FIT 呈现上升趋势, 与预期一致. 在  $V_{DS} = 800$  V 时, FIT 值最大可相差约 2.7 倍 ( $2.7\times$ ); 而当  $V_{DS}$  升至 1200 V 时, 各条件下的 FIT 值趋于一致. 该现象可归因于束流中心线上阻挡层增厚导致的“能谱硬化”效应, 即样品处高能中子占比的提升. 高能中子诱发 SEB 的截面通常位于 Weibull 曲线的饱和区, 该区间中子占比的增大将直接导致器件故障概率的升高. 本研究表明, 在开展中子单粒子效应加速辐照实验时, 除关注中子束的注量率外, 必须同步考虑能谱形态的变化, 避免因能谱失真引入的可靠性评估偏差.

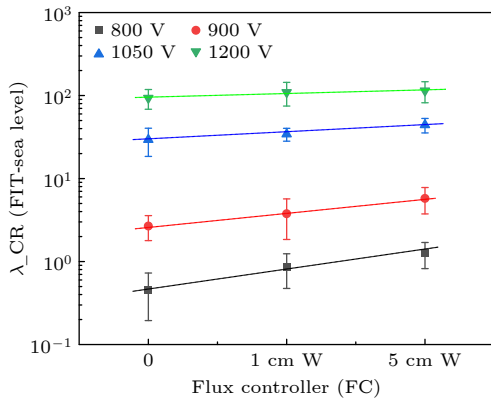


图 7 ANIS 不同工况 SiC MOSFET 的 FIT 实验结果 ( $V_{GS} = -4$  V), 在  $V_{DS} = 800$  V 时, FIT 值最大可相差约 2.7 倍; 而当  $V_{DS}$  升至 1200 V 时, FIT 值趋于一致  
Fig. 7. FIT results of SiC MOSFET under different operating conditions of ANIS ( $V_{GS} = -4$  V), at  $V_{DS} = 800$  V, the maximum difference in FIT values can be about 2.7 times; when  $V_{DS}$  rises to 1200 V, FIT values tend to be consistent.

## 4 分析与讨论

### 4.1 中子能谱对次级粒子 LET 谱的影响

当中子入射至 SiC MOSFET 器件时, 会与材料原子发生核反应, 产生多种带电二次粒子. 这些二次粒子在器件敏感区域内沉积电荷, 是诱发单粒子效应的主要原因. 其中, 二次粒子的种类、能量、射程以及对应的 LET 值, 直接影响电荷沉积效率, 进而决定单粒子效应是否发生及其严重程度. 为深入研究该过程, 本文基于 Geant4 工具包<sup>[44-46]</sup>, 构建了 SiC MOSFET 的仿真模型<sup>[26]</sup>, 结构如图 8 所示. 模型左向右依次包括: 0.5 mm 环氧树脂封装

层、3  $\mu\text{m}$  铝金属引线层、0.2  $\mu\text{m}$  二氧化硅介质层、10  $\mu\text{m}$  SiC 外延层 (即敏感区) 以及 10  $\mu\text{m}$  SiC 衬底. 该模型反映了器件各层材料的几何尺寸与物理属性, 可用于模拟中子在器件内部的输运过程及其引发的核反应. 通过该模型, 我们模拟并收集了宽能谱中子入射, 在器件敏感区产生的二次带电粒子 (如质子、 $\alpha$  粒子、重离子等) 的关键信息, 包括其种类、能量、出射角、LET 谱及深度方向沉积能量分布, 为后续分析单粒子效应敏感性与错误率提供了关键物理输入.

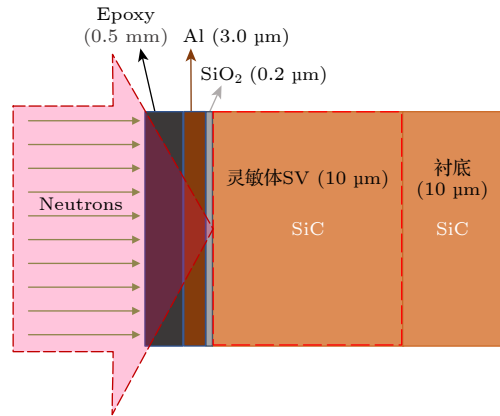


图 8 基于 Geant4 工具构建的几何模型的横截面示意图 (非等比例)  
Fig. 8. Schematic cross-sectional view of geometric model constructed based on Geant4 tool (not to scale 1).

为揭示中子能谱调节对次级粒子能量沉积谱的影响, 图 9 展示了不同中子能谱条件下, 次级粒子在 SiC 器件敏感体积内的 LET 概率密度分布. 纵观整体, 所有曲线均呈现随着 LET 值增大, 概率密度急剧衰减的特征, 这与核反应产生次级粒子的统计规律一致, 即高 LET 事件的发生概率远小于低 LET 事件. 然而, 关键点在于比较不同能谱 (即不同通量调节器) 下曲线的相对变化. 从“I4-I-II1” (直通束) 到“I4-II1+5 cm W”, 曲线形态发生了系统性演变, 具体表现为: 1) 分布整体向高 LET 方向偏移: 添加阻挡材料后, 概率密度分布曲线整体呈现向更高 LET 方向“展宽”和“右移”的趋势. 尤其在 LET 值约  $4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  以上的区间, 增大通量调节器后的曲线虽然概率密度绝对值仍很低, 但相对于直通束在相同 LET 值处的衰减速率变缓, 这意味着在高 LET 区间, 使用通量调节器下的事件相对概率贡献有所增大. 2) 峰值区域形态变化: 直通束能谱 (“I4-II1”) 的曲线在较低

LET 值 ( $< 4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ ) 处具有最高的概率密度峰值. 随着通量调节器加厚, 该峰值降低并向稍高的 LET 方向移动, 同时中高 LET 区间 ( $4\text{--}10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ ) 的概率密度占比相对提升.

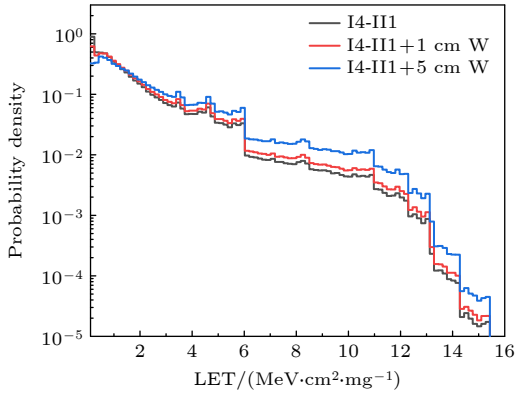


图 9 次级粒子在 SiC 器件灵敏体积内的 LET 概率密度分布  
Fig. 9. LET probability density distribution of secondary particles within the sensitive volume of SiC devices.

钨的作用是使入射中子能谱“硬化”, 即过滤掉大量低能中子, 使穿透后的中子谱中高能中子占比显著提高 (如前文能谱数据所示). 高能中子与 SiC 原子核发生非弹性散射或核反应时, 更有可能产生能量更高的质子、 $\alpha$  粒子乃至重反冲核. 这些高能次级粒子的射程更长, 但其 LET 与其能量并非单调关系: 对于质子等高能轻离子, 其 LET 值随能量升高而降低; 而对于重反冲核, 其 LET 值极高, 但产生截面随中子能量变化复杂. 能谱硬化导致产生高 LET 重离子的可能性增加, 同时高能轻离子产生的低 LET 事件比例可能相对变小. 这使整体 LET 分布形状发生改变——高 LET 尾部变得相对“肥厚”, 尽管在任一特定高 LET 值处的绝对概率密度可能仍然很低, 但整个高 LET 区间的积分概率相对于软能谱是增加的. 这正是图中曲

线在高 LET 区间“右抬”现象所揭示的物理本质, 也是评估器件对高 LET 事件敏感性的关键.

这种分布变化意味着, 在硬化能谱辐照下, SiC MOSFET 虽然遭受的注量不变, 但导致发生单粒子烧毁等严重后果的高 LET 事件的相对风险可能上升. 在利用地面加速器模拟大气中子辐射环境进行可靠性评估时, 应该考虑这种因能谱差异导致的 LET 谱失真. 若测试使用的能谱比实际环境能谱更“硬”, 则可能高估器件对高 LET 事件的敏感度; 反之, 则可能低估. 因此, 匹配或等效目标环境的中子能谱及其对应的次级粒子 LET 谱, 是获得准确单粒子效应故障率预估的前提.

## 4.2 TCAD 数值仿真分析

图 7 的实验结果揭示了一个关键现象: 不同能谱中子辐照诱发故障率的差异强烈依赖于漏极偏置电压  $V_{DS}$ . 在  $V_{DS} = 800 \text{ V}$  时, 图 7 中不同能谱条件下的 FIT 值最大可相差约 2.7 倍; 而当  $V_{DS}$  升至 1200 V 时, 各条件下的 FIT 值趋于一致. 这一观测结果的物理根源在于, 器件发生 SEB 的临界 LET 阈值是  $V_{DS}$  的函数<sup>[47]</sup>. 为深入阐释这一机制, 基于 TCAD 仿真, 分析不同条件下的瞬态电流响应, 模型具体设置可参见文献 [26]. 器件结构信息参考文献 [48,49] 和反向工程信息, 如图 10 所示. 其中 SiC 材料的导热系数和热容参数引用了参考文献 [48] 中的值. 该器件的外延厚度为  $10 \mu\text{m}$ , 掺杂浓度约为  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . 经校准, 器件的导通和击穿电压分别为 2.5 V 和 1650 V. SEB 模拟中使用的主要物理模型包括用于传输的传统漂移扩散模型、用于生成和复合的 Shockley-Read Hall 模型和 Auger 模型、掺杂依赖模型、考虑迁移率的高场饱和模型和 Enormal 模型、用于 SiC 材料不完全

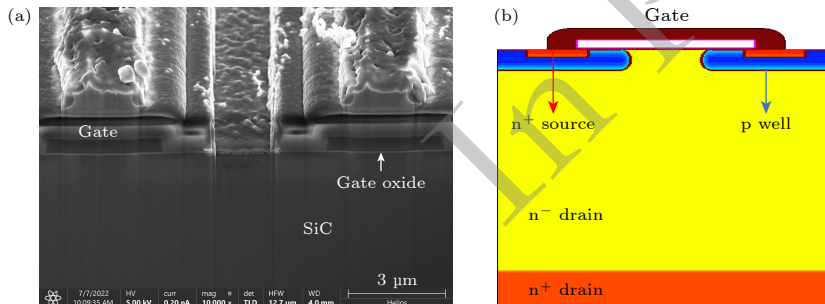


图 10 SiC MOSFET 器件 SEM 图片 (左图) 和 SiC MOSFET 模型的横截面示意图 (非等比例)(右图)

Fig. 10. SEM image of a SiC MOSFET device (left) and cross-sectional schematic of the SiC MOSFET model (not to scale) (right).

电离和各向异性冲击电离模型以及晶格温度的热方程. 仿真开始后, 离子入射时间设置为 100 ps, 以确保离子入射时器件处于稳定状态.

图 11 展示了在固定 LET(0.038 pC/μm) 粒子入射下, 器件  $V_{DS} = 825$  V 和 1155 V 时的漏极电流瞬态响应. 模拟显示, 在相同 LET 的激发下, 高偏压 (1155 V) 所触发的峰值电流显著高于低偏压 (825 V) 下的响应. 并且, 低偏压下的漏极电流在 ns 量级时降到亚 μA 量级; 而高偏压下的漏极电流维持在 A 量级. 这一现象表明, 更高的  $V_{DS}$  极大地降低了诱发器件发生 SEB 所需的能量沉积门槛. 在更高电场下, 初始电荷沉积产生的电子-空穴对更易被加速, 通过碰撞电离产生雪崩倍增的增益更高, 从而更容易达到并超过维持 SEB 所需的临界电流密度. 因此, 对于给定的 LET 值, 存在一个发生 SEB 的最低  $V_{DS}$  阈值 ( $V_{DS, th}(LET)$ ), 这与 Galloway 等 [47] 的结论一致. 如图 12 所示, 发生 SEB 的最低  $V_{DS}$  阈值随离子 LET 的减小而增大. 意味着随着偏置电压向额定电压 (1200 V) 靠近, 引发其 SEB 的 LET 阈值变小, 以至于大量的低 LET 值离子也足以引发该效应.

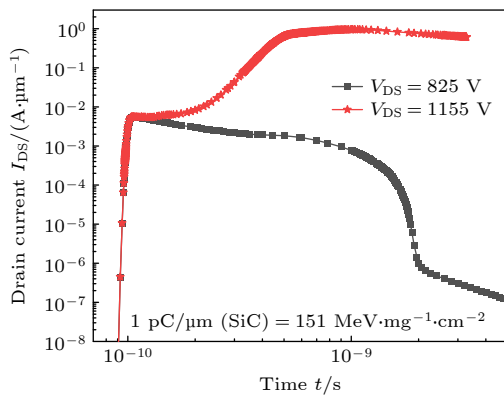


图 11 离子入射后 SiC MOSFET 漏极电流密度随时间变化的模拟, LET = 0.038 pC/μm, 偏置条件为  $V_{DS} = 825$  V,  $V_{GS} = 0$  V (黑色方块);  $V_{DS} = 1155$  V,  $V_{GS} = 0$  V (红色五角星)  
Fig. 11. Simulation of the time-dependent variation of drain current density in SiC MOSFET after ion incidence, LET = 0.038 pC/μm, bias conditions:  $V_{DS} = 825$  V,  $V_{GS} = 0$  V (black square);  $V_{DS} = 1155$  V,  $V_{GS} = 0$  V (red star).

图 11 直观表明, 对于 LET = 0.038 pC/μm 的粒子,  $V_{DS} = 1155$  V 已超过其阈值, 引发了大电流, 而  $V_{DS} = 825$  V 低于其阈值, 故电流可恢复至亚 μA 量级. 图 13 则从另一个角度验证了上述阈值关系. 在固定  $V_{DS} = 825$  V 的条件下, 对比 LET = 0.038 pC/μm 与 0.07 pC/μm 的粒子入射. 模拟清

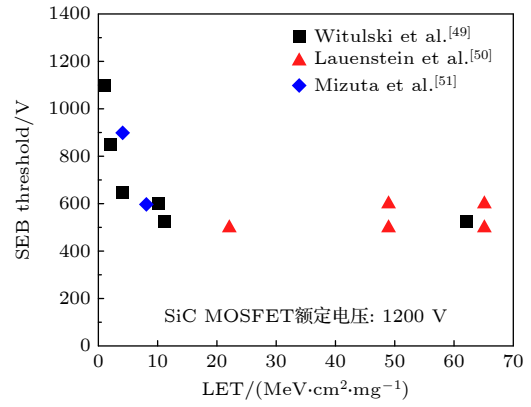


图 12 SiC MOSFET 的 SEB 阈值电压随 LET 变化关系, 图片来自文献 [47], 数据来自文献 [49–51]

Fig. 12. Experimental measurement results of SEB threshold voltage and LET of the SiC MOSFET, the picture are from Ref. [47], and the data are from Refs. [49–51].

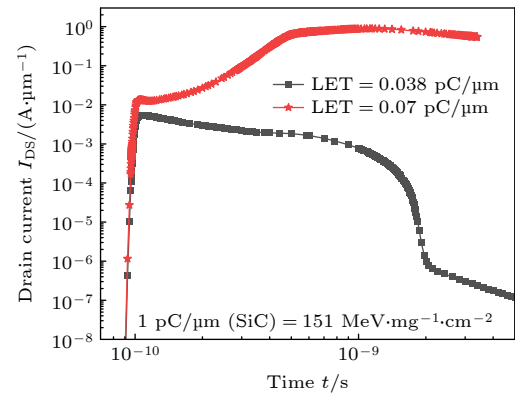


图 13 离子入射后 SiC MOSFET 漏极电流密度随时间变化的模拟, 偏置条件:  $V_{DS} = 825$  V, LET = 0.038 pC/μm (黑色方块); LET = 0.07 pC/μm (红色五角星)

Fig. 13. Simulation of the time-dependent variation of drain current density in SiC MOSFET after ion incidence, bias condition:  $V_{DS} = 825$  V, LET = 0.038 pC/μm (black square); LET = 0.07 pC/μm (red star).

晰显示, 更高 LET(0.07 pC/μm) 的粒子能在该偏压下引发并维持大电流. 这直接证明, 在固定的  $V_{DS}$  下, 存在一个触发 SEB 所需的最小 LET 阈值 ( $LET_{th}(V_{DS})$ ). LET 越高, 单次事件沉积的电荷量越大, 越容易在给定电场下启动并维持雪崩倍增过程.

在较低的  $V_{DS}$  下, 引发器件 SEB 的 LET 阈值较高. 如图 7 所示,  $V_{DS} = 800$  V 时, FIT 值普遍较低, 意味着仅有一部分高 LET 的次级粒子有能力超过阈值并引发 SEB. 如前文次级粒子 LET 谱分析所示, 不同能谱条件会显著改变高 LET (> 4 MeV·cm<sup>2</sup>/mg) 粒子的产额比例. “硬化”能谱

(如“5 cm·W”)产生了更“肥厚”的高 LET 粒子谱尾(图 9). 因此, 在低偏压下, FIT 值主要对高 LET 粒子的注量敏感. “硬化”能谱下的高 LET 粒子注量率显著高于“软”能谱, 导致其计算出的 FIT 值也显著更高, 从而产生最大可达 2.7 倍的差异. 随着  $V_{DS}$  升高(至 1200 V), 器件的 LET<sub>th</sub> 急剧下降. 此时, 不仅高 LET 粒子, 大量中低 LET 的次级粒子也超过了降低后的阈值, 能够引发 SEB. 如图 9 所示, 虽然不同能谱下的粒子 LET 分布形状在高 LET 区存在一定差异, 但当器件在较高  $V_{DS}$  偏置, 较低 LET 值的二次粒子也能引发 SEB 时, 不同能谱条件下有效故障注量率(即  $LET > LET_{th}(V_{DS})$  的粒子注量率)的差异也随之减小. 在极限情况下, 当  $V_{DS}$  足够高, 使得 LET<sub>th</sub> 低于绝大多数次级粒子的 LET 时, 器件的 SEB 截面趋近于饱和, 对能谱形状不再敏感. 这就解释了为何在 1200 V 时, 不同能谱下的 FIT 值趋于一致.

## 5 结 论

本研究通过系统性实验与仿真相结合的方法, 深入揭示了中子注量率、中子能谱、器件偏置电压与 SiC MOSFET 单粒子烧毁可靠性之间的复杂关联机制, 并对地面加速器测试的评估方法提出了重要建议. 结论如下: 1) 在不同注量率条件下器件故障率表现出较高的一致性, 印证了基于注量率线性外推进行失效预估在当前注量率水平此类器件中的适用性. 实验证实, 在测试系统时间分辨率与统计置信度允许的范围内, 适当提高注量率可大幅缩短数据采集时间, 从而显著提升实验效率, 为快速评估与筛选大批量器件的抗中子辐照性能提供可行且可靠的技术路径. 2) 实验中若为调节注量率而引入阻挡材料, 须评估由此引发的能谱畸变对故障率评估带来的潜在偏差, 以确保可靠性测试结果的准确性与可比性. SiC MOSFET 的 SEB 失效对中子能谱的敏感度是工作偏置电压的函数. 低偏压下, FIT 对能谱的高能尾部高度敏感; 高偏压下, 此敏感性显著减弱, 失效阈值扩展至更宽的中低 LET 范围. 因此, 在基于加速器进行地面模拟大气中子单粒子效应测试以评估其可靠性应用时, 应该尽可能使测试条件(中子能谱与器件偏置电压)与目标环境等效. 能谱的失配可能导致对故障率的严重高估或低估.

## 参考文献

- [1] Barth J L, Dyer C, Stassinopoulos E 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 466
- [2] Dyer C, Hands A, Ryden K, Lei F 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 432
- [3] Tezari A, Stassinakis A N, Paschalis P, Mavromichalaki H, Plainaki C, Kanellakopoulos A, Norma Crosby, Dierckx M, Karaiskos P 2022 *Genes (Basel)* **1** 413
- [4] Dyer C, Hands A, Ford K, Frydland A, Truscott P 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3596
- [5] Hands A, Morris P, Ryden K, Dyer C, Truscott P, Chugg A, Parker S 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2687
- [6] Dyer A, Hands A, Ryden K, Dyer C, Flintoft I, Ruffenach A 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 1139
- [7] Dyer C S, Lei F, Clucas S N, Smart D F, Shea M A 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2038
- [8] Hapgood M, Angling M, Attrill M B G, Burnett C, Cannon P, Dyer C, Eastwood J, Elvidge S, Gibbs M, Harrison R, Hord C, Horne R, Jackson D, Jones B, Machin S, Mitchell C, Preston J, Rees J, Rogers N, Richards A, Routledge G, Ryden K, Tanner R, Thomson A, Wild J, Willis M 2020 *Summary of space weather worst-case environments (2nd revised edition) Report*
- [9] Yang W T, Hu Z L, He H, Mo L H, Zhao X H, Song W Q, Yi T C, Liang T J, He C H, Li Y H, Wang B, Wu L S, Liu H, Shi G 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 138502 (in Chinese) [杨卫涛, 胡志良, 何欢, 莫莉华, 赵小红, 宋伍庆, 易天成, 梁天骄, 贺朝会, 李永宏, 王斌, 吴龙胜, 刘欢, 时光 2024 物理学报 **73** 138502]
- [10] Coq Germanicus R, Michez A, Niskanen K, Chaudhary M, Bascoul G, Chazal V, Wrobel F, Boch J 2025 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **72** 2368
- [11] Wender S, Dominik L 2020 *SAE Int. J. Adv. Curr. Pract. Mobility* **2** 1279
- [12] Council S a T F <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/Chipir.aspx> [2025-February 4, 2026]
- [13] Iwamoto Y, Fukuda M, Sakamoto Y, Tamii A, Hatanaka K, Takahisa K, Nagayama K, Asai H, Sugimoto K, Nashiyama I 2017 *Nucl. Technol.* **173** 210
- [14] Langpoklakpam C, Liu A C, Chu K H, Hsu L H, Lee W C, Chen S C, Sun C W, Shih M H, Lee K Y, Kuo H C 2022 *Crystals* **12** 245
- [15] Heckman R, Quinn C 2025 *IEEE Power Electron. Mag.* **11** 54
- [16] Ravindran R, Massoud A M 2025 *Microelectron. Eng.* **299** 112348
- [17] Zhang Y H, Dong D, Li Q, Zhang R, Udrea F, Wang H 2025 *Nat. Rev. Electr. Eng.* **2** 155
- [18] Pearton S J, Aitkaliyeva A, Xian M, Ren F, Khachatryan A, Ildefonso A, Islam Z, Jafar Rasel M A, Haque A, Polyakov A Y, Kim J 2021 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **10** 055008
- [19] Dobynde M, Harikumaran J, Guo J, Wheeler P, Galea M, Buticchi G 2024 *IEEE Trans. Transp. Electr.* **10** 344
- [20] Asai H, Nashiyama I, Sugimoto K, Shiba K, Sakaide Y, Ishimaru Y, Okazaki Y, Noguchi K, Morimura T 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 3109
- [21] Akturk A, McGarrity J M, Goldsman N, Lichtenwalner D, Hull B, Grider D, Wilkins R 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1248
- [22] Lichtenwalner D J, Akturk A, McGarrity J, Richmond J, Barbieri T, Hull B, Grider D, Allen S, Palmour J W 2018 *Mater. Sci. Forum* **924** 559
- [23] Kono H, Ohashi T, Noda T, Sano K 2019 *Mater. Sci. Forum*

963 738

- [24] Martinella C, Alia R G, Stark R, Coronetti A, Cazzaniga C, Kastriotou M, Kadi Y, Gaillard R, Grossner U, Javanainen A 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 634
- [25] Niskanen K, Coq Germanicus R C, Michez A, Wrobel F, Boch J, Saigne F, Touboul A D 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 1623
- [26] Mo L H, Yu Q Z, Hu Z L, Zhou B, Yi T C, Yuan L B, Lin L, Shen F, Liang T J 2023 *Microelectron. Reliab.* **146** 114997
- [27] Ball D R, Sierawski B D, Galloway K F, Johnson R A, Alles M L, Sternberg A L, Witulski A F, Reed R A, Schrimpf R D, Javanainen A, Lauenstein J M 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 337
- [28] Ball D R, Galloway K F, Johnson R A, Alles M L, Sternberg A L, Witulski A F, Reed R A, Schrimpf R D, Hutson J M, Lauenstein J M 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 1430
- [29] Akturk A, Wilkins R, Gunthoti K, Wender S A, Goldsman N 2022 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **69** 900
- [30] Niskanen K, Touboul A D, Germanicus R C, Michez A, Javanainen A, Wrobel F, Boch J, Pouget V, Saigne F 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 1365
- [31] Slayman C W 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3163
- [32] Wender S A, O'Donnell J M, Zavorka L, Bhuva B 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 1114
- [33] Pritts J M, Wender S A, George J S, Fairbanks T D, O'Donnell J M 2020 *IEEE Radiat Effects* 105
- [34] Yu Q Z, Shen F, Yuan L B, Lin L, Hu Z L, Zhou B, Liang T J 2022 *Nucl. Eng. Des.* **386** 111579
- [35] Hu Z L, Mo L H, Zhou B, Yi T C, Li M C, Zhao Q, Liang T J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 192901 (in Chinese) [胡志良, 莫莉华 周斌, 易天成, 李梦朝, 赵齐, 梁天骄 2025 物理学报 **74** 192901]
- [36] JEDEC 2021 *Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices (JESD89B)* (VA, U. S. A: JEDEC Solid State Technology Association)
- [37] IEC 2016 *Process management for avionics - Atmospheric radiation effects -Part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment (IEC 62396-1)* (Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission)
- [38] IEC 2017 *Process Management for avionics-Atmospheric Radiation Effects - Part 2: Guidelines for Single Event Effects Testing for Avionics Systems (IEC 62396-2)* (Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission)
- [39] Prokofiev A V, Blomgren J, Majerle M, Nolte R, Rottger S, Platt S P, Cai X X, Smirnov A N 2009 *IEEE Radiation Effects Data Workshop* Quebec, QC, Canada, July 20–24, 2009 pp166–173
- [40] JEDEC 2012 *Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial CosmicRay-Induced Soft Errors inSemiconductor Devices (JESD89A)* (VA, U. S. A: JEDEC Solid State Technology Association)
- [41] Blackmore E W 2009 *IEEE Radiation Effects Data Workshop* Quebec, QC, Canada, July 20–24, 2009 pp157–160
- [42] JEDEC 2022 *Test Procedure for the Measurement of Terrestrial Cosmic Ray Induced Destructive Effects in Power Semiconductor Devices (JEP151A)* (VA, U. S. A: JEDEC Solid State Technology Association)
- [43] Yan X Y, Hu P P, Zhao S W, Chen Q Y, Cai L, Jiao Y, Yang J H, Li X Y, Sun Y M, Liu J 2023 *Microelectron. Reliab.* **150** 115140
- [44] Allison J, Amako K, Apostolakis J, Arce P, Asai M, Aso T, Bagli E, Bagulya A, Banerjee S, Barrand G, et al. 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **835** 186
- [45] Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Dubois P A, Asai M, Barrand G, Capra R, Chauvie S, Chytracek R, et al. 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 270
- [46] Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, Asai M, Axen D, Banerjee S, Barrand G, et al. 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **506** 250
- [47] Galloway K F, Witulski A F, Schrimpf R D, Sternberg A L, Ball D R, Javanainen A, Reed R A, Sierawski B D, Lauenstein J M 2018 *Aerospace* **5** 67
- [48] McPherson J A, Kowal P J, Pandey G K, Chow T P, Ji W, Woodworth A A 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 474
- [49] Witulski A F, Ball D R, Galloway K F, Javanainen A, Lauenstein J M, Sternberg A L, Schrimpf R D 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1951
- [50] Lauenstein J M, Casey M, Topper A, Wilcox E, Phan A, Ikpe S, LaBel K 2015 *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC)* Boston, Massachusetts, July 13–17, 2015
- [51] Mizuta S K E, Abe H, Iwata Y, Tamura T 2013 *14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)* Oxford, UK, September 23–27, 2013

## Impact of atmospheric neutron irradiation spectrometer beam parameters on single event burnout in SiC power devices\*

MO Lihua<sup>1)2)3)</sup> HU Zhiliang<sup>1)2)3)</sup> YU Quanzhi<sup>1)4)†</sup> ZHOU Bin<sup>1)2)3)</sup>  
 LI Mengzhao<sup>1)2)</sup> ZHAO Qi<sup>1)2)</sup> SHEN Fei<sup>1)2)</sup> LIANG Tianjiao<sup>1)2)3)‡</sup>

1) (Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

2) (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

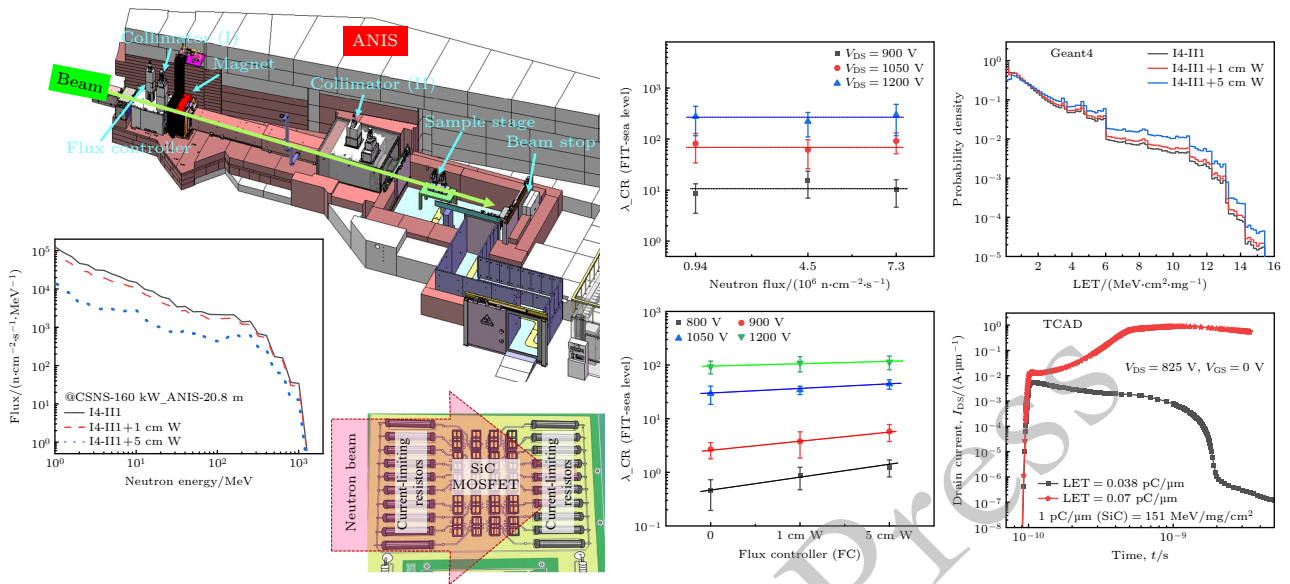
3) (Guangdong Hong Kong Macao Joint Laboratory of Neutron Scattering Science and Technology, Dongguan 523800, China)

4) (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 10 January 2026; revised manuscript received 12 March 2026 )

## Abstract

This study systematically investigates the influence of key neutron beam parameters—specifically flux and energy spectrum—from the China Spallation Neutron Source-Atmospheric Neutron Irradiation Spectrometer (CSNS-ANIS) on single event burnout (SEB) testing for silicon carbide (SiC) metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs). The experimental results reveal two critical findings: First, under a constant neutron energy spectrum, varying the incident flux (from  $8.7 \times 10^5$  to  $7.3 \times 10^6$   $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  for  $E_n > 10$  MeV) does not significantly alter the SEB failure rate, confirming the linearity assumption for flux scaling in accelerated tests. Second, and more importantly, modifying the beam spectrum via flux controller (tungsten blocks) induces significant spectral “hardening”. This hardening, characterized by an increased proportion of high-energy neutrons, leads to a measurable increase in the calculated failure-in-time (FIT) rate for the same total fluence, demonstrating a spectrum-dependent effect. To elucidate the underlying physics, a combined simulation methodology was employed. The Geant4 toolkit was used to model neutron transport and secondary ion generation within the ANIS beamline and device geometry, reproducing the measured spectral shifts. Subsequently, TCAD device simulations were performed to analyze the charge deposition and carrier transport dynamics triggered by the secondary ions, linking the varied ion linear energy transfer (LET) spectra under different beam conditions to the observed SEB cross-sections. The analysis confirms that at a high drain-to-source voltage ( $V_{DS} = 1200$  V), the SEB threshold LET is sufficiently low, making the failure rate less sensitive to spectral shape as most secondary ions exceed the threshold, explaining the convergence of FIT values under different spectra at this bias. This work not only validates the performance and flexibility of the ANIS facility for controlled radiation effects testing but also provides crucial empirical insights for future ANIS users, highlighting the necessity of reporting and accounting for the detailed beam spectrum—not just the total flux—in neutron single-event effect tests to ensure accurate and comparable reliability assessments.



**Keywords:** single event burnout, atmospheric neutron irradiation spectrometer, beam parameter, SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors

**DOI:** [10.7498/aps.75.20260044](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260044)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20260044](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260044)

\* Project supported by the Basic and Applied Basic Research Fund of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2022A1515111111, 2021B1515120043), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12505342), and the State Grid Corporation of China Science and Technology Program (Grant No. 5500-202320184A-1-1-ZN).

† Corresponding author. E-mail: [tjliang@ihep.ac.cn](mailto:tjliang@ihep.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [qzhyu@iphy.ac.cn](mailto:qzhyu@iphy.ac.cn)