辐射诱导的低增益雪崩探测器退化的质子能量依赖性

Veronika Kraus[a, b, *], Marcos Fernández García[c], Luca Menzio[a], Michael Moll[a]

[a]欧洲核子研究中心，欧洲核子研究组织，*Espl. des Particules 1*，日内瓦，*1217*，瑞士[b]维也纳工业大学，物理学院，*Wiedner Hauptstraße 8-10*，维也纳，*1040*，奥地利[c]坎塔布里亚物理研究所，*IFCA(CSIC-UC)*，*Avda. los Castros*，桑坦德，*39005*，西班牙

arXiv:2602.01800v1 [physics.ins-det] 2 Feb 2026

摘要

低增益雪崩探测器（低增益雪崩探测器）是高能物理实验中实现精确计时测量的关键组件，包括当前大型强子对撞机探测器的高亮度升级。然而，其性能受限于辐射诱导的增益层退化，而退化主要由受主去除导致。本研究系统比较了不同入射质子能量下退化过程的演变，使用来自 Hamamatsu Photonics（HPK）和巴塞罗那微电子研究所（IMB-CNM）的低增益雪崩探测器，这些探测器经 18 MeV、24 MeV、400 MeV 和 23 GeV质子辐照，注量最高达 2.5×10^{15} p/cm^2。通过电学表征提取不同质子能量下的受主移除系数；红外瞬态电流技术测量则为辐照后低增益雪崩探测器中的增益变化提供了补充信息。所有器件均呈现出低能质子导致更严重增益层退化的趋势，与预期相符。然而，400 MeV质子造成的损伤始终小于能量更低和更高的质子，这一结果出乎意料，不符合单调的能量变化趋势。将质子注量换算为 1 MeV中子等效注量后，这些差异有所减小，但并未消失，表明标准的非电离能量损失（NIEL）标度关系无法完全解释不同能量下的缺陷形成机制；在考虑包含更广粒子类型和能量谱的辐照场时，该标度关系仍需修正。

关键词：低增益雪崩探测器，质子辐照，受主去除，非电离能量损失

1. 引言

低增益雪崩探测器已成为高能物理应用及其他领域精密计时的关键技术，可为最小电离粒子实现低于 50 ps 的时间分辨率，并为 ATLAS 和 CMS 探测器升级中的高亮度大型强子对撞机计时层奠定基础。其性能依赖于p^+ 型体材料中的p型增益层，该增益层通过碰撞电离实现可控的电荷倍增。然而，增益层易受辐射损伤影响，导致受主去除（例如， [1], [2], [3]），最终造成增益损失，进而损害计时性能。因此，了解并减轻辐射诱导退化，对于确保低增益雪崩探测器在严苛辐照环境中的可运行性至关重要。

迄今为止，关于辐照后低增益雪崩探测器的研究主要集中在范围受限的粒子类型和能量上。随后通常采用非电离能量损失（NIEL）标度来量化辐射损伤，并将其作为关联不同粒子类型和能量的参考模型。然而，模拟表明，不同质子能量会产生性质迥异的缺陷结构 [4], ：低能质子主要产生点缺陷，而更高能量的质子则会形成越来越多的团簇缺陷。这表明，仅凭NIEL框架可能不足以预测宽广强子能量范围内的LGAD退化。先前研究表明 [3], ，低能强子（如质子）导致LGAD退化的速度快于注量相当的中子等粒子。这些发现促使人们在广泛的质子能量范围内系统比较LGAD退化。深入理解这些能量依赖效应，对于提升LGAD的抗辐射性能至关重要，也可能是修订NIEL标度的第一步，以确保传感器在复杂辐照场中保持可靠性能。

*通讯作者电子邮箱：veronika.kraus@cern.ch（Veronika Kraus）

2. 材料与方法

2.1. 受测器件

本研究纳入了来自两家不同制造商——滨松光子学（HPK）和巴塞罗那微电子研究所（IMB-CNM）——的多种受测器件（DUTs）。研究使用了 HPK 原型 2 晶圆 W25 和 W36 上的受测器件；这些器件与将用于 CMS端盖定时层（ETL）或 ATLAS高颗粒度定时探测器（HGTD）的器件类似。这两片晶圆的增益层略有不同，详情见 [5]。单个器件的有源面积为 1.3×1.3 mm^2 ，有源厚度为 50 µm；增益层耗尽电压 V_{gl} 为 50–60 V，W25 和 W36 的击穿电压 V_{break} 分别约为 140 V 和 200 V。

质子能量	DUTs	硬度因子 [6]	注量 [10^{14}p/cm^2]	相对误差
18 MeV	HPK W25	3.00	4, 8, 15, 25	20%
24 MeV	HPK W25 , W36	2.56	0.1, 1, 4, 8, 15, 25	10%
400 MeV	HPK W25, W36; IMB-CNM W1 , W2, W4	0.83	0.171, 2.75, 4.17, 8.94, 38.2	10%
23 GeV	HPK W25、W36; IMB-CNM W1 , W2, W4	0.62	0.139, 5.57, 10.9, 22.9, 35.8	7%

表1：质子辐照实验概况，包括质子能量、受测器件 (DUTs)、用于将注量换算为1 MeV中子等效注量的相应硬度因子、施加的质子注量以及相对注量不确定度。

s

研究还纳入了 CNM 生产批次 15973 的三片晶圆；这些晶圆在增益层的硼掺杂剂中添加了不同剂量的碳：晶圆 W1 未进行碳注入，晶圆 W2 的碳剂量为 1×10^{14} cm^{-2}，晶圆 W4 的碳剂量为 3×10^{14} cm^{-2}。碳常用于改变缺陷产生过程，从而提高增益层的辐射耐受性。CNM 器件的有源面积均为 1.3 × 1.3 mm^2，有源厚度为 50 µm；三片晶圆的 V_{gl} 均在 30–50 V 范围内，V_{break} 则在 160–220 V 之间。由于该 CNM 批次的所有样品在顶部金属化层上均没有开口，因此无法对这组器件进行激光表征。

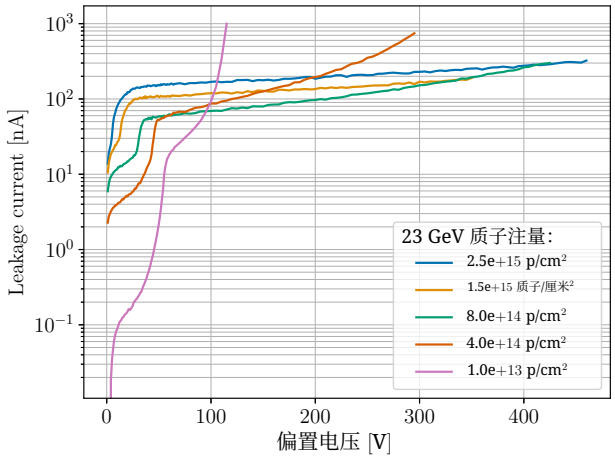


图 1：HPK W25 低增益雪崩探测器经 23 GeV 质子辐照后，在粒子注量逐渐增加时的典型 I–V 特性。漏电流急剧上升（归因于增益层耗尽）的位置随着注量增加而向较低的外加偏置电压移动，这是由于增益层退化所致。

2.2. 质子辐照

质子辐照在四个不同的装置中进行：伯尔尼大学医院进行 18 MeV质子辐照，伯明翰大学进行 24 MeV辐照，费米实验室进行 400 MeV辐照，欧洲核子研究中心 CERN PS-IRRAD装置进行 23 GeV辐照。表1列出了四轮辐照中各自包含的样品子集。向各装置申请的五种目标质子注量大致相同（在各装置技术条件允许的范围内），介于 1.0×10^{13}和 2.5×10^{15} p/cm^{2}之间。由于技术问题，18 MeV质子辐照未能达到最低目标注量；而在 24 MeV辐照中，则额外加入了一个 1.0×10^{14} p/cm^2 的注量点。实际获得的注量及其误差详见表1。利用表1中列出的硬度因子，可将质子注量换算为 1 MeV中子等效注量（n_{eq}）。四种质子能量对应的硬度因子取自模拟 [6], , 并通过实验交叉核验，评估

通过测量辐照至相同质子注量的参考二极管的漏电流增幅，以确认其一致性。

3. 电学表征

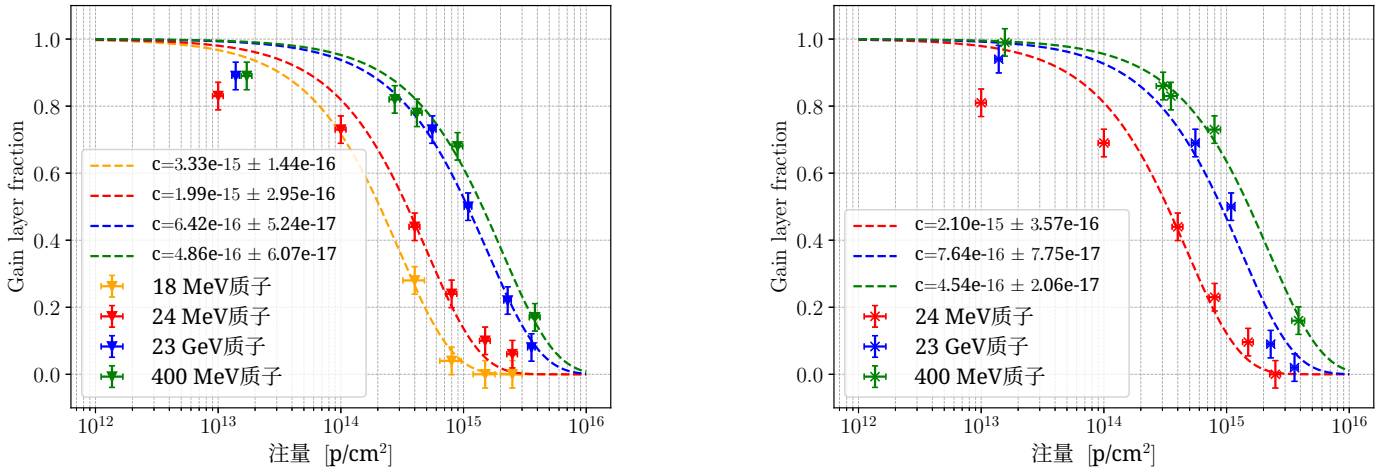
电学表征在欧洲核子研究中心的 SSD 实验室探针台上进行。使用两个微定位探针对各个样品进行接触：一个接触读出焊盘，另一个接触保护环，并将保护环置于地电位。通过卡盘从背面施加高压偏置。记录了电流-电压（I–V）和电容-电压（C–V）扫描，分别在辐照前后、相同条件下进行，唯一的区别是：在器件辐照前，卡盘设置为室温；辐照后，卡盘设置为 −20°C。辐照前的表征结果给出了不同类型器件的 V_{gl} 和 V_{break}，如第 2.1 小节所述。辐照后，对于所有质子能量和器件类型，均观察到相同的趋势：由于缺陷产生，漏电流如预期般增加；随着注量增加，V_{gl} 向更低的施加偏置电压移动，这是增益层退化的结果；而 V_{break} 向更高的偏置电压移动，这同样可归因于增益层退化，进而导致碰撞电离损失。图 1 展示了一组 23 GeV 质子辐照后、随注量增加而变化的示例性 I–V 曲线。

3.1. 受主去除系数

根据电学表征，可通过确定 I–V 曲线上增益层耗尽对应的斜率最大点来确定V_{gl} 。该值通过提取.....的最大值获得

$$k(I,V) = \frac{\Delta I}{\Delta V}\,\frac{V}{I}. \tag{1}$$

归一化至未辐照参考样品后，根据该关系拟合V_{gl} 的注量依赖性，以提取受主移除系数——



(a) HPK低增益雪崩探测器 25号晶圆

(b) HPK低增益雪崩探测器 36号晶圆

图2：两幅图展示了不同质子能量下，随着注量增加，HPK低增益雪崩探测器增益层的退化情况，以V_{gl}的降低来表示。拟合得到的受主移除系数表明，损伤对能量有很强的依赖性，其中400 MeV质子始终导致最轻微的退化。

根据该关系得出的系数

$$\frac{V_{gl}(\Phi)}{V_{gl}(0)} \approx e^{-c\,\Phi} \quad \text{or} \quad \frac{V_{gl}(\Phi_{\text{eq}})}{V_{gl}(0)} \approx e^{-c_{\text{eq}}\,\Phi_{\text{eq}}}, \tag{2}$$

具体取决于注量是以质子注量还是以中子等效注量 n_{eq}表示。受主移除系数c用于比较不同质子能量造成的增益层退化。图2展示了HPK器件、图3展示了CNM器件在注量增加时V_{gl}的变化曲线，以及不同质子能量下拟合得到的c值。图2a展示了W25器件在四种质子能量（18 MeV、24 MeV、400 MeV、23 GeV）下的受主去除情况，图2b则比较了W36在三种质子能量下的情况。图中显示，增益层退化与质子能量有关：低能质子（18–24 MeV）会导致增益层最快退化。400 MeV质子始终表现出最小的损伤，其受主移除系数也最小；与本研究所含最高能量的23 GeV质子造成的损伤相比亦是如此。经23 GeV质子辐照的HPK W25低增益雪崩探测器所得到的c值大致与先前研究的结果一致 [7]。对于CNM低增益雪崩探测器，图3a中W4在两种质子能量下的比较显示，400 MeV质子造成的增益层退化程度低于23 GeV质子，趋势相同。图3b比较了三片晶圆在相同质子能量（400 MeV）下的情况，三片晶圆的碳富集程度分别为无（W1）、中等（W2）和高（W4）。碳注入可减轻受主去除；碳剂量越高，c值越小，因此退化速度也越慢。

不同质子能量对应的质子注量可根据表1中给出的相应硬度因子 κ，按照以下关系换算为 n_{eq} 注量

$$\Phi_{\text{eq}} = \kappa \cdot \Phi. \tag{3}$$

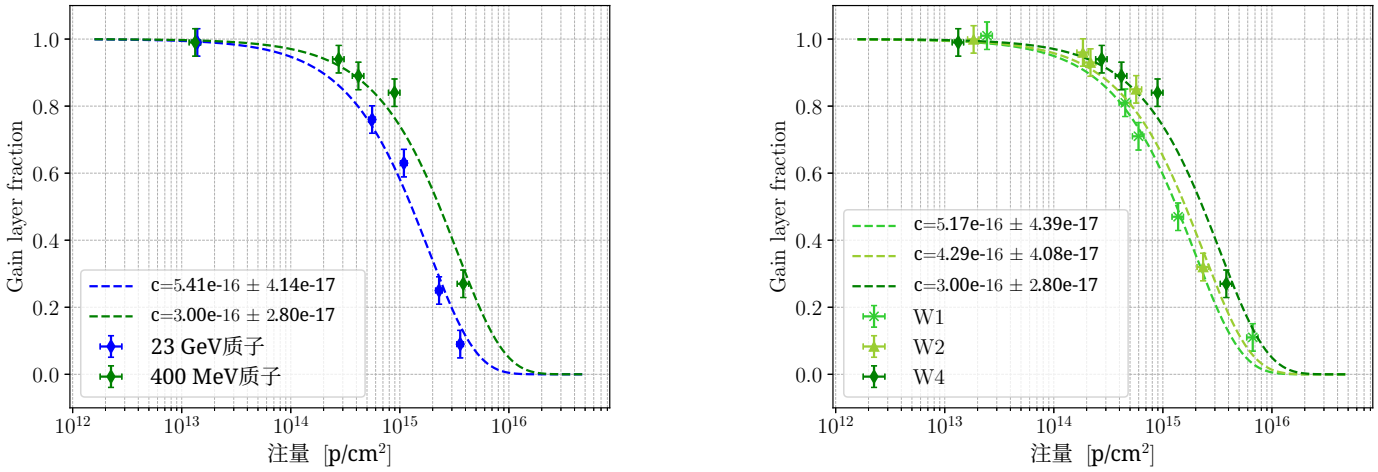
对于 HPK W25 器件，图4中不同质子能量下V_{gl} 与 n_{eq} 注量的曲线似乎比之前讨论的图2a（质子注量位于x轴上）中的曲线更加接近，且它们的相对顺序部分发生了变化。不过，拟合得到的c_{eq} 值仍有显著差异，这表明 NIEL 标度只能部分补偿不同粒子类型和能量所引发的不同损伤机制。转换注量后，400 MeV 数据仍显示出最轻微的增益层退化。

4. 激光表征

虽然 I–V 和电容-电压测量能够反映受主去除导致的增益层退化，但激光表征可提供对辐照器件电荷收集效率和俘获效应的补充灵敏度。激光表征在欧洲核子研究中心的 SSD 瞬态电流技术（TCT）装置上进行，使用波长为 $\lambda = 1064\text{nm}$、光斑尺寸为 $\approx 10\mu\text{m}$ 的红外激光器。由于 CNM 器件的顶部金属化层没有开口，因此 TCT 研究只能针对 HPK 器件进行，尤其关注 W25，因为这些器件曾接受全部四种质子能量的辐照。所有激光表征均在 −20°C 的温度下进行。本研究的激光强度设置相当于 10 个最小电离粒子（MIPs）。样品通过导电胶和引线键合安装在无源印刷电路板上，使红外激光脉冲能够从正面注入。输出信号输入 CIVIDEC 宽带放大器，随后由 KEYSIGHT MXR254A 示波器数字化。通过对记录的平均波形进行积分，可确定收集电荷（CC）。此外，将辐照后的低增益雪崩探测器的CC 与相应的全耗尽参考二极管进行比较，以计算增益，具体方法如下

$$\text{Gain}[V] = \frac{CC_{\text{LAGD}}[V]}{CC_{\text{PIN}}[V \geq V_{\text{depl}}]}. \tag{4}$$

随着粒子注量增加，增益随施加偏置电压变化的情况如图5a所示（400 MeV），而



(a) CNM 低增益雪崩探测器，晶圆4

(b) CNM 低增益雪崩探测器，晶圆1、2和4

图3：这两幅图展示了 CNM 低增益雪崩探测器中的受主去除行为，比较了不同质子能量（左图）以及同一能量下三种碳掺杂浓度不同的晶圆（右图）。结果表明，与 23 GeV 相比，400 MeV 下的损伤较轻；同时，增益层中的碳可减轻受主去除。

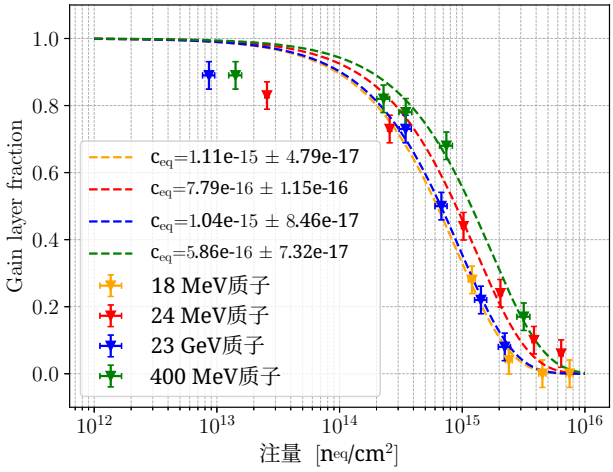


图4：HPK2 W25 低增益雪崩探测器的 V_{gl} 随 n_{eq} 注量的变化关系。经过注量换算后，受主去除行为仍然与能量有关，但相较图2a，其相对顺序发生了变化。

图5b展示了23 GeV质子辐照的结果。增益–电压曲线表明，在前两个辐照阶段，400 MeV和23 GeV质子辐照的低增益雪崩探测器表现相似；当注量为2–3 × 10^{14} n_{eq}/cm^2时，增益值均达到约10。然而，随着注量增加，23 GeV器件在超过约 5 × 10^{14} n_{eq}/cm^2后增益迅速损失。相比之下，400 MeV辐照样品的退化更为缓慢，即使注量达到约 10^{15} n_{eq}/cm^2，仍可测得增益。根据不同注量和质子能量下测得的各条增益–电压曲线，可以提取固定相对偏压（V_{gl} + 20V）下的增益并进行比较，如图6所示。这种表示方式可直接比较不同质子能量下增益随注量变化的退化情况。结果趋势表明，23 GeV和400 MeV质子导致的增益演变情况显示，在低注量下，23 GeV 样品的增益略高；而在高注量下，400 MeV 样品能维持可测增益的时间更长。相比之下，24 MeV 质子会使增益更快下降，对器件造成更严重的损伤。总体而言，这一趋势与电学表征的结果一致：低能质子对增益层的损伤更大，而 400 MeV 质子似乎处于损伤特别低的能量范围内，甚至低于最高质子能量 23 GeV 所造成的损伤。

5. 总结与展望

本研究概述了不同质子能量对LGAD退化的影响，并结合电学表征和激光表征，在较宽的注量范围内提取受主移除系数并分析增益变化。尽管这些效应十分重要，但直接比较辐照诱导的LGAD退化随质子能量变化的文献仍然有限，尽管已知其潜在损伤机制会随入射能量显著变化 [4]。尤其是低能质子，凸显了常用NIEL标度的局限性；例如，它无法区分硅中点缺陷与簇缺陷的形成。

特别是，针对多种类型的HPK和CNM低增益雪崩探测器，从 V_{gl} 随注量的演化中提取了四种质子能量（18 MeV、24 MeV、400 MeV和23 GeV）下的受主移除系数c，从而能够定量比较由受主去除引起的增益层退化。对辐照后的HPK W25低增益雪崩探测器进行了激光表征，其增益通过将其收集电荷与参考二极管的收集电荷进行比较来确定。两种表征方法均表明，低能质子（18–24 MeV）造成的损伤最大，23 GeV质子表现出中等程度的退化，而400 MeV

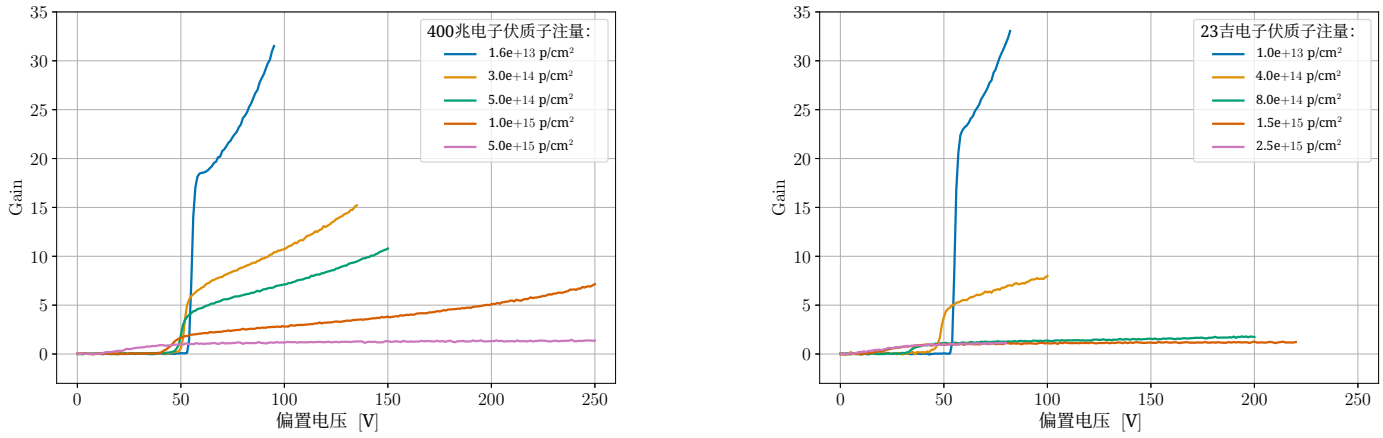


图5：经 400 MeV 和 23 GeV质子辐照的 HPK W25 LGAD 的增益测量结果显示，在较低注量下表现相似。400 MeV 器件在注量达到约 10^{15} n_{eq} 时仍保有可测量的增益，而经 23 GeV 质子辐照的器件在较高注量下则出现更快的增益损失。

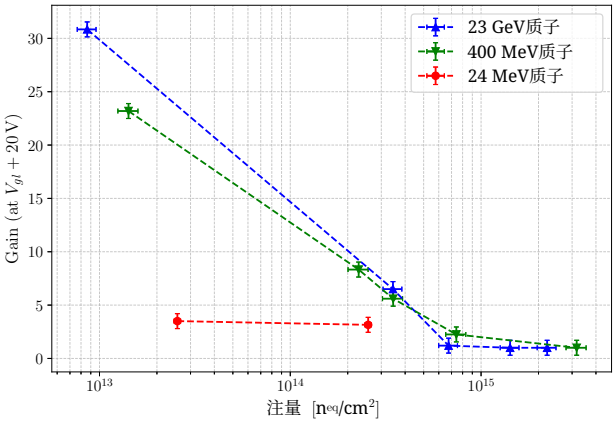


图6：在固定相对偏压（V_{gl}+20 V）下，HPK W52 低增益雪崩探测器的增益随 n_{eq} 注量的变化，对比了 24 MeV、400 MeV 和 23 GeV质子辐照的情况。数据表明，增益退化强烈依赖于能量：低能质子导致的增益损失最快，而在高注量下，400 MeV质子导致的退化最慢。

质子始终表现为损伤最小，这种非单调行为尚未得到充分理解。这一出乎意料的趋势对潜在的缺陷形成机制提出了疑问，表明需要进一步开展模拟和建模，以解释超出标准NIEL标度的能量依赖性。

除本文所述测量外，还计划开展更详细的研究：对于 CNM 样品，将进行放射源测量，以补充对顶部金属化层未开口器件的电学表征。此外，还将对所有器件开展专门的定时研究，以评估定时分辨率如何随质子能量和注量变化。

致谢

本研究获得了欧盟“地平线欧洲”研究与创新计划的支持，资助依据为资助协议编号 101057511（EURO-LABS）。

参考文献

[1] M. Moll，受主去除——涉及p型硅器件浅受主掺杂的位移损伤效应，PoS(Vertex2019) 373 (2020) 027, https://doi.org/10.22323/1.373.0027。

[2] A. Himmerlich 等，辐照硼掺杂硅平面二极管和低增益雪崩探测器的缺陷表征研究，Nucl. Instrum.Meth.A 1048 (2023) 167977，https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167977。

[3]G. Kramberger 等，强子辐照后低增益雪崩探测器中的辐射效应，JINST 10 (2015) P07006, https://doi.org/10.1088/1748- 0221/10/07/P07006。

[4]M. Huhtinen，硅中非电离能量损失与缺陷形成的模拟，Nucl.Instrum. Meth. A 491 (2002) 194–215, https://doi.org/10.1016/S0168- 9002(02)01227-5。

[5]E. Currás Rivera 和 M. Moll，《使用低增益雪崩二极管研究硅中的碰撞电离系数》，IEEE《电子器件汇刊》70（2023）2919–2926，https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10114953。

[6] G.P. Summers 等，IEEE《核科学汇刊》40（1993）1372；M. Huhtinen 和 P.A. Aarnio，《核仪器与方法》A 335（1993）580；数据汇编于 RD50质子非电离能量损失综述，https://rd50.web.cern.ch/niel/protons.pdf。

[7]E. Currás Rivera 等，《中子和质子辐照后低增益雪崩二极管增益层退化研究》，JINST 18，P10020（2023），https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/10/P10020。