

# 通过范德帕乌测试结构优化补偿型 LGAD

A. Fondacci<sup>a,b,\*</sup>, T. Croci<sup>b</sup>, D. Passeri<sup>c,b</sup>, R. Arcidiacono<sup>d,e</sup>, N. Cartiglia<sup>e</sup>, M. Ferrero<sup>e</sup>, M. Centis Vignali<sup>f</sup>, M. Boscardin<sup>f</sup>, G. Paternoster<sup>f</sup>, R. S. White<sup>e</sup>, A. R. Altamura<sup>e</sup>, V. Sola<sup>g,e</sup>, A. Morozzi<sup>b</sup>, F. Moscatelli<sup>h,b</sup>

<sup>a</sup>Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, Via Alessandro Pascoli, 06123, Perugia, Italy

<sup>b</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) - Sezione di Perugia, Via Alessandro Pascoli, 06123, Perugia, Italy

<sup>c</sup>Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via Goffredo Duranti, 93, 06125, Perugia, Italy

<sup>d</sup>Dipartimento di Scienze del Farmaco, Università del Piemonte Orientale, Largo Donegani, 2, 28100, Novara, Italy

<sup>e</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) - Sezione di Torino, Via Pietro Giuria, 1, 10125, Torino, Italy

<sup>f</sup>Fondazione Bruno Kessler (FBK), Via Sommarive, 18, 38123, Trento, Italy

<sup>g</sup>Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Torino, Via Pietro Giuria, 1, 10125, Torino, Italy

<sup>h</sup>Istituto Officina dei Materiali (IOM) CNR - Sede di Perugia, Via Alessandro Pascoli, 06123, Perugia, Italy

## Abstract

一种新的增益植入设计最近被引入，以增强低增益雪崩二极管 (LGADs) 在类似 FCC-hh 的未来强子对撞机中预期的极端通量下的辐射抗性。该设计利用了两种相反类型掺杂植入物的工程补偿，需要对其因辐照而演变的过程进行彻底分析。为此，初始测试结构的实验测量结果已在辐照前后与技术 CAD 模拟进行了比较。

从测量-模拟比较关于 C-V 特性来看，已经研究了在高初始施主浓度 ( $> 10^{16} \text{at}/\text{cm}^3$ ) 下补偿型 LGAD 中的施主去除情况，以及共植入施主如何影响碳减缓受主去除的有益效果。此外，还实施了一种创新应用，即使用范德堡测试结构，这种结构通常由晶圆厂用来监控工艺质量。通过这些结构观察辐照引起的薄层电阻变化，已经估计了补偿型 LGAD 中单植入物的掺杂去除情况。

**Keywords:** 硅传感器，4D 跟踪，辐射硬度，补偿 LGAD，TCAD 仿真。

## 1. 介绍

未来的强子对撞机，如 FCC-hh，将拥有越来越拥挤的环境，时间将成为事件分析中必须添加的关键参数 [1]。几十皮秒的时间分辨率将能够分离出时间上的轨道 (4D 追踪)，从而导致每个事件中的轨迹减少，因此分析将更加简单。

低增益雪崩二极管 (LGADs) [2] 可以通过内部信号放大提供必要的时间分辨率 [3]。然而，它们的抗辐射能力对于未来的强子对撞机来说是不足的。增益注入，对于信号倍增至关重要，在辐照下会通过受主去除机制 [4] 失效 (图 1 左)，从而降低 LGAD 的时间分辨率。迄今为止，大多数辐射耐受的 LGAD 可以承受高达  $2.5 \cdot 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$  [5] 的辐射剂量，而 FCC-hh 最内层区域预计的通量将超过  $10^{17} n_{eq}/\text{cm}^2$ 。

一种新的增益植入设计 [6]，通过补偿两种相反类型的掺杂剂 (图 1 右侧) 而实现，最近被引入以增强

LGAD 对极端通量的辐射抗性。这两种植入物在辐照下都将经历掺杂去除；如果设计得当，它们之间的差异将保持相对恒定，有可能将补偿型 LGAD 的寿命延长至超过  $10^{17} n_{eq}/\text{cm}^2$ 。

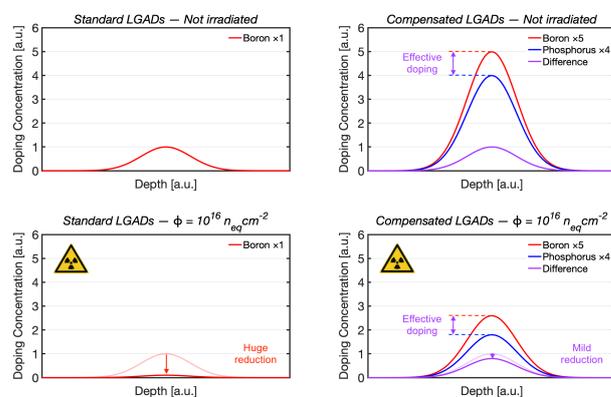


图 1: 通过标准 (左) 和补偿 (右) LGAD 的辐照获得植入物进化。顶部线条指的是未辐照的设备，底部线条指的是在  $10^{16} n_{eq}/\text{cm}^2$  下辐照的样本。

\*Corresponding author

Email address: [alessandro.fondacci@pg.infn.it](mailto:alessandro.fondacci@pg.infn.it) (A. Fondacci)

Wafer No	p <sup>+</sup> dose	n <sup>+</sup> dose	C dose
5	1		1
6	2a	1	
7	2b	1	
8	2b	1	
9	2c	1	
10	3a	2	
11	3b	2	
12	3b	2	
13	3b	2	1
14	3c	2	
15	5a	4	

表 1: 第一批次由 FBK 于 2022 年末制造的补偿型 LGAD 的拆分表格。对于剂量编码, 使用 <b<c 和 2c<3a。此外, W5 是一个作为参考的标准 LGAD。

## 2. 首次生产补偿 LGADs

首批补偿型 LGAD 由 Fondazione Bruno Kessler (FBK) 于 2022 年末在厚度为 30  $\mu\text{m}$  的高电阻活性基板上制造 [7]。对于增益注入, 已经研究了不同剂量的硼 (p<sup>+</sup>) 和磷 (n<sup>+</sup>) 的组合, 如拆分表所示 1。此外, 在一块晶圆上共同植入了碳, 以研究其在减缓受体去除方面的作用, 特别是在同一体积内存在磷原子的情况下。

样品在辐照前和辐照后<sup>1</sup>进行了广泛的电气和瞬态测量 [7]。从 I-V 特性曲线<sup>2</sup>可以看出, 由于内部倍增效应, 电流随偏置增加的现象一直保持到最高通量, 这意味着其辐射抗性比标准 LGAD 更高。此外, 对在  $2.5 \cdot 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  下辐照的样品测量得到的时间分辨率约为 40 皮秒, 表明补偿型 LGAD 可以达到与标准 LGAD 相似的时间性能。

## 3. TCAD 调查

比较实验测量与 TCAD 模拟可以为设计下一组优化的补偿型 LGAD 提供额外的见解。详细来说, 可以在高初始受主浓度 ( $> 10^{16} \text{ at}/\text{cm}^3$ ) 下评估受主去除率,

<sup>1</sup>传感器辐照在 JSI TRIGA Mark II 中子反应堆中进行, 剂量率范围为  $[4 \cdot 10^{14}, 5 \cdot 10^{15}] \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 。

<sup>2</sup>辐照前的 I-V 测量在 +20  $^{\circ}\text{C}$  下进行, 而辐照后的特性分析则在 -20  $^{\circ}\text{C}$  下进行。

研究受主和施主去除之间的相互作用, 并且最后, 可以评估施主掺杂对碳减缓施主去除有益效果的影响。

为此, 使用了最先进的 Synopsys<sup>®</sup>Sentaurus TCAD 套件, 并通过使用佩鲁贾辐射损伤模型的最新版本 [8] 考虑了辐射损伤。在后者中, 受体和供体的去除根据以下方程进行参数化 [9]:

$$N_{A,D}(\phi) = N_{A,D}(0) \cdot e^{-c_{A,D} \cdot \phi} \quad (1)$$

其中  $c_{A,D}$  是取决于初始受体 (供体) 浓度  $N_{A,D}(0)$  的受体 (供体) 去除系数, 而  $\phi$  是在  $\text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  中的照射通量。 $c_A$  的值在广泛范围的  $N_A(0)$  基于标准 LGADs [10] 研究中是已知的, 而关于  $c_D$  值的文献仅限于  $N_D(0)$  到  $10^{14} \text{ at}/\text{cm}^3$  [11]。

### 3.1. C-V 特性

由于 C-V 特性众所周知携带与掺杂剖面相关的信息, 它们已被选为开始比较测量和仿真。具体来说, 它从晶片 12 (W12) 的 C-Vs 开始, 遵循在 [12] 中报告的方法, 并简要总结如下:

1. 使用 C-V 测量对 p-i-n 二极管在 TCAD 环境中的衬底厚度和掺杂浓度进行校准;  
将补偿增益植入 SIMS 的高斯拟合纳入模拟器件中, 以创建补偿型 LGAD, 然后在辐照前验证 C-V 测量与模拟结果之间的一致性。
- 2.
3. 从受体去除参数化中选择合适的  $c_A$  用于给定的  $N_{A_{\text{peak}}}(0)$ <sup>3</sup> [10] 并调整  $c_D$ , 直到 C-V 测量和模拟在辐照后一致。

使模拟与测量结果一致的去除系数是  $c_D = 6.50 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$  和  $c_A = 2.50 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$  [12], 以及  $c_D \sim 2 \cdot c_A$ , 假设它们依赖于相同的初始掺杂密度, 并考虑到植入的硼和磷的 3-2 初始浓度。

移动到 W13, 它类似于 W12, 但具有碳共注入, 在之前提取的  $c_D$  和  $c_A = 8.26 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$  的情况下, 测量值和模拟值之间获得了良好的一致性 (图 2)。后者是先前  $c_A$  的三分之一, 证实了实验观察 [7], 即碳以与标准 LGADs [10] 相同的方式减缓受体去除, 即使在增益注入区域存在磷的情况下也是如此。

<sup>3</sup>C-V 特性对峰值活性增益注入浓度的变化非常敏感 [13]。因此使用峰值的  $c_A$  ( $c_D$ ) 来缩小整个硼 (磷) 分布。

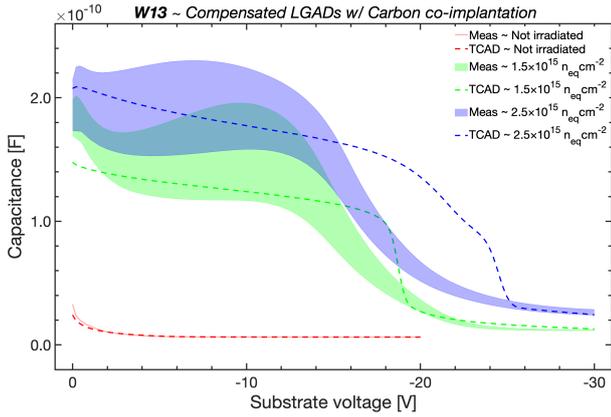


图 2: 辐照前后的 W13 C-V 测量与模拟。每条带是由在相同条件下测量同一晶圆的不同样品得到的曲线簇所覆盖的平面区域。

### 3.2. 表电阻率

一种通过观察辐照引起的薄层电阻变化来研究去掺杂的新方法已被探索。因此，范德普劳结构 [14] 的测量和模拟结果已经进行了比较。这些四端结构通常被晶圆厂用来监控工艺质量，允许通过在两个终端之间施加已知电流并在另外两个终端探测试电压降来测量给定掺杂层的薄层电阻。

范德普劳测试结构可以在一个 3D 仿真域中复制，并且可以通过遵循测量程序来计算薄层电阻。因此，通过调整 TCAD 环境中的掺杂轮廓直到其再现实验条件下随注量变化的薄层电阻变化，可以确定辐照引起的掺杂变化。为了完整性，在批次中包含了用于补偿型 LGADs 每种掺杂注入的范德普劳测试结构（图 3）。

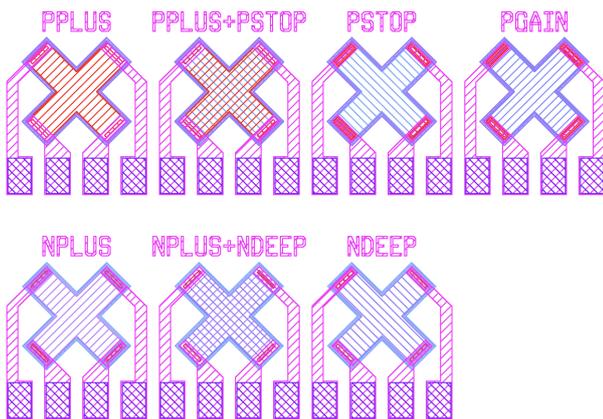


图 3: 2022 年末 FBK 发布的首批补偿型 LGAD 中包含的 van der Pauw 测试结构布局。

从 NPLUS 植入物<sup>4</sup>开始，图 4 展示了使薄膜电阻

<sup>4</sup>FBK 用于制造 LGAD 收集电极的掺杂注入。

随辐照变化的轮廓演变（见图 5）。黑色曲线代表未辐照的情况，并描绘了基于 SIMS 校准的 NPLUS 工艺模拟，该模拟被植入 p 型高阻衬底中。图 5 中的黑圈和菱形重叠验证了所有植入的 NPLUS 原子都是电活性的。

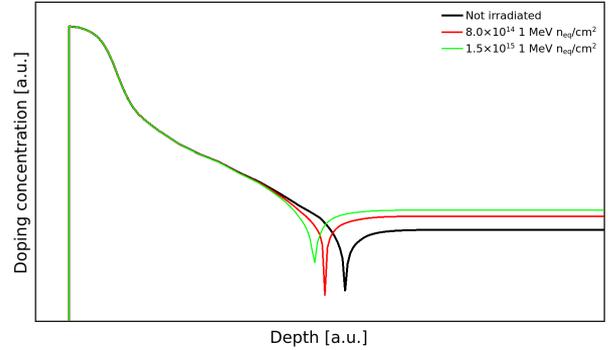


图 4: NPLUS 掺杂分布随辐照的变化。衬底掺杂根据受主创建参数化相应增加。

图 4 中的两个辐照后轮廓是通过增加衬底掺杂浓度基于受主生成参数化 [10] 得到的，从而减少了 NPLUS 尾部。这再现了辐照下的方块电阻变化（图 5），证明 NPLUS 注入不受供体去除的影响，并确认嵌入佩鲁贾辐射损伤模型中的受主生成参数化的质量。

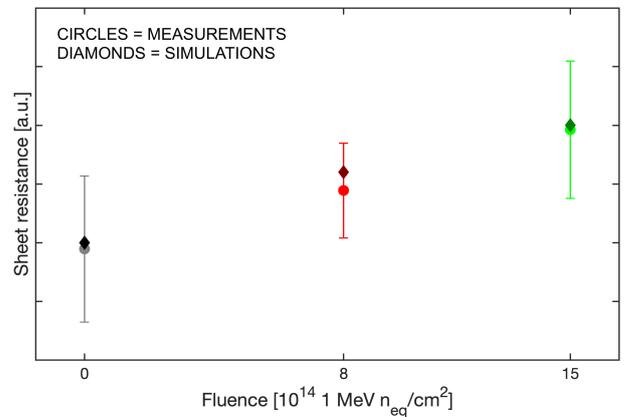


图 5: 辐照前后的薄片电阻测量及 N 型掺杂植入模拟。误差棒代表平均值的很小一部分，它们的扩展是由于放大的比例尺造成的。

考虑在 p 型衬底上进行 p 型掺杂，例如 W5 中的 PGAIN，衬底通过寄生效应贡献于所测量的膜电阻率，因为研究层和衬底之间没有被耗尽区隔开。然而，模拟可以重现这种寄生效应；因此，即使在这种情况下，通过比较测量值和模拟结果也可以获得有价值的信息。

图 6 展示了 W5 的 PGAIN 轮廓随辐照的变化，这使得实验样品电阻率的变化得以再现（图 7）。黑色曲线说明了一个使用 SIMS 校准的过程模拟，而辐照后的曲

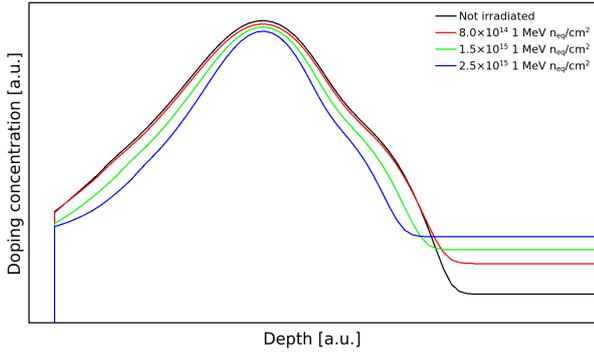


图 6: W5 PGAIN 掺杂分布随辐照的变化。衬底掺杂量增加遵循受主生成参数化, 而增益注入掺杂则根据受主去除参数化相应减少。

线则是通过将受主去除 (增益注入) 和生成 (基底) 参数化应用到前者得到的。特别地, 为了重现实验数据, 在受主去除参数化中必须为每个增益注入点使用适当的  $c_A$ , 而不是对所有的都使用峰值的  $c_A$ , 这导致了更大的尾部扩展。这表明样品电阻率的测量对于活性增益注入浓度积分的变化更为敏感, 同时也考虑到了轮廓尾部的减少, 而不仅仅是像 C-V 特性那样的峰浓度变化。

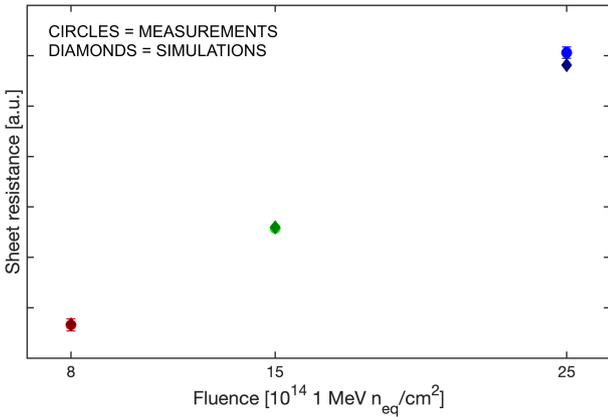


图 7: 预辐照和后辐照薄片电阻测量及 W5 PGAIN 注入的模拟。

#### 4. 结论

由 FBK 于 2022 年建造的第一个补偿型 LGAD 原型的特性, 这些原型利用了两种相反类型掺杂剂的补偿来实现增益植入, 展示了它们在将时间测量扩展到未来强子对撞机如 FCC-hh 中预期的极端通量 ( $> 10^{17} n_{eq}/cm^2$ ) 方面的潜力。

此外, 通过比较辐照前后的实验数据与 TCAD 仿真结果, 研究了由辐照导致的掺杂去除现象, 为未来的补偿型 LGAD 批次提供了见解。佩鲁贾辐射损伤模型在 TCAD 环境中被应用以准确评估辐照效应。

具体而言, C-V 特性测量与模拟对比促进了对高初始受主浓度 ( $> 10^{16} at/cm^3$ ) 下补偿 LGAD 中受主去除的研究, 估计受主去除率约为受主去除的两倍, 假设两种机制具有相同的功能形式。还确认了在补偿增益注入中的受主掺杂不会影响碳共注入减缓受主去除的效益。

最后, 首次对辐照前后的范德普测试结构的测量和模拟结果进行了比较, 以验证片电阻变化作为评估掺杂去除的方法。该方法可以独立估计补偿型 LGADs 中使用的每种掺杂注入的变化, 利用每个掺杂对应的专用范德普测试结构。例如, NPLUS 注入测试结构的分析表明, 由于其初始磷浓度较高, 对供体去除不敏感。鉴于其潜力, 该方法将应用于目前在 FBK 生产的新型 n 型 LGAD 批次。

#### 利益冲突声明

作者声明他们没有已知的可能影响本论文所报道工作的竞争经济利益或个人关系。

#### 致谢

该项目已从欧盟的地平线 2020 研究与创新计划中获得资助, 项目编号为 101004761 (AIDAInnova) 和 101057511 (EURO-LABS), 以及意大利教育、大学和科研部的 PRIN 项目 2022RK39RF ‘ComonSens’ 和欧盟 (ERC, CompleX, 101124288)。文中表达的观点和意见仅代表作者个人, 并不一定反映欧盟或欧洲研究委员会的意见。欧盟或资助机构对这些内容不承担责任。

#### References

- [1] ECFA Detector R&D Roadmap Process Group, The 2021 ECFA detector research and development roadmap, Tech. rep., Geneva (2020). doi: 10.17181/CERN.XDPL.W2EX.
- [2] G. Pellegrini, et al., Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for high energy physics applications, Nucl. Instrum. Meth. A 765 (2014) 12–16. doi:10.1016/j.nima.2014.06.008.
- [3] N. Cartiglia, et al., Beam test results of a 16ps timing system based on ultra-fast silicon detectors,

- Nucl. Instrum. Meth. A 850 (2017) 83–88. doi:10.1016/j.nima.2017.01.021.
- [4] G. Kramberger, et al., Radiation effects in Low Gain Avalanche Detectors after hadron irradiations, JINST 10. doi:10.1088/1748-0221/10/07/P07006.
- [5] R. S. White, et al., Characterisation of the FBK EXFLU1 thin sensors with gain in a high fluence environment, Nucl. Instrum. Meth. A 1068 (2024) 169798. doi:10.1016/j.nima.2024.169798.
- [6] V. Sola, et al., A compensated design of the LGAD gain layer, Nucl. Instrum. Meth. A 1040 (2022) 167232. doi:10.1016/j.nima.2022.167232.
- [7] V. Sola, et al., The first batch of compensated LGAD sensors, Nucl. Instrum. Meth. A 1064 (2024) 169453. doi:10.1016/j.nima.2024.169453.
- [8] A. Morozzi, et al., TCAD simulations for radiation-tolerant silicon sensors, PoS VERTEX2023 (2024) 060. doi:10.22323/1.448.0060.
- [9] M. Moll, et al., Investigation on the improved radiation hardness of silicon detectors with high oxygen concentration, Nucl. Instrum. Meth. A 439 (2000) 282–292. doi:10.1016/S0168-9002(99)00842-6.
- [10] M. Ferrero, et al., Radiation resistant LGAD design, Nucl. Instrum. Meth. A 919 (2019) 16–26. doi:10.1016/j.nima.2018.11.121.
- [11] R. Wunstorf, et al., Investigations of donor and acceptor removal and long term annealing in silicon with different boron/phosphorus ratios, Nucl. Instrum. Meth. A 377 (1996) 228–233. doi:10.1016/0168-9002(96)00217-3.
- [12] A. Fondacci, et al., Tcad investigation of Compensated LGAD Sensors for extreme fluence, Nucl. Instrum. Meth. A 1068 (2024) 169811. doi:10.1016/j.nima.2024.169811.
- [13] T. Croci, et al., TCAD simulations of non-irradiated and irradiated low-gain avalanche diodes and comparison with measurements, JINST 17 (2022) C01022. doi:10.1088/1748-0221/17/01/C01022.
- [14] L. J. van der Pauw, A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape, pp. 174–182. doi:10.1142/9789814503464\_0017.