基于电阻分流的直流耦合一维位置灵敏LGAD的研制

张鑫淦, 刘宇霄, 邵洋,
严永强, 杨茹, 梁琨， 韩德俊*

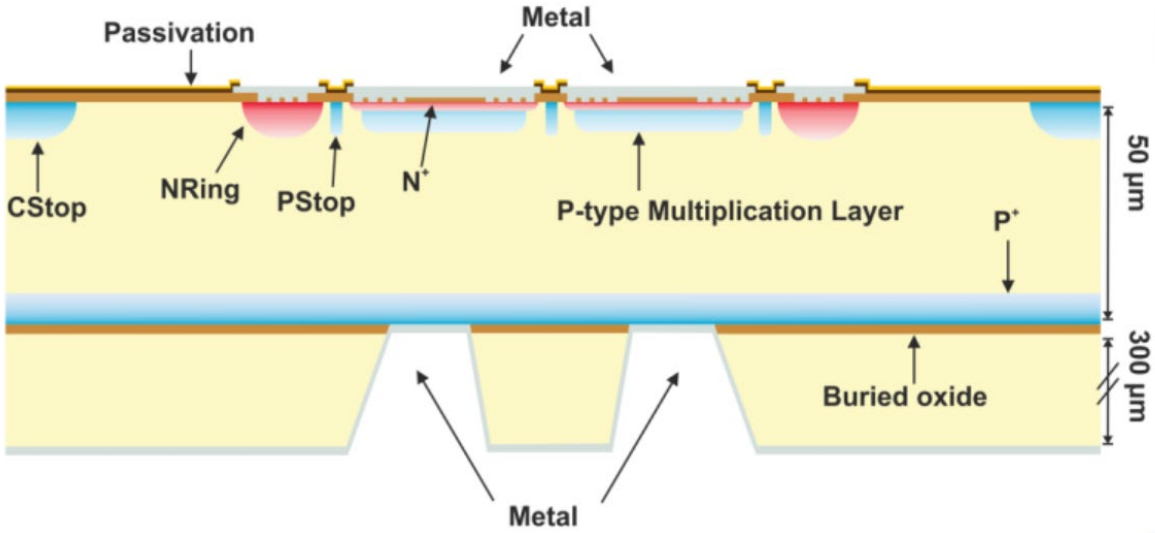
北京师范大学核科学与技术学院

目录

- 研究背景
- 实验细节
- 结果与分析
- 结论与展望

研究背景

低增益雪崩探测器已经被证明具备高时间分辨率以及抗辐射性能，将被应用于**ATLAS HGTD 和 CMS MTD**，未来也将作为**4D** 追踪器使用。

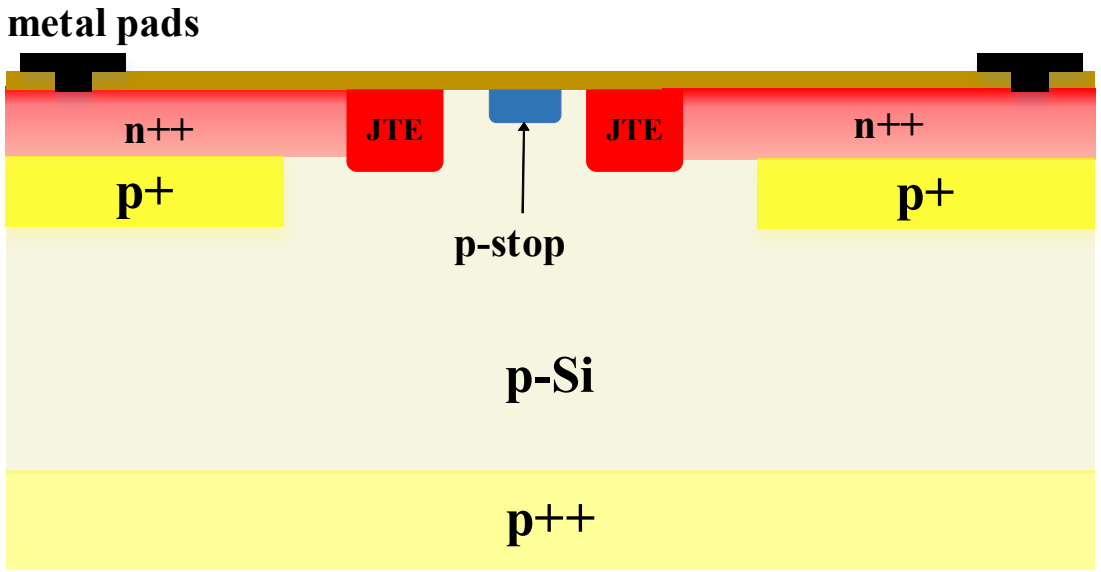


$$PR = \frac{pixel\ size}{\sqrt{12}}$$

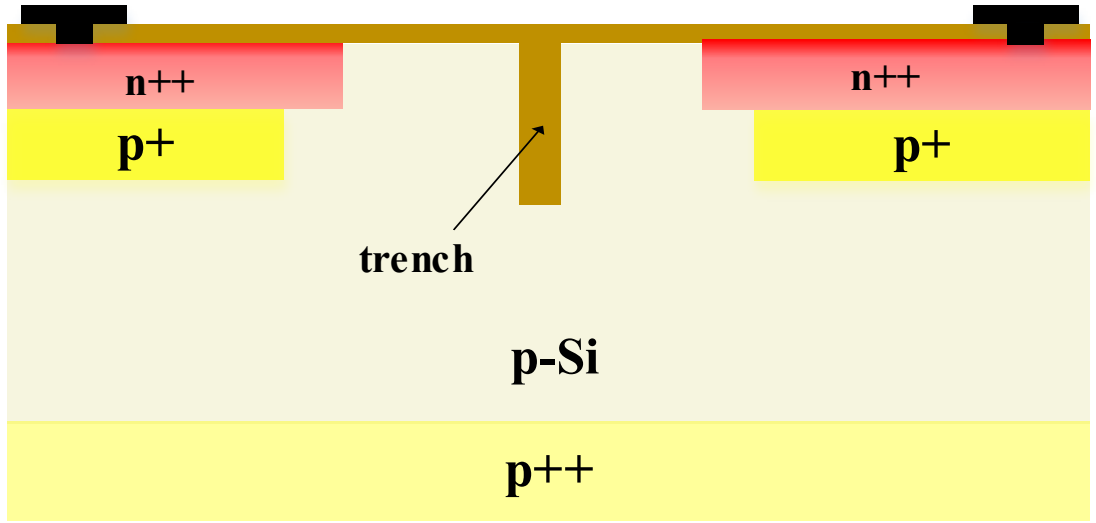
但是，常规**LGAD**微单元尺寸（**~mm**）限制了位置分辨率的大小

研究背景-分立型

根据增益层划分形式，可以分为分立型和连续性位置灵敏探测器



Pixel array LGAD



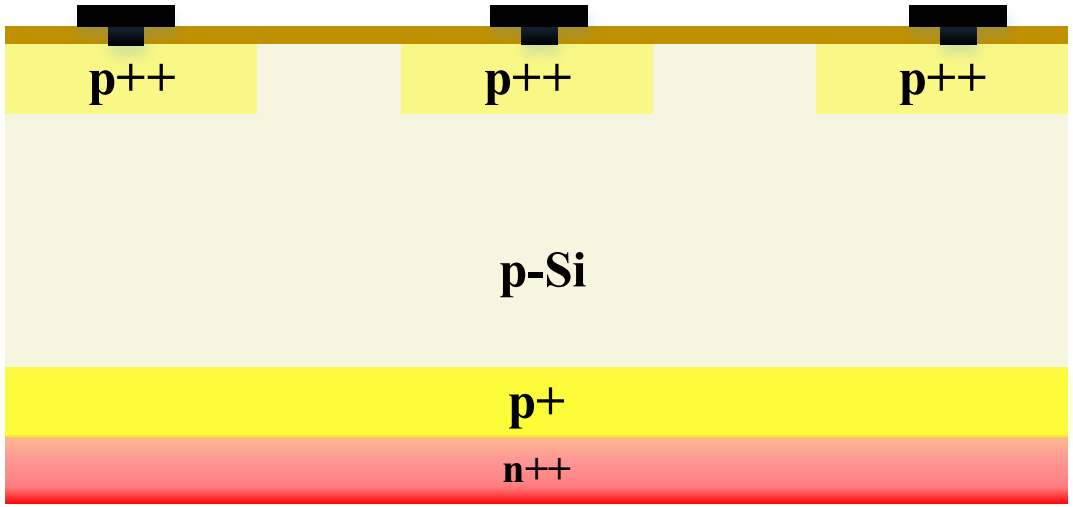
Trench isolation LGAD[1]

边缘结构（**JTE,P-stop,**场板等）会引入“死区”，会导致低填充因子（**<50%**）

由**FBK**研制，采用深槽隔离技术分隔微单元，可以将死区减少至**6μm**，填充因子大于**75%**

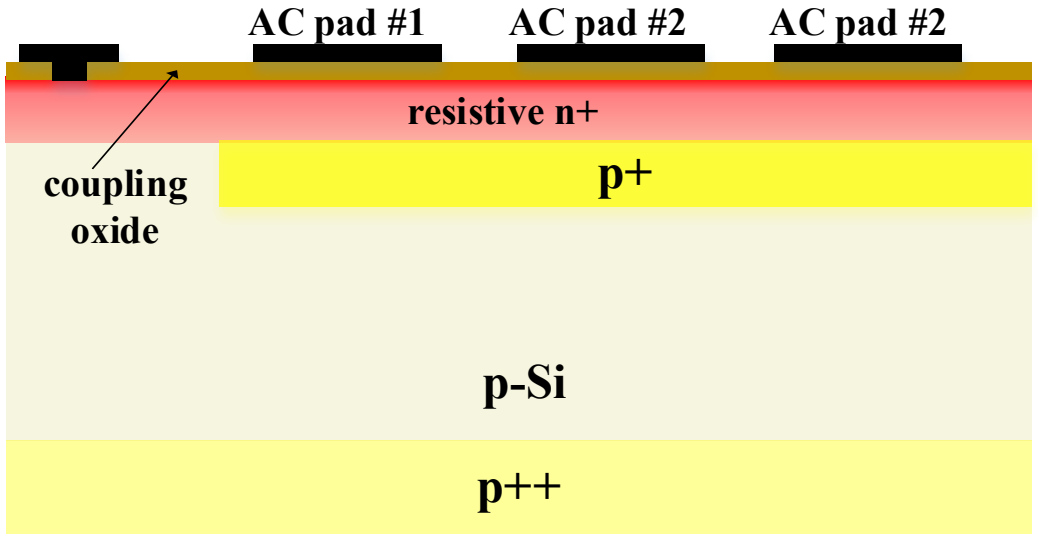
[1]G. Paternoster, et al., "Trench-Isolated Low Gain Avalanche Diodes (TI-LGADs)," *IEEE Electr. Device L.*, vol. 41, no. 6, pp. 884-887, 2020, doi: 10.1109/LED.2020.2991351.

研究背景-连续型



Inverse LGAD[2]

由CNM研制，将填充因子提高到100%，但是需要采用双面光刻技术在器件背面引出分立电极，需要较厚的衬底（~ 275 μm），影响时间分辨



AC LGAD[3]

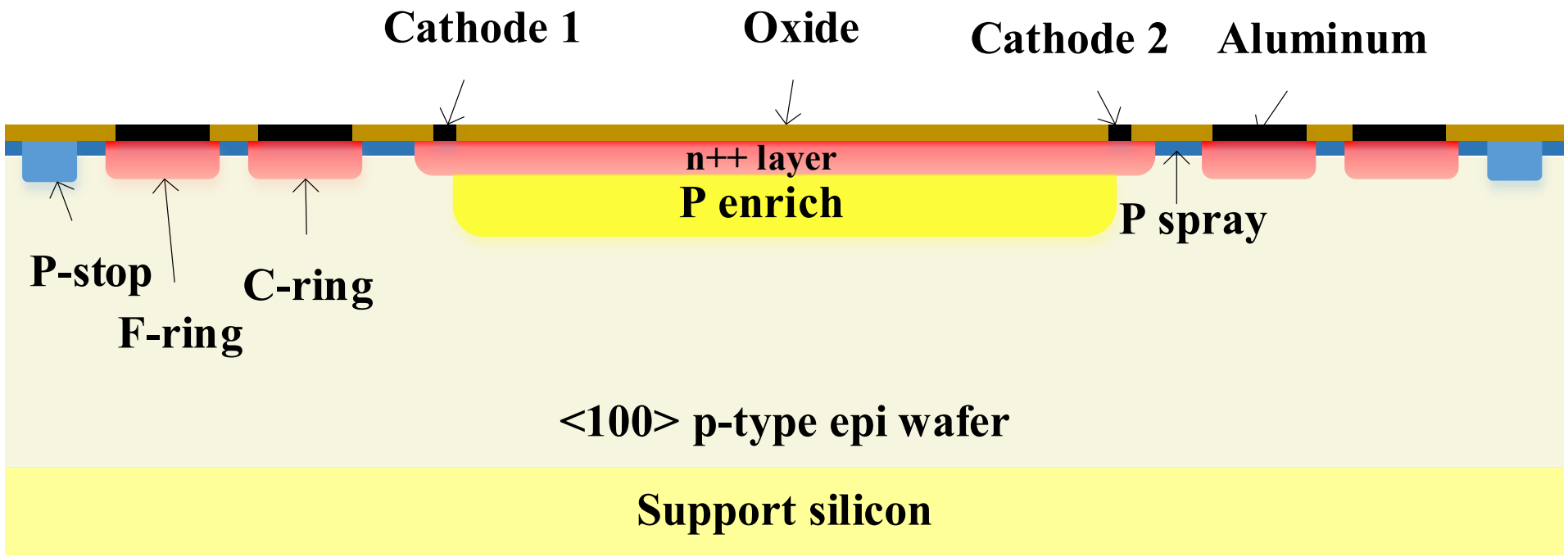
目前FBK、CNM、BNL、IHEP等，该方案具备100%填充因子、优秀的位置分辨率以及面积的可扩展性。

但是也存在一些限制因素，如AC耦合导致的双极型信号；最大计数率偏小；收集到信号的AC电极数目受入射粒子位置影响等问题

[2] E. Currás, et al., "Inverse Low Gain Avalanche Detectors (iLGADs) for precise tracking and timing applications," *NIMA*, vol. 958, pp. 162545, 2020, doi: 10.1016/j.nima.2019.162545.

[3] M. Tornago, et al., "Resistive AC-Coupled Silicon Detectors: Principles of operation and first results from a combined analysis of beam test and laser data," *NIMA.*, vol. 1003, pp. 165319, 2021, doi: 10.1016/j.nima.2021.165319.

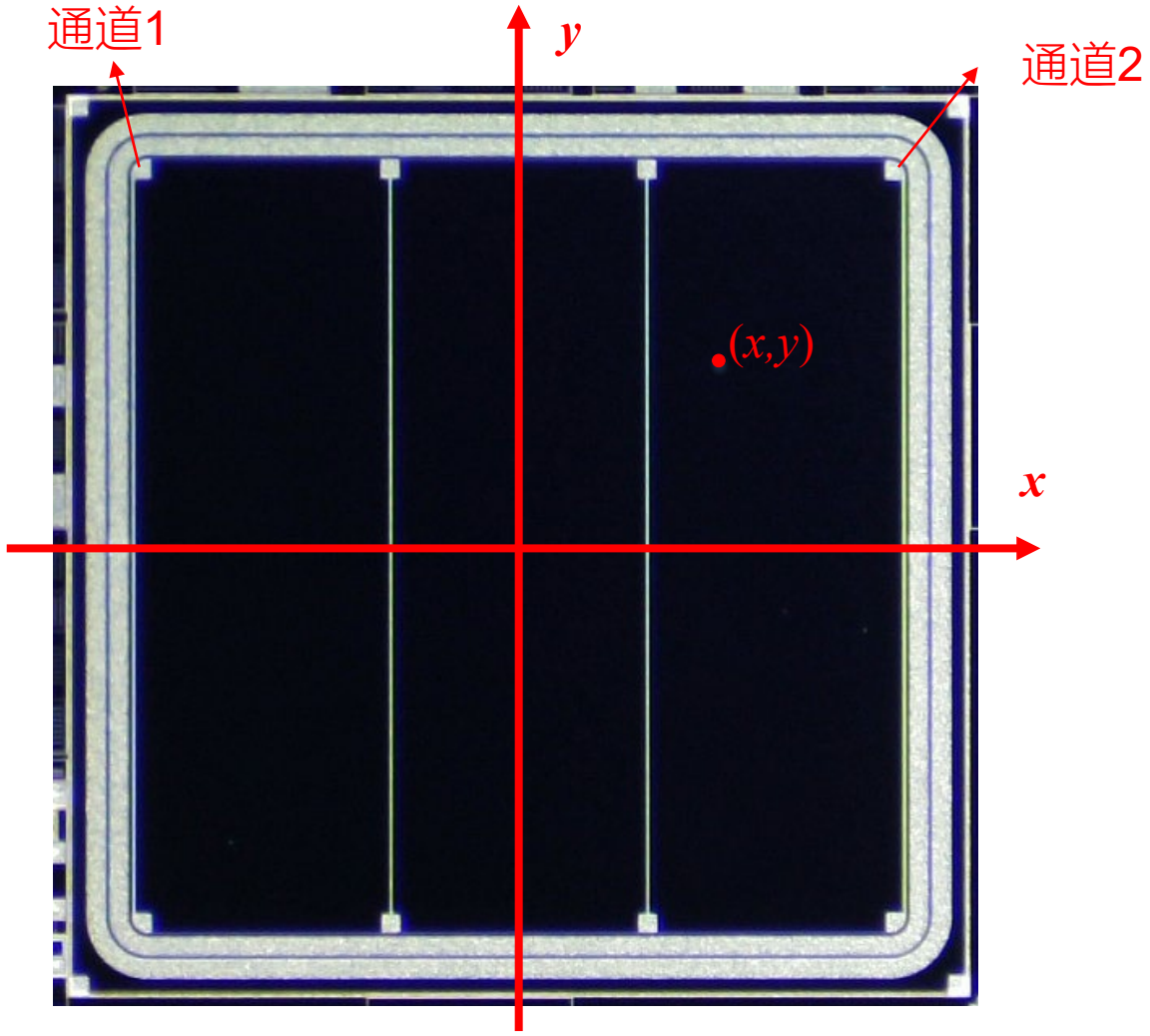
实验细节 - 器件结构及原理



电阻分流的1D PS LGAD与传统LGAD具有相同的工艺条件，具备100%填充因子，高收集效率，高计数率以及优秀的时间和位置分辨率

X. Zhang *et al*., "One-dimensional Position-Sensitive LGAD with a DC Coupled and Resistive Charge Division Mechanism," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, doi: 10.1109/TNS.2023.3264661.

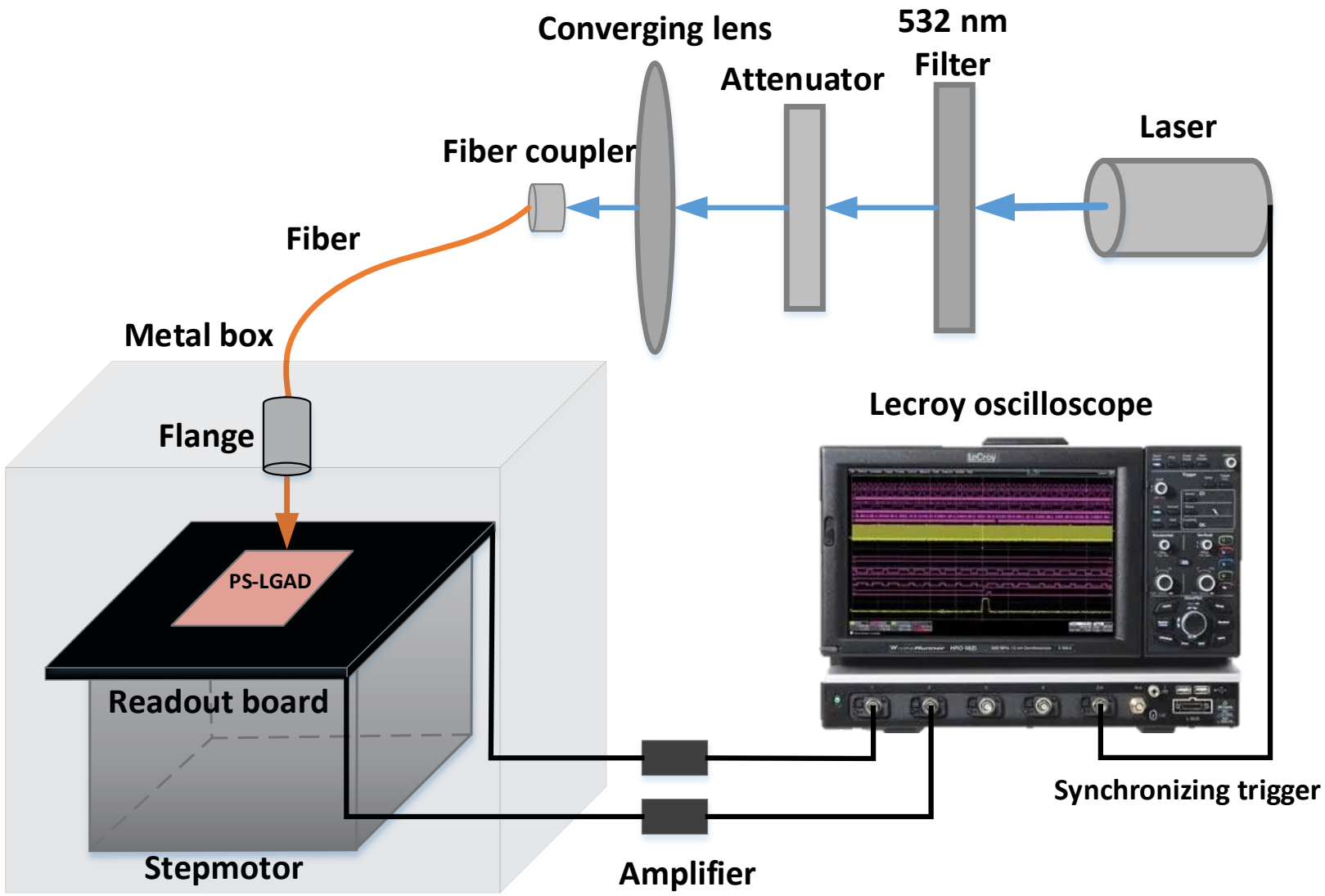
实验细节-器件结构及原理



$$x = k \cdot L \cdot \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$$

k是拟合参数，大约等于2；L是器件的尺寸(2700 μm),A_1和A_2是两个输出通道的信号幅值或收集电荷量

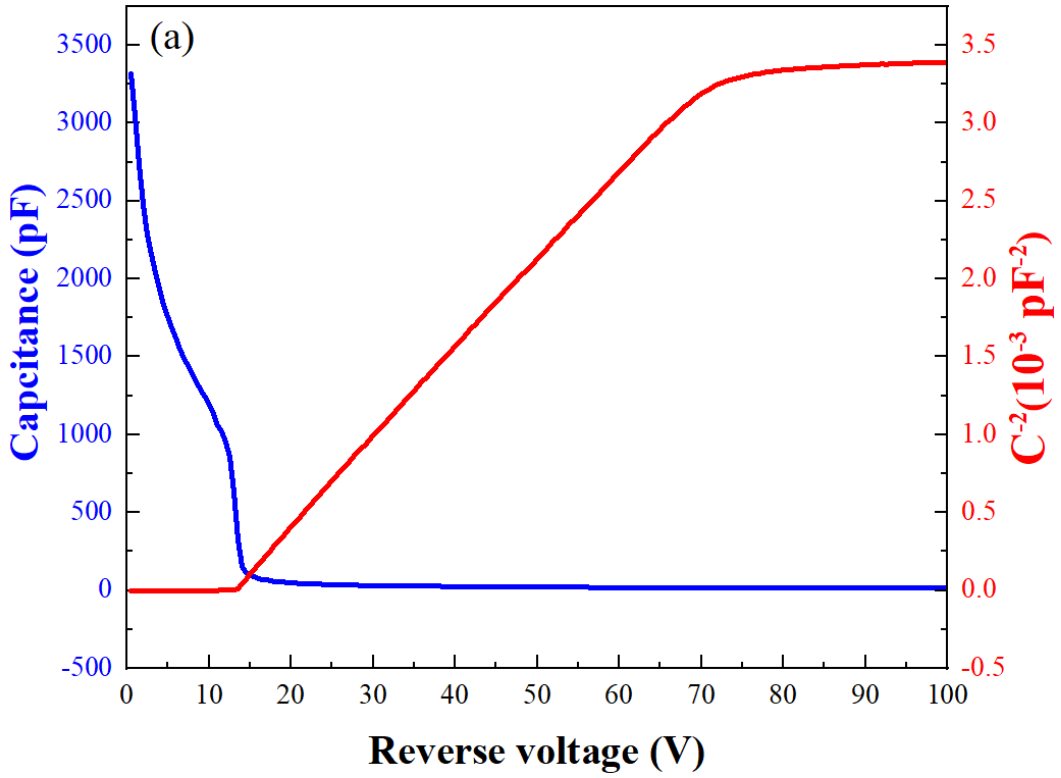
实验细节-测试装置



通过使用LabVIEW程序控制示波器以及步进电机来测试不同位置处器件的位置测量误差以及位置分辨率；

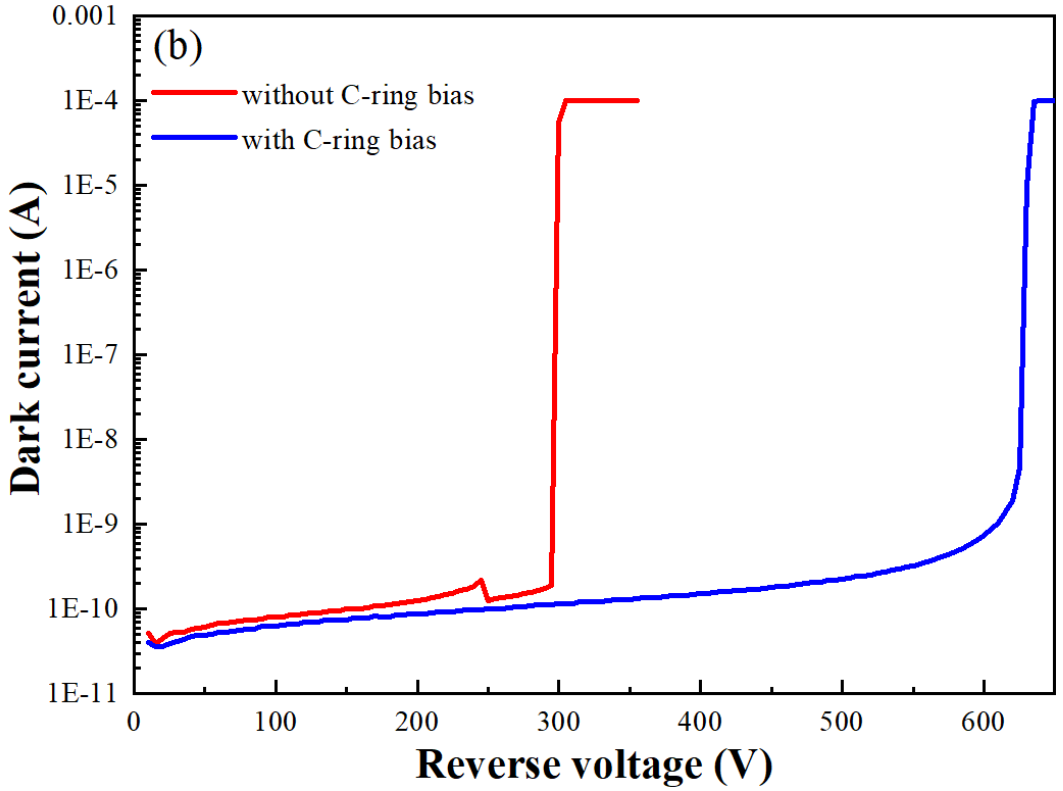
步进为250μm，平均光电子数（MPEN）~6000；

结果与讨论 - CV及IV



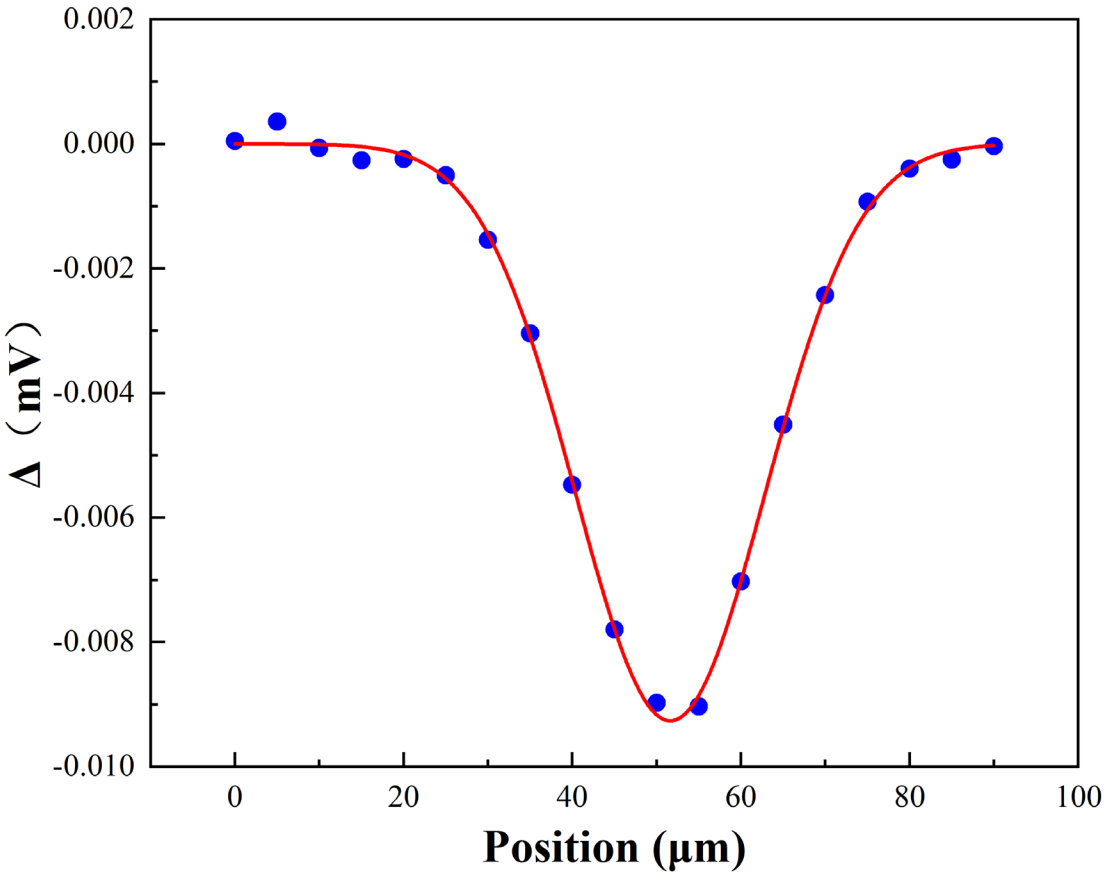
$$C = \frac{\varepsilon_s S}{w}$$

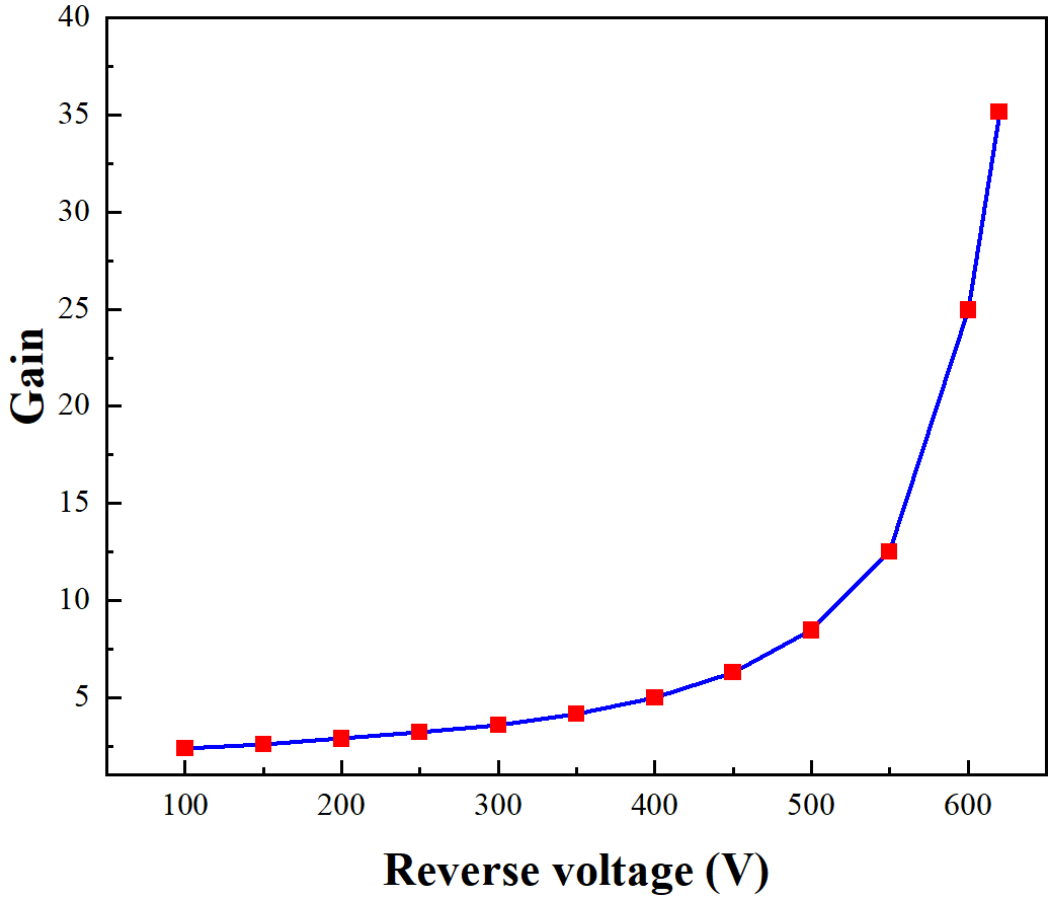
穿通电压约为**14V**,全耗尽电压约为**70V**,全耗尽电容约为**17.2pF**,比设计值**15.4 pF**大,主要是由于**PN**结横向扩展以及有效外延层的减少



C-ring偏置可以有效减少漏电流以及提高击穿电压；**C-ring**收集外侧区域的漏电流而且与主**PN**结产生的电场互相抵消,减小边缘电场,提高击穿电压

结果与讨论 - Gain

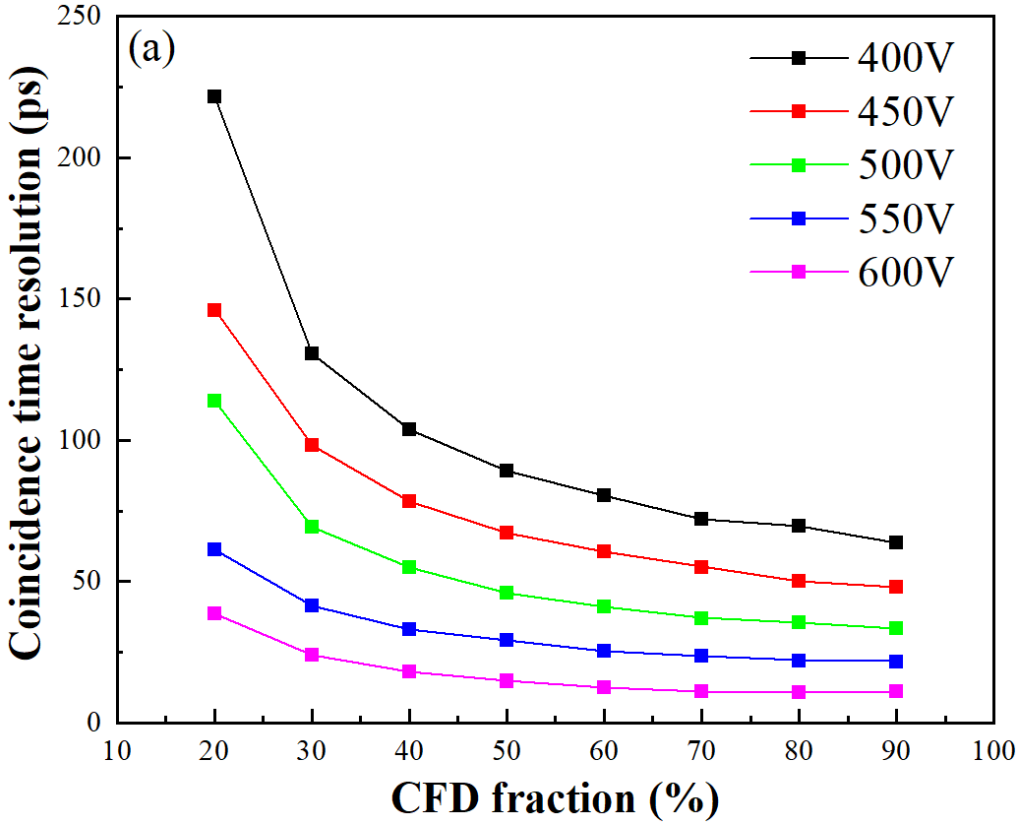


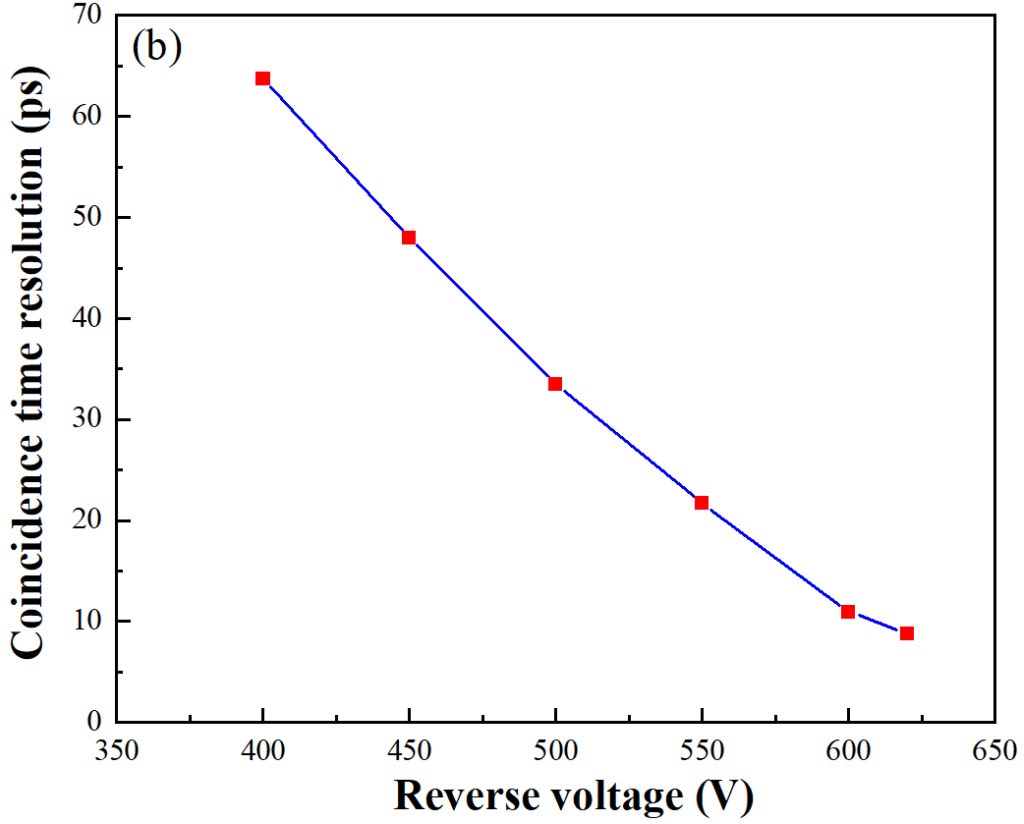


$$G = \frac{Q_{LGAD}}{Q_{PIN}}$$

光纤出射光斑直径约为26μm (FWHM)；PS-LGAD的最大增益大约是36;

结果与讨论 – 时间分辨率



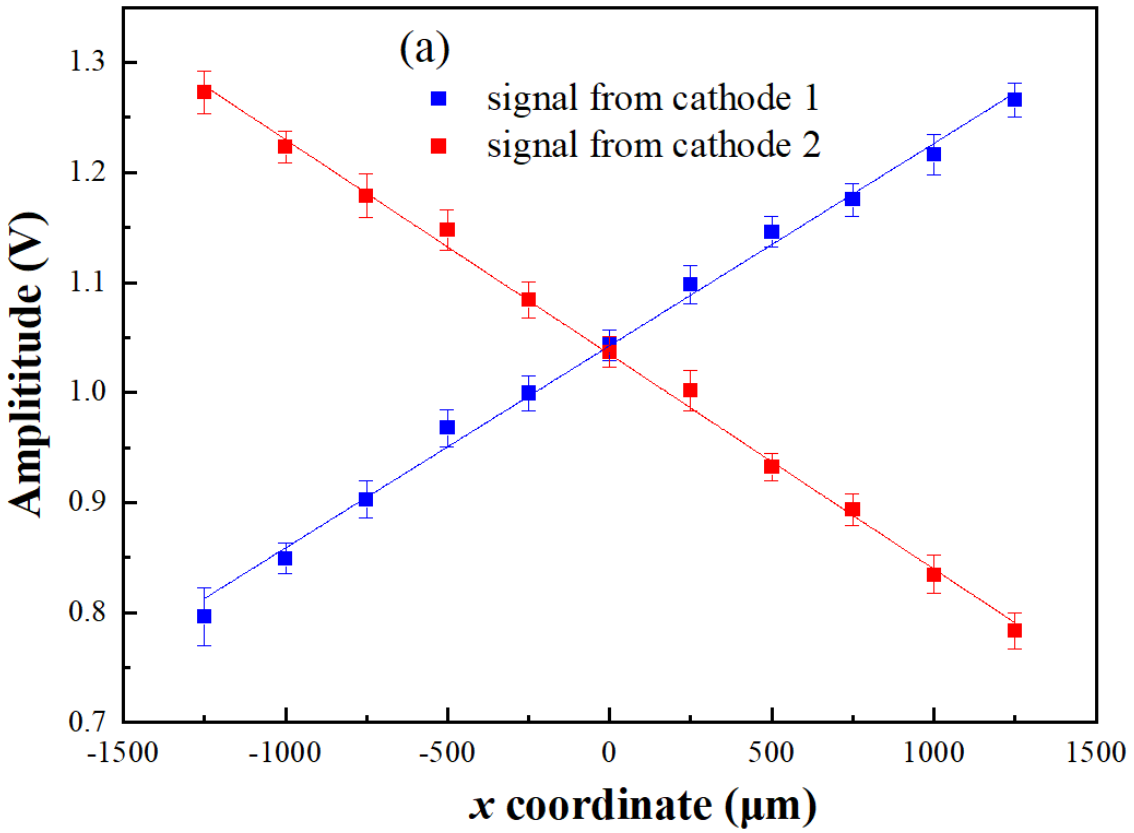


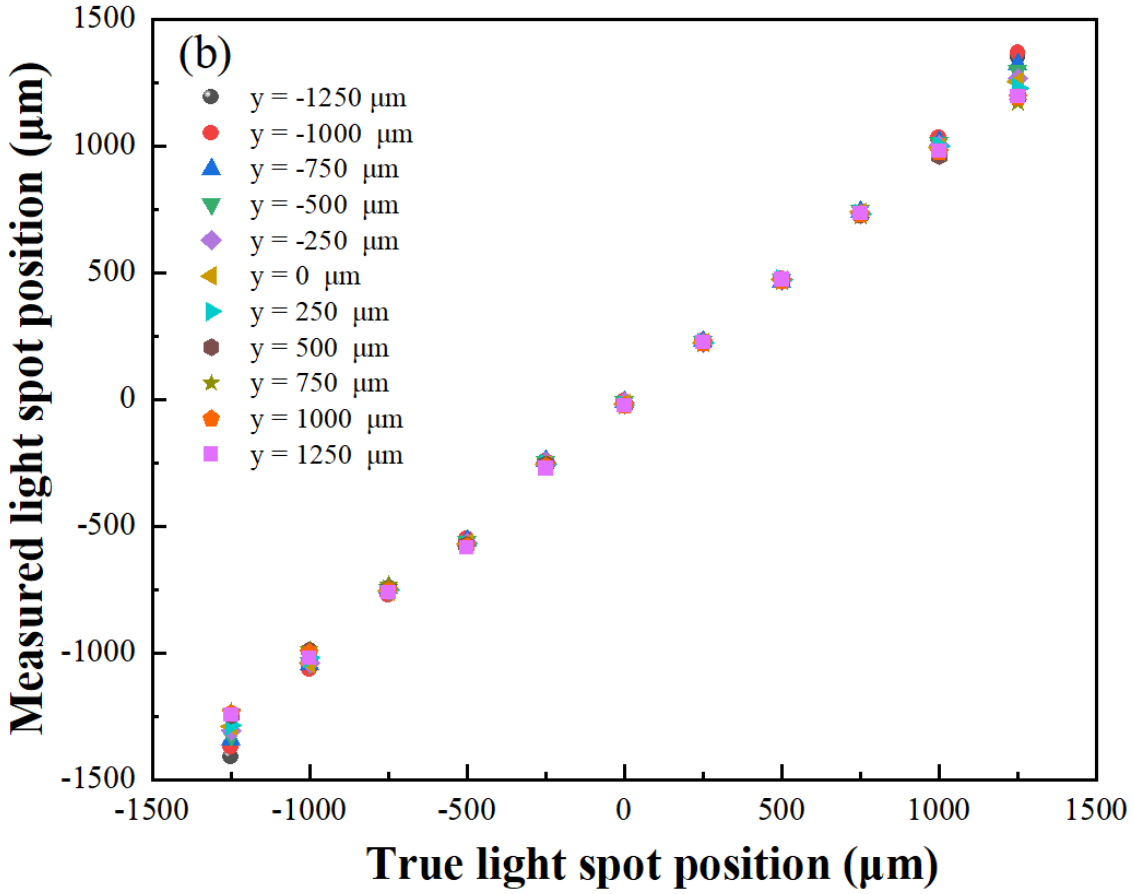
光斑移动至器件原点（0，0），两个通道输出信号的时间差的标准偏差作为器件的时间分辨率

$$\sigma_t^2 = \sigma_{TW}^2 + \sigma_{Jitter}^2 + \sigma_{Landau}^2, \quad \sigma_{Jitter} = \frac{N}{dV/dt} \sim \frac{t_r}{S/N}$$

最佳CFD比例大约为80%；在620V时时间分辨能力大约为8.8 ps

结果与讨论 – 位置测量误差

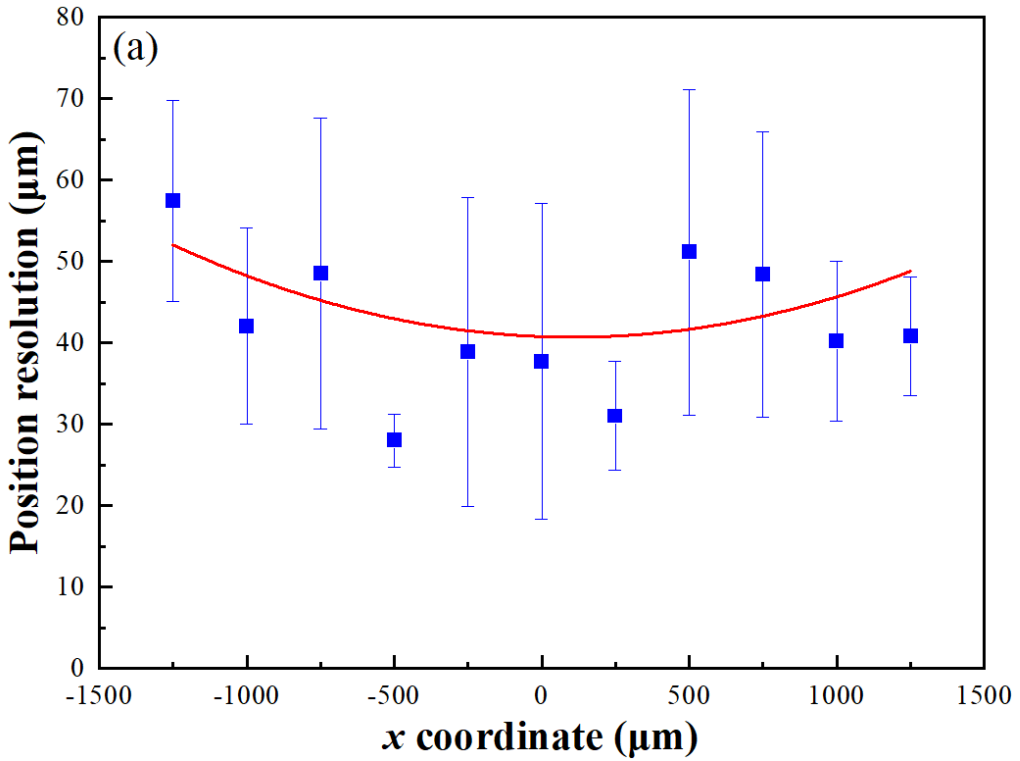


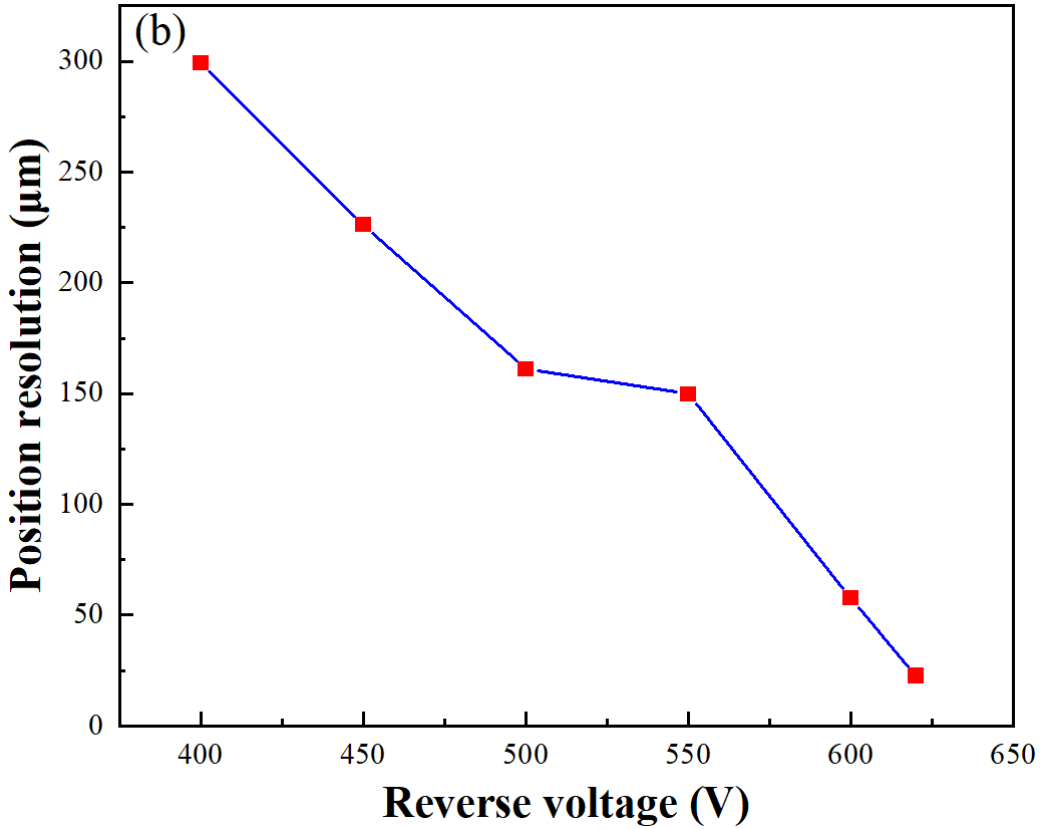


$$PME = \frac{\sum_1^n (x_{mi} - x_{0i})}{n}$$

600V时，器件的平均测量误差（PME）为32.2±35.4μm，大约为1.2%的器件尺寸

结果与讨论 – 位置分辨率





$$\sigma_x = k \cdot L \cdot \frac{2 < A_1 >< A_2 >}{(< A_1 > + < A_2 >)^2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{< A_1 >}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{< A_2 >}\right)^2}$$

600V时，位置分辨率在整个器件层面具备比较均匀的分布；
而且在**620V**，器件中心处的位置分辨率可以达到约**22.6μm**

结论与展望

1D PS-LGAD	
有源区面积	2.7× 2.7 mm^2
填充因子	100%
增益	36@620V
平均测量误差	32.2±35.4 μm @ 600V
时间分辨率	8.8 ps @620 V (σ)
位置分辨率	22.6 μm @ 620 V (σ)

1D PS-LGAD具有优秀的时间和位置分辨率，而且与常规**LGAD**工艺兼容，或许可以作为高能物理实验中**4D**追踪探测器的候补方案。

通过优化增益大小、条形电极距离、连续电阻层电阻、读出电路等方面，**1D PS LGAD**的位置分辨率还有进一步提高的空间。

感谢