



Monopix: 高抗辐射、高速单片式 CMOS像素探测器



中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会

2022/8/9





- 2011 2015 博士 法国斯特拉斯堡大学,CNRS-IPHC
 - 针对ALICE-ITS升级的数字化像素单片式CMOS探测器
- 2015 2021 博士后 德国波恩大学, SiLab
 - 高性能单片式CMOS像素探测器,混合型探测器读出电路芯片、传感器芯片ATLAS国际合作组,RD53国际合作
- 2021 至今 研究员 上海张江实验室
 - 先进X射线半导体探测器研发
 - 目标: 面向X射线大科学装置, 在软/韧X射线能段进行高帧频 (10-100kHz), 高动态范围探测

Monopix: 面向极端环境的MAPS芯片

MAPS: Monolithic Active Pixel Sensor = 传感器 + 读出电路



张江实验室



LF-Monopix系列

大收集电极设计 - 极强的抗辐射性



LFoundry 150nm CMOS工艺

- 深P井 + 深N井
- 高阻P衬底 (> 2 kΩ·cm)
- 高达7层金属



LF-Monopix1



- Pixel size: $50\mu m \times 250\mu m$
- Chip size: $10 \text{mm} \times 10 \text{mm}$
- Integrated column drain R/O
- Submitted in Aug. 2016



LF-Monopix2



- Pixel size: $50\mu m \times 150\mu m$
- Chip size: 20mm imes 10mm
- Optimized pixel design
- Digital-on-top design flow
- Submitted in May. 2020











- LF-Monopix1是首款在收集电极内集成复杂电路的大规模全功能MAPS芯片
- LF-Monopix2在击穿电压、噪声、串扰等得到进一步优化

	LF-Monopix1	LF-Monopix2
像素大小	50 μ m $ imes$ 250 μ m	50 μ m $ imes$ 150 μ m
击穿电压	~ 280 V	> 400V
噪声	~ 140 e⁻	~ 100 e⁻
阈值分散	~ 100 e ⁻	~ 100 e ⁻











<u>X射线TID总剂量至100MRad</u>

前放增益随TID变化 - LF-Monopix1







芯片: 100 µm LF-Monopix1 偏置电压: 150 V (100 µm 全耗尽) 探测效率: 99.41% (辐射前99.61%) In-time探测效率 (**25ns**): 96.73% (辐射前97.42%)

满足ATLAS指标需求

2022/8/9

LF-Monopix2束流测试结果

- LF-Monopix2具备比LF-Monopix1更好的时间分辨性能
- 将进行质子辐射实验,预计至少具备与LF-Monopix1同样的抗辐射性能

芯片厚度: 100 µm 偏置电压: 60 V (100 µm 全耗尽) 阈值: 2236±102 e⁻ 探测效率: 99.51% In-time探测效率 (25ns): 99.31%







LF-Monopix的抗辐射前景

- LFPassive芯片: 传感器结构与LF-Monopix类似的"被动式"传感器芯片
 - 晶圆级设计 (CMOS stiching)
 - 被ATLAS与CMS考虑作为HL-LHC升级备选
 - 不弱于专用工艺传感器 (FBK, Hamamatsu) 的性能
 - 抗辐射能力 > 2 × 10¹⁶ n_{eq}/cm² = > LF-Monopix有望具备同等性能













TJ-Monopix系列

小电极设计方案 – 低功耗、小像素



TowerJazz 180nm CMOS工艺

- 深N/P井
- 高阻外延层
- 6层金属
- 可以定制部分井注入
 - modified process by CERN & TowerJazz

TJ-Monopix1



- Pixel size: 36 μm \times 40 μm
- Chip size: 10 mm \times 20 mm
- 6-bit time stamp
- Submitted in July. 2017

TJ-Monopix2



- Pixel size: 33 μm \times 33 μm
- Chip size: 20 mm \times 20 mm
- Improved AFE
- 7-bit time stamp
- Submitted in Sep. 2020











- 特点:低功耗+小像素
- 类似ALPIDE的模拟前端
 - 25ns time walk, ~ 0.5 µA/pixel
 - 3-bit threshold tuning for TJ-Monopix2
- "全定制"数字电路
- 6-bit时间戳(7-bit for TJ-Monopix2)
- 深度优化的版图设计

TJ-Monopix2 2×2像素版图



TJ-Monopix1测试结果与经验教训

<u>RTS噪声</u>



<u>阈值分散比预期严重</u>



69.4 %@ 10¹⁵ n_{eq}/cm² E lectrostatic potential: W4_HV_1e15 PSUB=-16V, PWELL=-0V, HV=30V_ Efficiency 92 5700 83 5400 74 Efficiency Y [μm] 5100 65 56 4800 47 低吸收电场区域 4500 38 4200 📥 1200 29 2000 2400 2800 3200 1600 3600 20 X [μm] M. Munker, 2019

抗辐射性较差

需要优化模拟前端以及工艺的进一步改进!

张江实验室

LABORATOR

• TJ-Monopix1的再次提交流片包含了多种新的改进工艺

1. n gap PMOS NMOS pwell nwell pwell nwell pwell Low dose N implant P' Epitaxial layer P⁺⁺ Substrate

additional doop n

 \mathbf{c}

al uee	PP PMOS NMOS
nwell	pwell nwell pwell Deep pwell
limplant	
	P ⁻ Epitaxial layer
	P ⁺⁺ Substrate
	Implant

3. Hi-R Cz substrate + 1 or 2



Electrostatic potential:

Electrostatic potential:









column [µm]

辐射后的探测性能获得显著提升!





100

200

300

400

500

14

• 实验室测试证实TJ-Monopix2具备更好的模拟前端电路性能

μ=20e⁻

1750

1500 -

1250

1000

750

500

250 -

1.0

1.5

2.0

2.5 3.0

3.5

Injected charge / DAC units

4.0

4.5 5.0

44

ENC distribution

ENC Distribution

Mean ≈ 20e

- 明显改进了RTS噪声
- 阈值调整电路工作正常

TJ-Monopix2

• 束流测试进行中







Threshold dist. after tuning



Proposed for BELLE II Vertex Detector upgrade









- 单片式CMOS像素探测器逐渐向高抗辐射、高速读出等方向发展
- Monopix系列芯片实现近全尺寸的原型探测器芯片 => 符合ATLAS指标需求
 - 复杂读出构架
 - $> 10^{15} n_{eq}/cm^2 \& 100 MRad$
 - 25ns时间分辨
- LF-Monopix: 极强的抗辐射性能,有望超过2×10¹⁶ n_{eq}/cm²
- TJ-Monopix: 适合于对空间分辨率和物质量有需求的应用, 如BELLE II

广告: 欢迎具备探测器电子学 经验的人才加入张江实验室! wangty@zjlab.ac.cn Acknowledgment





谢谢! 欢迎批评指正!

从MAPS到DMAPS





<u>大收集电极方案:抗NIEL</u>



趋势: 高抗辐射能力、高速 => 耗尽 +复杂电路功能 DMAPS: Depleted Monolithic Active Pixel Sensor







电离辐射测试



- X光管参数: 40kV, 50mA => 0.6MRad/h
- 芯片样品: 100µm LF-Monopix1
- 冷却温度: 0 ± 2°c
- 在通电情况下进行辐射,总辐射剂量至100MRad



噪声随TID变化





Dose rate at 20cm. Al filter (Not-collimated, 5 mA).

