ATLAS High Granularity Timing Detector (ATLAS实验高颗粒度时间探测器)

梁志均 中国科学院高能物理研究所



High Granularity Timing Detector (HGTD) 高颗粒度时间探测器

- 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级(数纳秒→30皮秒)
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题
 - 6.4平方米的硅探测器, 30皮秒的时间分辨
 - 毫米级的颗粒度, 超过三百万个读出通道
 - 能承受2.5×10¹⁵ n_{eq} /cm²的等效中子通量的辐照
- 中国组主导探测器研制(高能所,科大,南大,山大,上海交大)
 - 45%探测器组装
 - >34%抗辐照高时间分辨传感器
 - 100%前端电子学, 50% ASIC测试, >16% 高压电子系统





ATLAS高时间分辨探测器: 重要管理职位

- 中国组在ATLAS高颗粒的时间探测器项目(HGTD)中起主导作用
 - -高能所Joao担任HGTD项目经理,ATLAS实验Level-1管理职位
 - 中国组首次在LHC实验子探测器担任项目经理
 - -4人担任探测器Level-2召集人 (梁志均,赵梅,张照茹、吴雨生)
 - -2人担任探测器Level-3召集人 (张杰,樊磊)

HGTD项目的管理架构 Management architecture of HGTD projects





Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) 低增益雪崩硅传感器

- LGAD是近年出现新型硅传感器,可以高精度测量时间(20-30皮秒)
 与APD 和 SiPM比较, LGAD has 适中的增益 (10-50)
 - > 信噪比高 , 无自触发
 - ▶ 减薄耗尽区(漂移区),提高电场与电子漂移速度

$$\sigma_{jitter}^2 = \left(\frac{t_{rise}}{S/N}\right)^2$$

- Modest gain to increase S/N
- Need thin detector to decrease t_{rise}
 - 一般的 PiN结传感器





低增益雪崩硅传感器 P+gain layer on top of PIN diode





4

4

低增益雪崩硅传感器: 增益 vs 信噪比



Noise increases faster than then signal

 \rightarrow the ratio S/N becomes worse at higher gain

https://doi.org/10.1201/9781003131946



LGAD低增益雪崩硅传感器: 国内外形势

- •近年来,全世界范围涌现出很多研制LGAD硅传感器的单位
 - 国内: IHEP-IME (高能所-微电子所), USTC-IME (科大-微电子所), NDL(高能所-北师大)
 - 国际: 滨松HPK (Japan), FBK (意大利), CNM (西班牙)...
 - 高能所和科大分别独立设计传感器版图和工艺,在微电子所8寸晶圆工艺流片



全尺寸LGAD硅传感器

28

- 高能所,科大,滨松, FPK, CNM 已经生产出全尺寸传感器。
 - 15×15像素的多像素 LGAD硅传感器



Bias Voltage [V]

LGAD传感器辐照后硼掺杂移除 (Acceptor removal)

- 辐照后, 硼掺杂失去活性, LGAD传感器增益下降(Acceptor removal)
- 高能所、科大等国产LGAD采用掺碳工艺
 - •显著减低辐照后损伤(减低硼移除率)
 - 抗辐照性能显著提高
 - 目前抗辐照性能优于滨松



高能所传感器、科大研发传感器



LGAD传感器的时间分辨率测量

- Sr⁹⁰ 放射源测试 (测量时间分辨率、电荷收集)
- UCSC boards with commercial amplifier and analog readout by Oscilloscope
 - Less constraints with respect to the ASICs exploring the limits of the sensors.
- Two UCSC boards with two LGAD
 - One LGAD is device under test (DUT)
 - Another LGAD is used to trigger electrons events from Sr⁹⁰





LGAD

LGAD传感器在辐照后的性能(2.5e15 cm⁻² 等效中子通量)

- 掺碳的LGADs 满足ATLAS实验的 HGTD 要求(高能所,科大,意大利FBK)
 - 30-50皮秒的时间分辨率,4fC以上的电荷收集,工作电压低于550V(避免烧毁)
 - 高能所LGAD可以工作在300V的较低电压下,并有4fC以上足够电荷收集



ATLAS

硅传感器的单粒子烧毁风险 Single Event Burnout (SEB)

- RD50, CMS and ATLAS 合作组在2021年确认LGAD的单粒子烧毁风险
- 高电压与高电场导致烧毁,工作电压要控制到<550 V (50微米的硅传感器)
- ATLAS合作组开展CERN的高能质子流测试
 - 辐照后,不掺碳的LGAD(滨松,西班牙CNM)烧毁率较高
 - 掺碳的LGAD基本能通过测试(高能所,中科大,意大利FBK)
 - 高能所传感器辐照后, 8个样品全部通过测试, 无一烧毁

单粒子烧毁后LGAD样品



CERN test beam: 120 GeV 质子束流



辐照后LGAD传感器在束流测试的性能

- 辐照后, LGAD传感器束流测试中有近100% 探测器效率
- 高能所、科大LGAD通过CERN的Market Survey
 - 国产硅传感器首次在LHC实验上得到应用

高能所传感器在束流测试中探测效率









超快读出ASIC研发



- 基于台积电(TSMC)130nm工艺开发
- ALTROC1– 5x5 array with complete analogue front end (discriminator + TDC)
- ALTIROC2– 15x15 array with almost complete functionalities
 - Full-size ASIC prototype ~2x2 cm² with 225 readout channels
 - Large amount of digital data, limited power consumption (1.2W/ASIC \rightarrow 5.3 mW/ channel)
 - data serializers @ up to 1.28 Gb/s,
 - ALTIROC1 and testboad



ALTIROC2 晶圆



ALTIROC2 test bench setup

超快读出ASIC性能测试



- ATLAS实验要求时间分辨率好于<70 皮秒 @ 4 fC
 - LGAD collected charge >15 fC (>4 fC) before (after) irradiation
- Charge injection self-calibration test in ALTIROC
 - Thresholds can be as low as 2 fC full efficiency reached at ~3 fC
 - ~15 ps jitter @ 15 fC, better than 70 ps jitter@ 4 fC





探测器模块: 倒装焊封装

- 高能所承担项目中50%的倒装焊封装任务
- 高能所在国内已经研制出40+倒装焊模块
 - ALTIROC2读出芯片 + 高能所-微电子所LGAD





X-ray image of full-size hybrid



ATLAS时间探测器模块组装

- HGTD项目总共需要8032个探测器模块
- 6个模块组装生产中心
 - 高能所,科大,德国,法国,西班牙,摩洛哥
 - 高能所是最大的生产中心,组装34%的模块
- 高能所与国内公司研制国产自动组装系统
 - 有高分辨图像系统, 做芯片图像识别
 - 自动芯片组装、点胶
 - 位置组装精度达到微米级





Picking flex

Picking tool Picking dummy sensor Placing dummy sensor





FLEX tail

HV connecto

2 LGADs (2 x 2 cm²

HV wire-bonding

Connector

Component

Module ELE

ATLAS时间探测器首个探测器模块原型

- 高能所研制出该项目首批探测器模块原型
 - 在放射源功能测试中225个读出通道均正常工作





ATLAS时间探测器首个探测器模块原型

- 高能所研制出该项目首批全尺寸探测器模块原型
 - 最低阈值可以降低到4.8fC,接近设计目标 4fC
 - 噪声与阈值在225个通道的一致性非常好



模块原型在束流测试性能

- 5x5 通道小型模块的束流测试 (ALTIROC1+LGAD)
 - 模块系统级达到46皮秒的时间分辨率



Peripheral electronics board (PEB) 前端电子学

高能所、南大承担100%前端电子学研制
空间少、高辐照,前端电子学难度大

	From simulation	Safety factor	Design requirement
Fluence	< 1x10 ¹⁵ neq /cm ²	1.5	≥ 1.5x10 ¹⁵ neq /cm ²
TID	< 20 Mrad (0.2M Gy)	1.5 x 1.5 ₍₁₎	≥ 45 Mrad (0.45 MGy)



Design and test each sub-module circuit

- Control and data transmission module(lpGBT&VTRx+)
 - 10.24Gbps uplink
 - Joint testing with ATLAS TDAQ(FELIX)
- Power Block (bPOL12V)
 - Coreless inductor, height < 4mm
 - Optimize the output ripple
- 64-to-1 multiplexer
 - Packaging and testing
 - Pass the proton irradiation test (80MeV) at CSNS





DC/DC converter





lpGBT eval. board

VTRx+ eval. board



MUX64 in QFN88



22

系统级时间探测器样机 DAQ Demonstration System











@ Nikhef



小结: ATLAS实验高颗粒度时间探测器

- > 中国组在项目中占主导地位,担任项目经理等多个领导职务。
- 传感器:高能所、科大自主研制国产超快硅传感器,获得重大进展
 在微电子所流片,得到目前最佳抗辐照性能;
 - ▶ 时间分辨达到35皮秒@300V,低电压避免了单粒子效
- ▶ 外围电路:
 - > 高能所,南大主导了外围电路板的设计与研制工作
 - ▶ 研制出电路板读出系统原型机。
- ▶ 探测器模块:高能所研制出首批的探测器模块
 - ▶ 中国组主导模块研制,中国组将组装~4000个模块,占项目45%
- ➤ ASIC超快读出芯片:
 - ▶ 中国组承担ASIC的50%晶圆级测试任务,与抗辐照测试任务。
- ▶ 高压系统
 - ≻ 高能所研制出高压系统原型机(100nA电流测量精度)



backup



LGAD Single Event Burnout effect (HV stability in the beam)





Detector units

- Modules are installed and glued on support units (PEEK)
 - Challenges :machining or 3D printing of PEEK (flatness <200μm)</p>

Loading modules on support units



Different color represents different support units.



Loading modules on support units



Module

Support units metrology

