

## 专家 1

### 对学位论文的学术评语:

该论文主要针对未来超级陶浆装置的内径迹探测器开展模拟设计与研制工作。基于国外 180 nm 高阻外延工艺和国内 130 nm 高阻衬底工艺,开展具备位置、时间、能量多维信息测量能力的低功耗单片式有源像素传感器研制,选题具有科学意义。具体研究成果包括:

- 1、基于国外成熟的 180 nm 高阻外延工艺,设计完成了大尺寸像素原型验证芯片。并实现了流片与测试,用以评估技术方法的有效性。
- 2、为推动低功耗单片式有源像素传感器技术国产化,基于国内 130 nm 高阻衬底工艺完成了原型芯片的设计、流片与测试。该论文工作量比较大,内容很丰富,模拟与实验数据详实,论文书写规范。

### 论文的不足之处和建议:

- 1、建议:该论文有点冗长,语言和内容有精简空间。相较于正文,展望显得过于简短。

回复:本论文对 MAPS 进行了系统性、全方面的调研,并完成两块基于不同方案的原型验证 MAPS 的设计与仿真,这导致部分内容需要重复叙述,已对叙述方式进行精简。已对展望部分进行补充。

- 2、建议:两个词语并列一般用“和”或者“与”,而不是“、”,多个词语并列时最后两个之间词也是用“和”。语言有待进一步精炼,例如很多“了”是多余的,摘要关于第二个方案,连续出现三次“同时”。

回复:已对全文进行修改。

- 3、建议:文章对“STAR”和“ULTIMATE”均未作说明,对读者不友好。此外论文中英文缩写比较多,影响阅读连续性。

回复:已补充 STAR 实验全称;ULTIMATE 是 STAR 实验中所使用的 MAPS 芯片的具体名称,已修改表述来增加可读性。

- 4、建议:建议调整版面,使图 2.15 和 3.11 处于一页之内。

回复:已修改。

- 5、建议:文中多次出现“下图”,论文中建议尽量避免用“上下左右”来定位图片,编号足够了。

回复:已将全文中的“下图 x.xx”修改为“图 x.xx”。

- 6、建议:第四章有多幅图很难看清结构,是否有必要展示?

回复:在第四章中对重要读出结构以及重要的仿真波形进行了展示,已重新检查、更换展示图片以确保清晰度。

7、建议：第五章电路板照片、实验仪器照片，作为博士论文，建议展示有效信息。

回复：第五章中的部分照片已做删减或移至附录。而各阶段的测试平台照片等具有关键展示作用的图片则继续保留在正文中。

## 专家 2

### 对学位论文的学术评语:

超级陶粲装置 (Super Tau-Charm Facility, STCF) 是我国正在规划的新一代正负电子对撞机, 为开展正反物质不对称性的起源、强子内部结构的三维成像、奇特强子态与胶子激发态的寻找, 以及寻找超越标准模型新物理等一系列前沿物理研究提供了独特的研究平台。论文针对 STCF 核心探测器之一的最内层探测器 -- 内径迹探测器 (Inner Tracker, ITK), 采用基于国外 180 nm 高阻外延工艺和国内 130 nm 高阻衬底工艺, 开展了低功耗单片式有源像素传感器 (MAPS) 的研制工作, 具有十分重要的科学意义。论文取得的创新及重要结果包括:

- 1、提出基于超级像素的新型读出架构, 在超级像素内通过对多个像素的数字输出错位做“或”操作并编码, 实现读出通道的合并以降低功耗。同时结合基于共享高频压控振荡器的细时间测量结构, 最终以低功耗完成了高精度时间测量, 同时还具备更优的位置精度;
- 2、原型芯片关键性能指标已满足 STCF ITK 第一阶段设计要求。
- 3、为我国自主可控开展大科学装置相关核心探测器的研制积累了经验; 论文写作规范、逻辑性强、工作量饱满, 达到博士生论文送审条件。

### 论文的不足之处和建议:

- 1、**建议:** 论文不足之处在于探测器架构过于保守, 主要还是跟随国外主流 MAPS 方案, 整体创新不够鲜明。对于大科学装置建设而言, 采用成熟可靠的研究方案是非常必要的, 但作为年轻人才培养以及优秀博士论文而言, 要敢于创新和失败, 否则我们国家在 0 到 1 的源头创新方面很难有大的突破;

回复: MAPS 的性能高度依赖于代工厂提供的特定工艺结构与参数。在缺乏代工厂深度配合的现实条件下, 参考并采用国外主流的 MAPS 方案 (主要指传感器结构) 是确保传感器性能的务实选择。在工艺的客观限制下, 本研究选择将创新点聚焦在传感器几何尺寸和读出方案的优化上, 并在实测中验证了上述优化对 MAPS 综合性能的切实提升作用。

- 2、**建议:** 应当有一个对比表格, 提供本论文研究与当前有代表性的 MAPS 相比, 各个关键参数指标之间的优劣情况及说明。

回复: 已整理 MAPS 性能对比表格, 并补充在第六章 P166 中。

## 专家 3

### 对学位论文的学术评语:

论文针对超级陶浆装置内径迹探测器的性能要求,系统开展了基于单片有源像素传感器的设计与测试研究,选题具有重要的科学意义和应用价值。论文在论证实验探测器性能需求的基础上,结合器件仿真,提出了传感器设计方案及相应的前端电子学和外围电路,并尝试采用不同工艺完成流片。样片经详细的实验室激光、放射源和束流测试,初步验证了设计的有效性,为后续优化直至最终实现设计指标奠定了坚实基础。论文写作规范严谨,文献调研充分深入,关键电路设计具有创新性,实验测试系统完整、结果扎实可靠,整体工作内容饱满,充分体现了作者突出的科研能力。论文经修改后可参加答辩。

### 论文的不足之处和建议:

文献调研部分可适当精简,聚焦传感器研究的关键内容。对比不同设计时,注意凝练设计理念,突出核心设计的优缺点,避免过度细节描述。器件仿真部分结果不够准确,外延层掺杂浓度模型、电荷注入等需要重新确认。电路设计部分阐述不够精炼,建议舍弃部分技术细节,强化功能描述和原始创新点的提炼。以下部分细节修改内容供参考。

1、建议: P44 首次提出 MAPS 概念的文献引用应采用原始论文,避免引用综述文章

回复: 已在 MAPS 首次出现的位置 (P8) 补充引用了原始论文。

2、建议: 第二章节为文献调研技术方案总结,行文略显凌乱。在对比主要 MAPS 芯片时,偏重参数罗列,没能凸显芯片设计要点和特色,建议重新梳理修改。对于架构设计的描述,尤其需要抓住重点,部分工作方式细节建议舍去,增加可读性。

回复: 已重新检查第二章的表述。

3、建议: P46 对于金属线连接型传感器的优点没有明确,此类分立电极相对单个大电极在面积接近(电容相近)条件下,可以避免大面积零电场区域,可以在经受辐照后可以更好收集电荷。如果如文章中当前设计方式,即电容更小的话,优势则可以体现为更小噪声、更低的前端模拟功耗。当前比较方式不尽合理。

回复: 原文可能由于表述不清导致了误解,已在文中进行修改。金属线连接型传感器由多个分立电极组成,与单个大电极相比,在面积接近的条件下具有电容更小的优势,因此在保持信噪比不变的前提下模拟电路功耗更低。其劣势在于耗尽区仅存在于分立电极周围,因此分立电极间存在零电场区域,电荷收集性能相对差。

4、建议: P46 关于外延层掺杂浓度“逐渐过渡至衬底”的模型与实际情况不太符合。

回复: 原文中“逐渐过渡至衬底”的描述不准确,没有体现出外延层与衬底间的掺杂浓度突变。修改后的描述为“硅表面(深度为  $0\ \mu\text{m}$ ) 掺杂浓度约为  $6.4 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-3}$ ,并在深度为

25  $\mu\text{m}$  附近急剧上升为  $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (对应衬底掺杂浓度) ”。

5、建议: P50 电荷注入部分, 提到“径迹长度为 50  $\mu\text{m}$ ”即贯穿外延及衬底, 但是并没有仿真体现衬底部分的载流子寿命等参数设置以及对于电荷收集的贡献, 会对最后的结论有重要影响。

回复: 在原论文中默认衬底部分的载流子不会贡献到信号电荷中, 因此缺乏了相关信息。已在文中补充如下的表述: “入射粒子将在外延层与衬底中电离产生电子对, 但 N 阱收集到的信号电荷主要来源于外延层。这主要基于两点原因: 首先, 外延层与衬底之间的掺杂浓度差会形成势垒, 有效阻止衬底中的电子进入外延层; 其次, 衬底内部基本不存在电场, 且载流子寿命仅为  $10^{-8} \text{ s}$  量级, 因此外延层中产生的电子难以被收集。”

6、建议: P53 关于高阻衬底部分 TCAD 仿真, 只有电荷收集结果, 并未讨论信号产生。在 50 微米厚度条件下, 信号产生相对于外延结构应该加倍。文中没有这部分内容和讨论, 结论略显粗糙。另外, 考虑到电荷测量的需求, cluster 电荷收集能力也应加以研究。

回复: 仅从电荷信号产生角度, 无论是在高阻外延、低阻衬底和高阻衬底中均能产生电子对, 电荷产生机制详见 2.1.2.2 节。因此, 相较高阻外延工艺, 高阻衬底工艺中产生的信号电荷并不会加倍。两类工艺的差异主要体现在电荷收集效应上, 其中高阻衬底工艺下的收集极主要依靠电荷的热扩散完成收集, 因此收集效果相对差。

7、建议: P119 缺少激光波长信息, 激光在硅中的穿透深度会直接影响载流子产生位置, 对载流子收集有直接影响, 也会对电荷标定有直接影响。预期束斑尺寸多少? 另外效率测量部分所得到的“相对”效率, 而且受限于像素表面是否存在金属覆盖等因素, 并不能以此简单等价实际所需 MIP 粒子探测效率。

回复: 已在文中补充激光波长、预期束斑尺寸等信息: 激光波长为 1064 nm, 束腰半径为 1.7  $\mu\text{m}$ 。此外, 在原文中有提到激光由 MAPS 芯片背面入射, 因此不会存在由于像素表面由金属覆盖而导致探测效率损失的情况。并且激光在硅中的穿透深度为 1036  $\mu\text{m}$ , 远大于 200  $\mu\text{m}$  的硅片厚度, 因此认为用该红外激光一定程度上可以表征 MIP 粒子的探测效率。

8、建议: P134 AllPix2 仿真所得到的团簇尺寸给出的信息依赖于建模的准确性, 既然已有束流实验测试结果, 可以基于实验数据适当增加冗余加以测算。

回复: 在 ALLPix2 中仿真得到 Cluster size 平均值为 2.9, 略高于后续实测的 Cluster size (束流测试中为 2.5)。因此不影响 6.1 节中“选取 N 值为 2, K 值为 3 即可以有效地避免绝大多数的 ToT 信息损失情况”这一结论。不过, 根据实测结果对仿真模型参数进行调整, 依然是项目组在未来工作中的重点, 已在展望中补充相关内容: “此外, 放射源测试与束流测试的结果可以为 TCAD 仿真及 Allpix<sup>2</sup> 仿真中的参数设置提供依据。后续需基于实验数据对仿真参数进行迭代优化, 以进一步提高模型的准确性”。

9、建议：P180“图 7.22 为经  $^{55}\text{Fe}$  源照射一段时间后，种子...”实为图 7.21；段落末尾“电荷手机性能。”-》“收集”。

回复：已修改。

10、建议：P189 总结部分“能谱中的  $\text{K-}\alpha$  峰对应的标定电荷量为  $1610\text{ e}^-$ ”，前文 P180 所给数字为 1620，注意前后结果一致性。

回复：已统一修正为  $1620\text{ e}^-$ 。

## 专家 4

### 对学位论文的学术评语:

论文针对超级陶浆装置 STCF 内径迹探测器系统, 以实现高计数率、低功耗、高坐标精度目标, 系统性地开展了单片式有源像素传感器 (MAPS) 的自主设计与验证, 基于国外 180nm 高阻外延工艺和国内 130nm 高阻衬底工艺, 分别研制了基于大尺寸像素结构的 CharTPix180 与基于小尺寸像素结构的 CharTPix130 两款原型芯片, 在束流测试不同条件下验证了高探测效率、优越的位置分辨及时间精度。研究对于突破低功耗与多维测量兼顾的技术瓶颈, 探索面向新一代高亮度正负电子对撞机的核心需求, 基于国产工艺的 MAPS 自主化路径具有重要意义。研究工作及成果扎实, 论文主体撰写规范, 层次分明, 内容翔实。

### 论文的不足之处和建议:

1、建议: 论文第 15 页, 第 3 行无需换行;

回复: 已修改。

2、建议: 公式 (2-1) 中  $-(dx)/(dE)$  应为  $-(dE)/(dx)$ , 请检查确认, 表 2.1 以下部分内容里出现的地方也需检查更正;

回复: 已修改为  $-(dE)/(dx)$ 。

3、建议: 公式与图表应分开一段距离, 不要混在一起;

回复: 已重新修改。

4、其他建议: 论文在第 6 章对模拟堆积问题进行了仿真研究, 但在第 7 章高计数率测试中缺少对相应的大团簇极端事件读出效率实测评估, 建议补充些相关的讨论分析。

回复: 针对例如  $\alpha$  粒子产生的大团簇极端事例, 第 6 章中设计的读出架构并不会导致探测效率损失, 仅在团簇尺寸超过  $3 \times 3$  的情况下存在少量电荷信息损失。

束流测试是与 STCF 探测谱仪中其他子探测器共用了同一束流源, 为保障其余气体探测器工作正常, 所使用的束流具有束斑尺寸较大、事例率较低的特点。这一客观因素使得难以对极限计数率下的读出效率进行测试, 因此在本论文中未对此进行详细讨论。该项性能将在项目组后续的束流测试中进行补充测试与分析。

## 专家 5

### 对学位论文的学术评语:

本论文《面向 STCF 内径迹探测器的单片式有源像素传感器研究》针对我国正在规划的超级陶粲装置 (STCF) 内径迹探测器的高计数率、高空间与时间分辨、低功耗及低物质量等严苛需求, 开展了系统的单片式有源像素传感器 (MAPS) 前沿技术研究。选题紧扣国家重大科技基础设施建设的核心关键技术, 具有极强的理论意义与突出的工程应用价值。论文文献综述详实, 全面回顾并深刻评述了 STAR、ALICE、ATLAS 等国际大型高能物理实验中的主流 MAPS 架构现状及发展趋势。

在创新性方面, 作者提出了两项极具代表性的架构创新: 一是基于国外 180 nm 高阻外延工艺的大尺寸像素架构, 通过降低读出通道规模成功实现了功耗密度的有效控制; 二是针对国内新兴的 130 nm 高阻衬底工艺, 创新性地提出了基于“超级像素”的新型读出架构, 该架构在维持超低功耗的同时, 结合共享高频压控振荡器实现了高精度的细时间测量。特别是采用国产 130 nm 工艺开发原型芯片(CharTPix130), 探测效率达到 99.3%, 位置精度好于 5  $\mu\text{m}$ , 时间精度好于 50 ns。这不仅证明了技术方案的先进性, 更成功探索了探测器前端核心芯片从设计到制造全链条自主可控的技术路径, 对我国高能核心探测器装备的国产化替代具有深远影响。作者在研究中综合运用了 TCAD 半导体仿真、深亚微米集成电路设计, 并完成了包括激光、放射源以及 CERN 束流测试在内的系统性实验评估。数据翔实, 论证严密, 体现出坚实宽广的粒子物理与核物理专业基础以及卓越的独立科研能力。全文结构逻辑严谨, 文字表述准确流畅, 是一篇非常优秀的博士学位论文。

### 论文的不足之处和建议:

尽管本文在 MAPS 芯片架构设计与流片验证方面取得了极具创新性的丰硕成果, 但从进一步追求工程化和完善物理实验要求的角度来看, 仍有以下改进空间和建议:

- 1、建议: 辐射耐受性评估可进一步深化: STCF 应用环境对内径迹探测器的抗辐照能力有较高要求 (如 1 Mrad/y 的 TID 和  $1.0 \times 10^{11}$  neq/cm<sup>2</sup>/y 的 NIEL)。论文的原型验证中, 着重展示了电荷收集、位置和时间分辨等物理性能的验证。建议在讨论或未来展望部分, 补充关于国产 130 nm 高阻衬底工艺在经受高剂量辐射后的阈值漂移、噪声退化及效率劣化的系统性评测计划或初步理论分析, 以全面评估该国产工艺作为最终工程方案的长期可靠性

回复: 已在展望中补充辐照测试的相关内容: “CharTPix180 与 CharTPix130 虽已完成较为完整的实验室测试与束流测试, 基本功能与性能得到了验证。但面对 STCF 运行期间积累数年的高辐照环境, 两款 MAPS 芯片的抗辐照能力仍需进一步检验。尤其对于采用

国产 130 nm 新兴工艺的 CharTPix130，目前针对该工艺抗辐照性能的研究尚不充分，需自行开展系统性测试与分析。因此，未来计划对 MAPS 芯片进行不同剂量的辐射，并重点评估辐射后的 MOS 管阈值电压漂移、信噪比、漏电流以及探测效率等关键指标，并与辐照前的性能进行对比与分析。”

2、建议：束流测试数据分析可更加细化：论文进行了高价值的束流实验验证，建议可以针对不同入射角的粒子所引发的电荷共享效应进行更深入的数据挖掘，探讨团簇大小变化对电荷重心法位置重建精度的具体影响。

回复：

3、建议：宏观系统级集成的探讨：目前的论述主要集中在单芯片层面。建议在总结与展望中，适当引入对未来大面积拼接组装（如 Stave 结构）时可能面临的系统供电（IR Drop）、高速信号串扰以及极低功耗冷却（气冷替代水冷）等系统级工程挑战的探讨。

回复：已在展望中进行补充，具体内容如下：“除单芯片级的设计外，未来还需开展大面积、高精度的 MAPS 模块组装与集成技术的研究，并通过材料选择和结构设计实现探测器模块的低物质量。ITK 中各层探测器均由 Stave 模块沿轴向以扇形组合构成桶面结构，每个 Stave 模块包含若干个集成 MAPS 芯片的柔性印制电路板 FPC。在 FPC 设计过程中，需结合 MAPS 芯片的功耗表现，评估供电压降以及高速信号传输的性能。此外，还需开展制冷方案的设计与研制，评估采用气冷模式替代液冷模式的可行性。”