课题编号： 2018YFA0404302

|  |
| --- |
| **国家重点研发计划**  **课题绩效自评价报告** |

课题名称： 硅径迹探测器关键技术验证

所属项目： 高能环形正负电子对撞机关键技术研发与验证

所属专项： 大科学装置前沿研究

课题负责人：（签字）

课题承担单位：（盖章）

执行期限： 2018 年 5 月 至 2023 年 4 月

中华人民共和国科学技术部

2023 年 6 月 16 日

**编 报 要 求**

一、内容说明

课题绩效自评价报告应围绕课题任务书的内容报告总体执行情况，具体包括课题目标和考核指标完成情况、重要成果、成果应用示范推广及产业化情况、一体化组织实施及管理运行情况、人才培养、资金使用情况等。

二、格式要求

文字简练；报告的密级一般与课题任务书密级相同；报告文本统一用A4幅面纸，报告文本第一次出现外文名称时要写清全称和缩写，再出现时可以使用缩写。

三、编制程序及时间要求

各课题执行期结束后，课题承担单位应组织课题参与单位编制绩效自评价报告，经课题承担单位和课题负责人审核签字（盖章）后，提交项目牵头单位。

涉密课题绩效自评价报告按照有关保密规定进行填写、打印及报送。

一、总体进展情况

1. 课题总体进展情况

对照课题目标和各项考核指标，阐明课题总体进展情况。

本课题的课题目标为研制针对下一代高能环形正负电子对撞机的物理需求，研发高空间分辨率，抗辐照的硅径迹探测器技术。考核指标为研制硅径迹探测器原型机的空间分辨率达到3-5微米；所设计的硅传感器芯片能承受1Mrad以上的电离辐照剂量。

**课题组在项目执行期间完成所有课题目标，所研究的像素传感器芯片与硅探测器原型机达到课题各项考核指标。**

1. **研制出全尺寸的CMOS像素型粒子传感器芯片**

在像素传感器部分，按照计划完成了所有研发工作，并完成了全面积全功能的原型芯片的设计、流片与初步测试工作。**这是国内研制的首个全尺寸全功能的CMOS像素型粒子传感器芯片**。全尺寸像素传感器太初3芯片有1024×512像素，每个像素有完整的传感器与读出电路，在外围电路中有高速数据压缩/编码等全功能的芯片。

在太初3芯片流片完成后，课题组对芯片进行晶圆级探针卡测试。测试结果显示，芯片的成品率高于70%。课题组在太初3原型芯片完成全面测试，验证了功能正常，性能指标满足项目需求。对太初3芯片进行了全面的功能验证和性能测试，包括像素单元的噪声分布、阈值分布，芯片对90Sr放射源和激光的响应，以及在电离辐照条件下芯片功能和像素单元性能的变化等测试。

针对课题任务书传感器空间分辨率的关键指标，课题组在2022年12月用6个太初3传感器芯片及配套电子学搭建出束流望远镜，并在德国DESY研究所进行束流测试**课题组通过分析该束流测试的数据，测量得到太初3传感器芯片对粒子探测器的空间分辨率为4.78微米，达到课题考核指标。**

针对课题任务书其中一个关键指标，即所设计的硅传感器芯片能承受1Mrad以上的电离辐照剂量。课题组在北京同步辐射装置1W2B光束线（12 keV 同步辐射光）试验站，对太初3芯片进行了总电离剂量辐照的测试。在承受3MRad的电离辐照测试中，太初3芯片保持正常工作模式，芯片工作阈值与噪声各种性能基本没有变化。另外，课题组也对太初2芯片进行更高剂量的30Mrad的电离辐照，芯片的各种性能也基本没有变化。**在接受远高于1Mrad的辐照剂量后，硅传感器芯片仍能正常工作，其抗辐照性能达到任务书的考核指标。**

**b）研制出硅径迹探测器原型机。**

课题组利用所研制的太初3传感器芯片为基础，成功研制多层像素探测器原型机。课题组实现了轻薄的探测器结构，并且有足够的机械强度；开发了多层像素探测器的柔性电路板，高速电子学与数据采集系统，可以同时处理多个全尺寸太初传感器芯片的配置与数据读出。

和2023年4月在德国DESY研究所进行电子束流测试。DESY的电子束的能量是4～6GeV，计数率为1kHz。束流将穿过探测器原型机，在像素探测器中留下超过多个击中位置的信息。利用这些信息，课题组将进行径迹重建，探测器模块间的位置校准，**并通过离线分析束流数据得到所研发硅径迹探测器原型机的空间分辨率为4.9微米，达到课题考核指标。**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 课题目标 | 成果名称 | 考核指标2 | | | | 考核方式（方法）及评价手段4 | 最终指标状态 |
| 指标  名称 | 立项时已有指标值/状态 | 中期指标值/状态3 | 完成时指标值/状态 |
| 1针对下一代高能环形正负电子对撞机的物理需求，研发高空间分辨率，抗辐照的硅径迹探测器技术。  2. 通过研制高空间分辨率、低物质量的硅径迹探测器原型机，拟解决高精度粒子径迹重建与衰变顶点重建，从而精确测量希格斯粒子耦合常数（特别是与夸克、轻子的耦合常数）与电弱作用的关键参数。  通过设计抗辐照的径迹探测器，拟解决径迹探测器在下一代高能环形正负电子机的高亮度对撞环境中长时间、稳定工作的关键问题。  3. 研制出适用于下一代高能环形正负电子对撞机的硅径迹探测器原型机。  4. 本课题的成果将通过杂志文章、会议报告、探测器原型机的设计报告、测试报告等形式对探测器领域产生学术影响。 研发项目中拟研制的硅像素等先进探测器具有高空间分辨率和抗辐照等优异性能，可以广泛应用于核物理实验与粒子物理实验、同步辐射成像与X射线成像、医疗成像、航空航天探测等重要领域。 | 研制硅径迹探测器原型机 | 硅径迹探测器原型机的空间分辨率 | 无 | 研制出小型传感器芯片，像素单元尺寸小于或等于25微米 ×25微米。 | 3-5 微米 | 同行专家评审。  (通过束流实验，离线分析数据获得空间分辨率。该测试结果写入原型机设计与测试报告，以供同行专家评审) | 太初3传感器芯片空间分辨率为4.78微米;  原型机的空间分辨率为4.9微米 |
| 所设计的抗辐照硅传感器能承受的总剂量 | 无 | 完成传感器的初步设计，通过仿真初步验证其抗辐照性能 | 1 MRad | 同行专家评审 (提供传感器的设计与测试报告供专家评审) | 在接受远高于1Mrad的辐照剂量后，硅传感器芯片仍能正常工作，其抗辐照性能达到任务书的考核指标 |

2. 课题重要调整情况

对课题主要研究内容和考核指标调整、课题承担/参与单位变更、课题负责人变更、项目骨干、课题执行期变更等调整情况进行说明（如无调整此项不需填写）。

无

二、取得的重要成果及效益

1. 取得的重要进展及成果

简要介绍课题研究工作的重要进展、重要成果及应用前景。

课题组成功研制出全面积全功能的太初3原型芯片，**这是国内研制的首个全尺寸全功能的CMOS单片集成像素型粒子传感器芯片**。**该硅传感器芯片具有高空间分辨率和抗辐照等优异性能**。束流测试中验证其对单个带电粒子的空间分辨率好于5微米；在辐照实验中，验证了其可以承受超过3Mrad的电离辐照。该传感器芯片未来可以广泛应用于核物理实验与粒子物理实验、同步辐射成像与X射线成像、医疗成像、航空航天探测等重要领域。

2. 经济社会效益

重点阐明课题研究对学科/行业产生的重要影响，对社会民生、生态环境、国家安全等的作用，以及研究成果的合作交流、转移转化和示范推广情况，人才、专利、技术标准战略在课题中的实施情况等。

本课题中成功研制的硅传感器芯片具有高空间分辨率和抗辐照等优异性能，未来可以广泛应用于核物理实验与粒子物理实验、同步辐射成像与X射线成像、医疗成像、航空航天探测等重要领域。其中的新技术的研究成果未来将可以转化到相关的医疗成像仪器与同步辐射成像与X射线成像仪器的企业，使相关企业的产品成像分辨率提高，并使其产品在高辐照环境下使用寿命更高，从而带来可观的经济效益。另外，该硅径迹探测器技术有望在将来应该在我国卫星与空间站等科学项目中。

通过本课题研制硅径迹探测器，本课题培养多名博士研究生，掌握了先进成像型CMOS探测器的设计与测试；其中一名博士研究生在华为公司从事芯片研发工作。

另外，本课题在硅探测器冷却方面申请并获批了两个专利，对未来硅探测器的冷却系统的研发起到重要作用。

三、人员及资金投入使用情况

1. 人员及资金使用情况

对照课题任务书阐述人员投入情况，课题资金（包括中央财政资金、地方财政资金、单位自筹资金和其他渠道资金等）到位、拨付、支出和资金管理使用、监督情况等，并填写经结题审计后的《课题资金支出情况表》。

本课题共有4家单位，其中中国科学院高能物理研究生为课题承担单位，南京大学、山东大学、西北工业大学为参与单位，课题预算经费1200万（直接经费1047.7万，间接经费152.3万）；其中中科院高能所直接经费650.15万，间接经费77.95万；南京大学直接经费87.53万，间接经费15.78万；山东大学直接经费183.01万，间接经费34.88万；西北工业大学直接经费127.02万，间接经费23.68万；课题资金已经全部到位，并按照课题任务书约定拨付足额拨付给课题参与单位。截止到结题审计时间，课题经费支出1060.8万（直接经费912.2万，间接经费148.6万）；其中中科院高能所支出直接经费591.1万，间接经费77.9万；南京大学支出直接经费87.6万，间接经费15.7万；山东大学支出直接经费124.8万，间接经费34.9万。西北工业大学支出直接经费76.9万，间接经费20万。

**课题资金支出情况表**

金额单位：万元

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 填表说明：1. 预算批复数以任务书批复的金额为准，如有调整，以履行报批程序后专业机构批复的金额为准；  2. 账面支出数为项目执行周期内实际支出数；  3. 账面结余数为预算批复数减去账面支出数。 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 序号 | 课题  编号 | 课题承担单位 | 预算批复数 | | | | 账面支出数 | | | | 账面结余数 | | | | 是否为预算内单位 |
|  |  |  | 中央财政专项资金 | | 其他来源资金 | 合计 | 中央财政专项资金 | | 其他来源资金 | 合计 | 中央财政专项资金 | | 其他来源资金 | 合计 |  |
|  |  |  | 直接  费用 | 间接  费用 |  |  | 直接  费用 | 间接  费用 |  |  | 直接  费用 | 间接  费用 |  |  |  |
|  | （1） | （2） | （3） | （4） | （5） | （6） | （7） | （8） | （9） | （10） | （11） | （12） | （13） | （14） | （15） |
|  |  |  | 1047.7 | 152.3 | 0 | 1200 | 912.2 | 148.6 | 0 | 1060.8 | 135.6 | 3.6 | 0 | 139.2 | 是 |
| 累计 | | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | / |

注：采用计提方式列支间接费用的课题，计提数则为账面支出数，无需填写计提后的详细支出情况。

2. 资金调整情况

如出现课题执行过程中需报批的预算调整事项，以及资金未及时到位、停拨、迟拨等特殊情况，请详细说明原因。

无

四、组织实施管理情况及重大问题、建议

无

五、课题任务书中有特殊约定或其他需要说明的事项