



强核辐射环境用电子系统与智能装备研究

报告人：李豫东

中国科学院新疆理化技术研究所

一

背景及现状

二

我们的解决方案

三

已有的研究进展

四

后续研究计划

五

固体辐射物理团队简介

一

背景及现状

二

我们的解决方案

三

已有的研究进展

四

后续研究计划

五

固体辐射物理团队简介

一、背景及现状

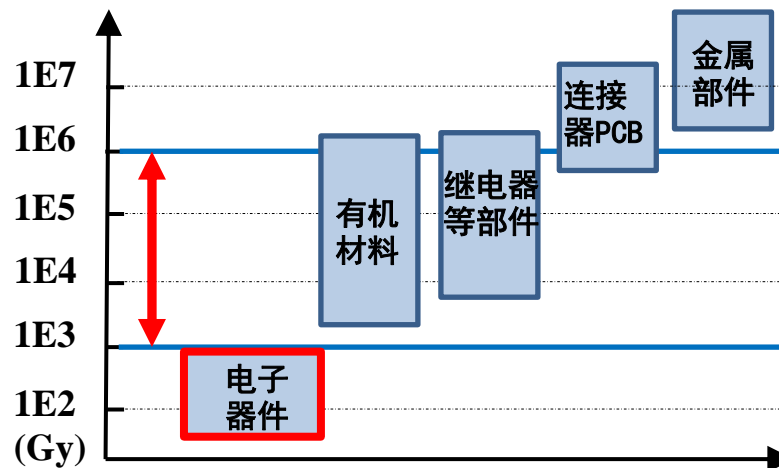


研究背景

- 核工业反应堆运维、乏燃料后处理、核事故应急、核设施退役等场景都是强辐射环境，需要应用抗辐射智能装备实现远程遥操作，福岛核事故表明抗辐射装备对核工业至关重要
- 强辐射下装备需耐受 $1E3 \sim 1E6$ Gy累积剂量，工业级电子器件与系统抗辐射性能 $< 1E3$ Gy，甚至200 Gy失效
- 具备强抗辐射性能的智能装备研发是行业内长期未能良好解决的问题

强辐射作业工况的剂量率与总剂量

辐射环境	剂量率范围	设备需要耐受的辐射剂量
反应堆运维检修	$1E3 \sim 1E4$ Gy/h	$1E4 \sim 1E6$ Gy
乏燃料后处理	$10 \sim 1E3$ Gy/h	$1E4 \sim 1E6$ Gy
核事故应急	$1E2 \sim 1E4$ Gy/h	$1E3 \sim 1E5$ Gy
核设施退役	$0.1 \sim 1E4$ Gy/h	$1E3 \sim 1E6$ Gy



半导体器件是设备抗辐射的薄弱环节

一、背景及现状



研究背景

■ 我国核电规模迅速增大，核电走出去是国家战略：

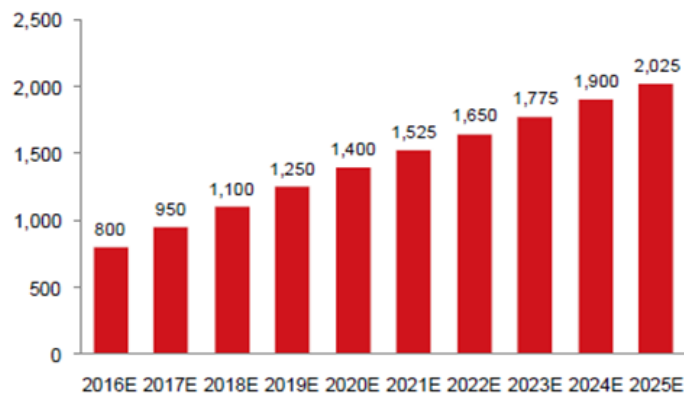
- 核电运维周期1-1.5年，运维量迅速增加，正大规模建设乏燃料后处理体系
- 核设施退役处理高度依赖自动化、智能化，秦山一期等2024年将陆续退役
- 安全是核工业生命线，核应急保障能力仍有待加强，核应急体系尚需完善

■ 对抗辐射智能化装备有着大量且迫切的需求：

- 视频设备、照明系统、巡检机器人、应急机器人、搬运切割等作业机器人、去污机器人.....



我国核电装机容量的发展及趋势



我国乏燃料累计存量测算（吨）

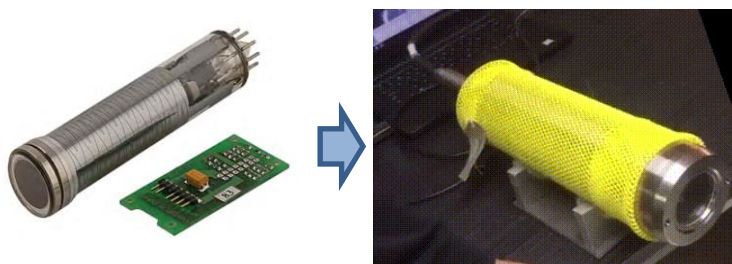


一、背景及现状

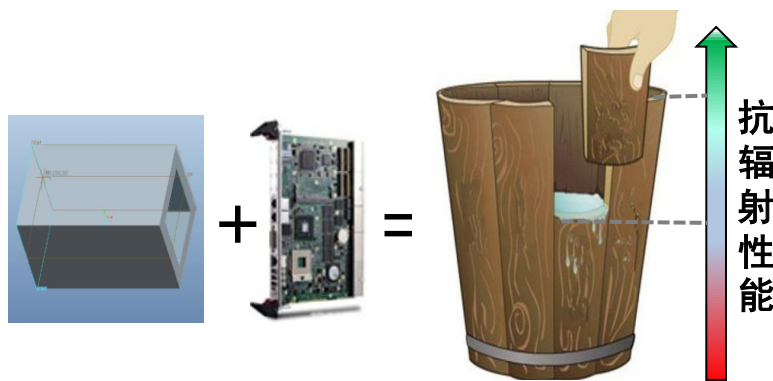


研究现状

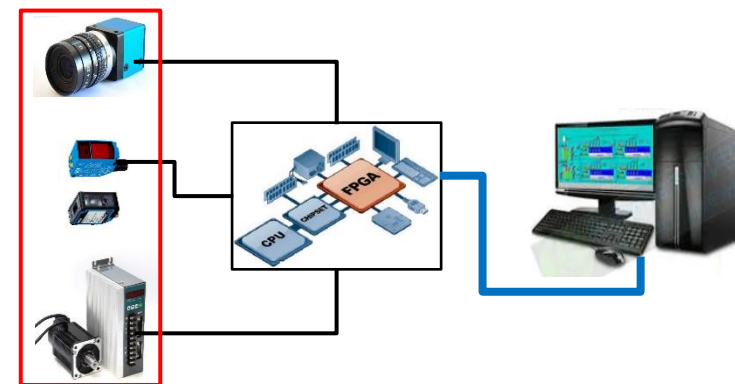
- 目前国内外核工业自动化、智能化程度低于其他工业领域，在装备抗辐射设计方面，主要采用重金属屏蔽防护、敏感电子系统后置的方法解决抗辐射问题：
 - 屏蔽防护后装备体积、重量、功耗难以承受（相机 > 20kg、机器人 > 500kg）；无法弥补系统和整机抗辐射的短板，抗辐射性能仅500~1000 Gy
 - 视觉、传感、驱动等电子系统难以后置处理，智能传感、先进计算、高速传输技术难以获得应用，无法适应核工业数字化、智能化的发展需求



真空摄像管：500×300、黑白、模拟信号



铅钨屏蔽使装备十分笨重，单台相机 > 20kg



成像、传感、驱动部分无法后置

一、背景及现状



研究现状

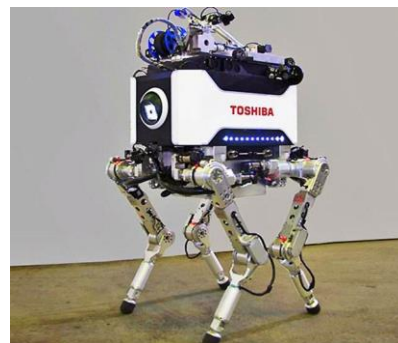
- 福岛核事故后，从事抗辐射装备研发的机构大幅增加，国外基于屏蔽防护技术，形成了视频相机、巡检机器人、作业机器人等产品，标称的抗辐射指标很高 $1E3 \sim 1E6$ Gy
- 国内抗辐射装备研发尚有差距，装备以进口为主（Brokk, Kuka, Mirion, Emers），实际应用中发现进口装备抗辐射性能不达标，目前没有统一的抗辐射性能验证规范
- 近年来，国内外对电子系统抗辐射加固技术也越来越重视，针对航天研发的宇航级抗辐射芯片由于成本高昂、抗辐射性能有限等问题，还没有在核工业装备研发中广泛应用



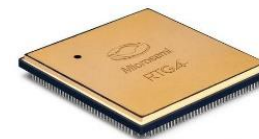
抗辐射视频相机



BROKK退役机器人



东芝核工业机器人



单价数万元的宇航芯片
(抗辐射一般到1000 Gy)

一、背景及现状

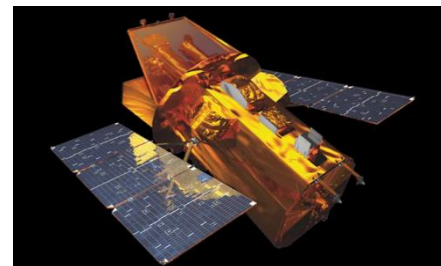


研究现状

- 国内外针对空间辐射环境、核爆环境，在电子器件与系统辐射效应机理、试验评估、抗辐射加固技术方面已开展了大量研究，产生大批实用性成果
- 但是核工业辐射环境在辐射成分、强度、作用时间等方面与空间辐射环境有很大差异，现有针对空间与核爆环境的电子系统加固技术无法直接应用
 - 核工业强辐射环境具有高剂量率、高累积剂量的特点，且装备要求具备实时连续操作能力

核辐射环境与空间辐射环境的差异

	空间辐射环境	核燃料检查处理	核应急
辐射成分	电子,质子,重离子	γ ,中子, α , β	γ ,中子, α , β
作用时间	1-10年	几天至几年	几小时至几天
累积剂量	1E2-1E3 Gy	1E2-1E6 Gy	1E4-1E6 Gy
剂量率	小于mGy/h	1E3-1E4 Gy/h	1E2-1E4 Gy/h





一

背景及现状

二

我们的解决方案

三

已有的研究进展

四

后续研究计划

五

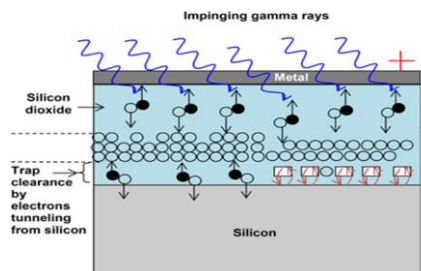
固体辐射物理团队简介

二、我们的解决方案

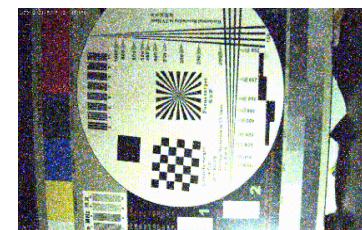
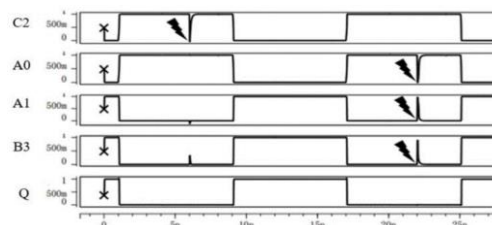
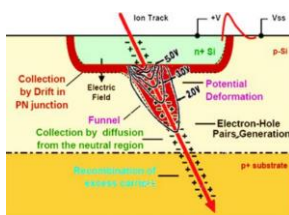


基本原理

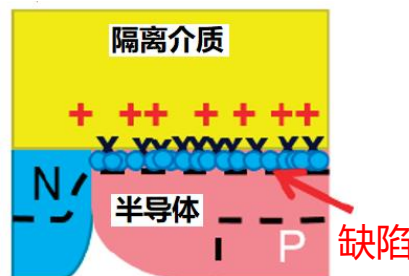
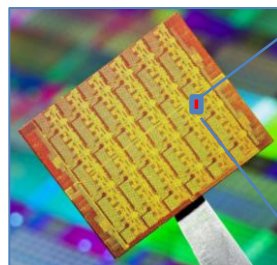
■ 辐射损伤的基本物理过程:



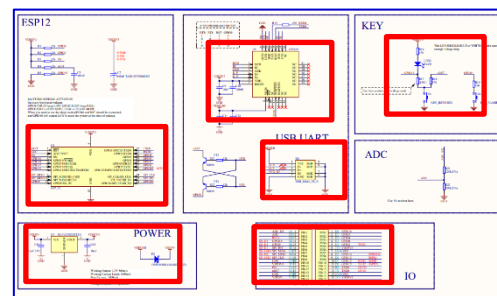
电子器件



随辐射剂量累积逐渐显著



器件单元

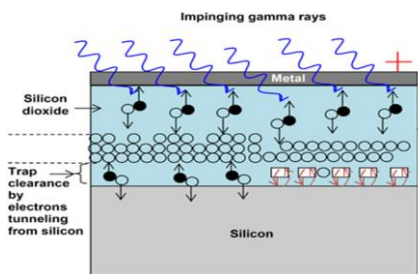


二、我们的解决方案



解决方案

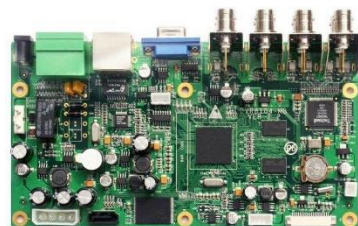
- 从电子器件与系统辐射损伤的物理过程出发：
 - 通过抗辐射筛选、电路加固设计流片，解决器件抗辐射问题
 - 通过系统级的软硬件加固设计，实现电子系统的抗辐射加固
 - 通过系统集成，研发出系列化高抗辐射装备，实现行业应用
- 解决关键科学问题，攻关共性关键技术，并建立相关技术指南与规范，形成技术体系



辐射损伤的物理过程



器件抗辐射加固



系统抗辐射加固



抗辐射装备



规范、标准

二、我们的解决方案



关键技术分析

- 先进驱动控制：系统运动、行走、越障、支撑
 - 有轮式、履带、吸盘或旋翼等：强动力、快速、灵活、准确定位避障
- 灵巧末端执行：搬运、抓取、焊接、切割、安装
 - 有多自由度机械臂、柔性机械手：高定位精度、低超调量、高稳定性
- 远程实时传输：远程实时操控、数据上下行传输
 - 适应核设施内复杂路径、管道、狭小空间：实时性、连续性、电磁兼容
- 抗辐射加固：组件、系统在强辐射下正常运行
 - 高剂量率下能稳定工作、高累积剂量下功能正常，保证实时性、连续性

其中，抗辐射加固是共性关键技术，需要解决视觉成像、控制处理、功率驱动、数据传输等几类电子系统

二、我们的解决方案



研究重点

- 强辐射下电子器件辐射效应机理与加固技术
 - 强辐射下器件效应机理、评估技术、加固技术——器件抗辐射筛选及加固
- 强辐射环境用电子系统加固技术
 - 典型电子系统的加固设计——视觉成像、控制处理、功率驱动、数据传输
- 强核辐射环境应用的典型抗辐射组件与模块
 - 光机电的一体化集成、性能验证——视频相机、传感器模块、机器人模块
- 抗辐射加固方法、技术规范
 - 核工业抗辐射装备技术指南、抗辐射性能验证规范

一

背景及现状

二

我们的解决方案

三

已有的研究进展

四

后续研究计划

五

固体辐射物理团队简介

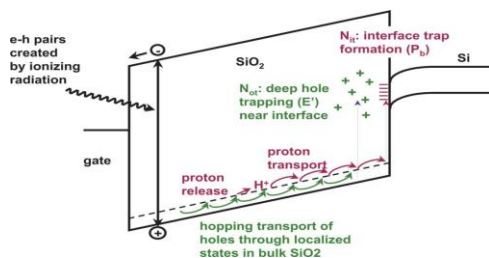
三、已有的研究进展



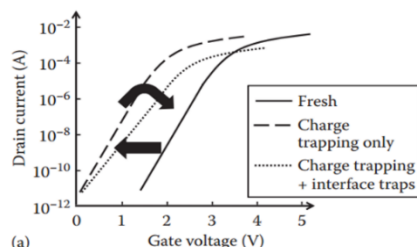
器件辐射效应

- 获得了典型模拟、数字、光电、功率器件在不同剂量率 ($1E1 \sim 1E4$ Gy/h) 及高累积剂量 ($2E5Gy \sim 1E6Gy$) 的累积辐射效应 (电离总剂量、位移损伤)、瞬时效应规律, 分析了相关机理

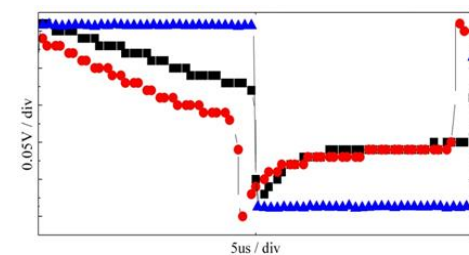
电离总剂量效应



累积产生陷阱电荷

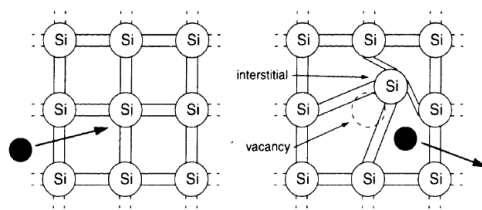


参数的漂移

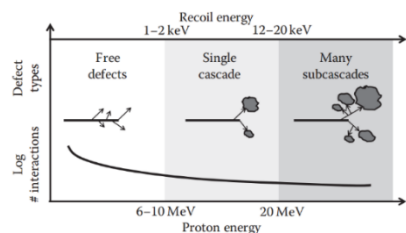


电路性能退化、功能失效

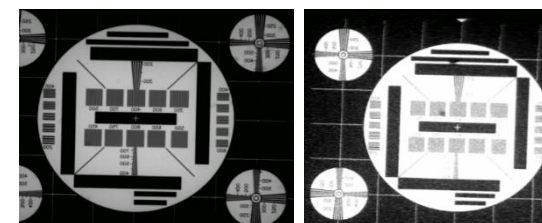
位移损伤效应



晶格原子位移

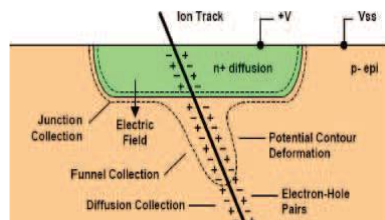


缺陷对半导体特性的影响

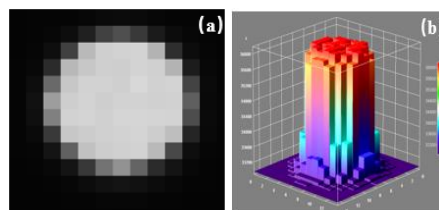


成像性能下降

瞬时效应



电离产生电荷



器件产生瞬态亮斑



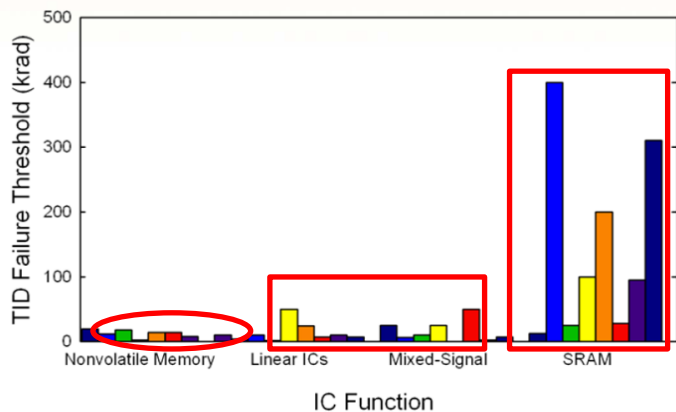
图像产生噪点

三、已有的研究进展

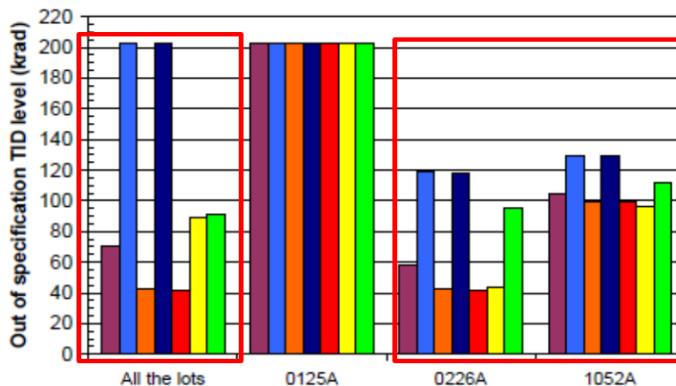


器件抗辐射筛选

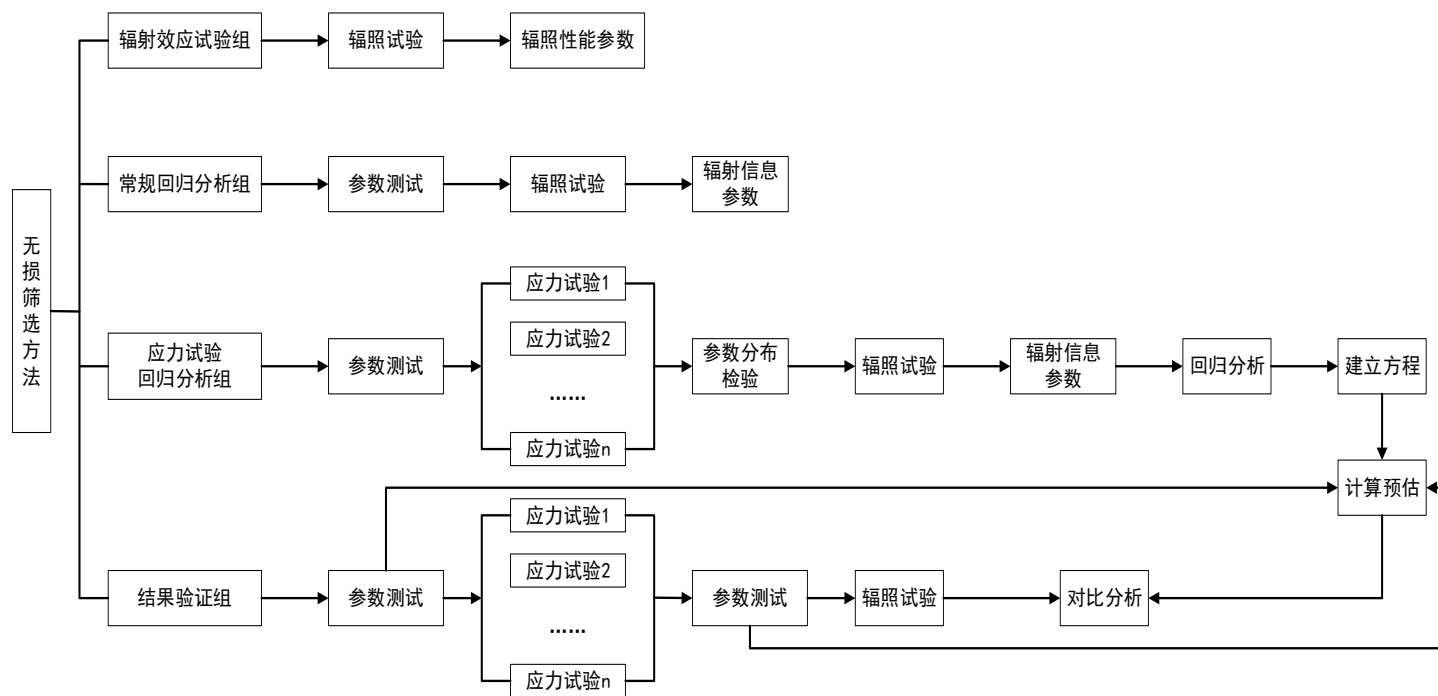
- 基于电子器件辐射效应与工艺参数关联性的研究，建立了商用器件抗辐射能力筛选方法；建立了器件辐射效应数据库，收集了包括模拟、光电、数字、功率四大类器件的数据



不同类器件抗辐射能力



工艺批次对商用器件抗辐射能力的影响



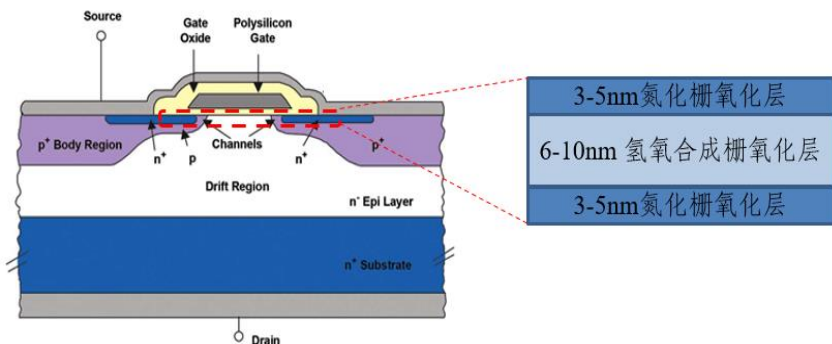
商用器件抗辐射能力筛选方法

三、已有的研究进展

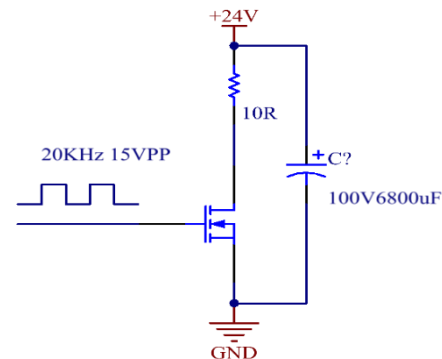


器件抗辐射加固

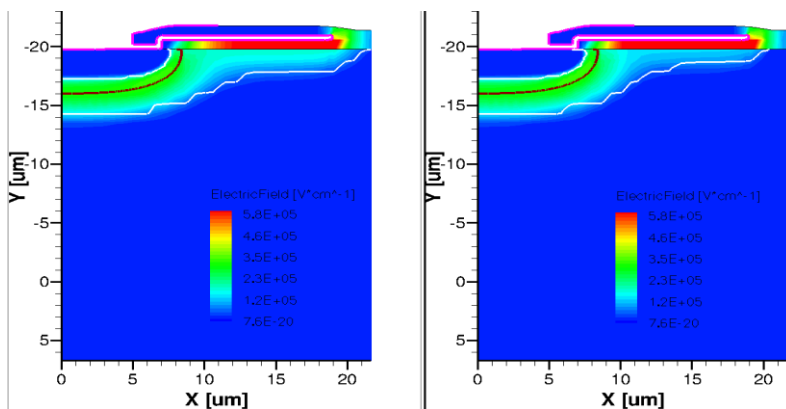
- 针对功率VDMOS，采用具有抗辐照优势的元胞结构对器件进行结构设计，采用材料结构、生长温度、厚度等关键工艺参数的优化，实现栅氧化层、终端区多晶板的加固设计



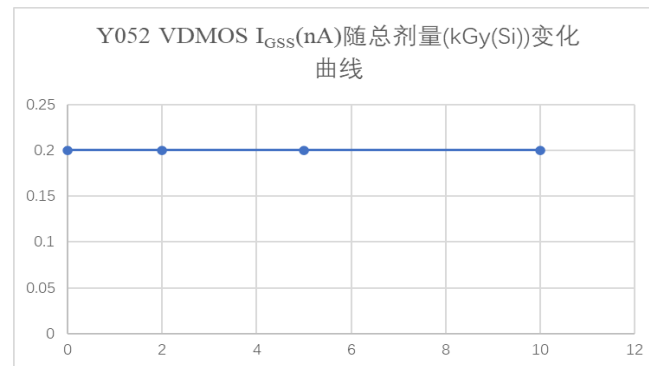
栅氧化层介质优化设计



辐照偏置状态



终端区多晶场板加固设计



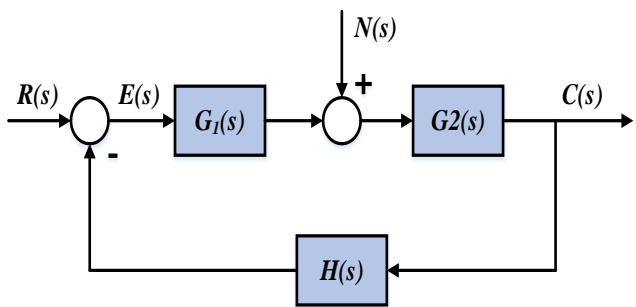
1E4 Gy下栅源漏电流没有明显变化

三、已有的研究进展

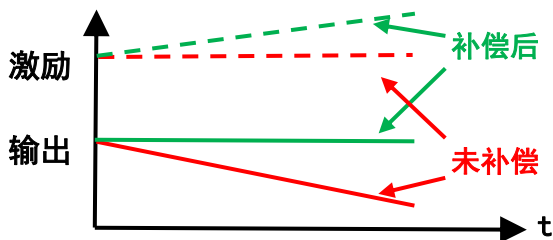


系统级抗辐射设计

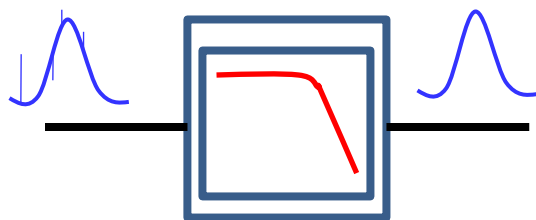
- 采用反馈、补偿、滤波、冗余等软硬件设计方法，进行了系统级软硬件加固设计，研发出高抗辐射的视觉成像模块、信号处理模块、功率供电模块、数据传输模块



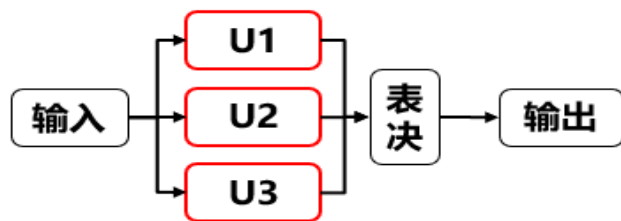
反馈设计



补偿抑制参数漂移



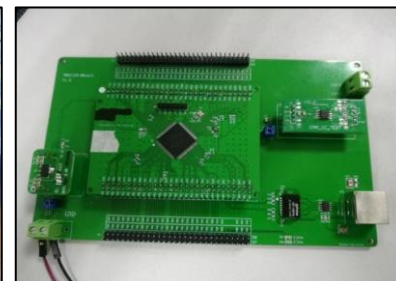
信号滤波示意图



冗余设计



视觉成像模块



信号处理控制模块



功率供电模块



数据传输模块

三、已有的研究进展

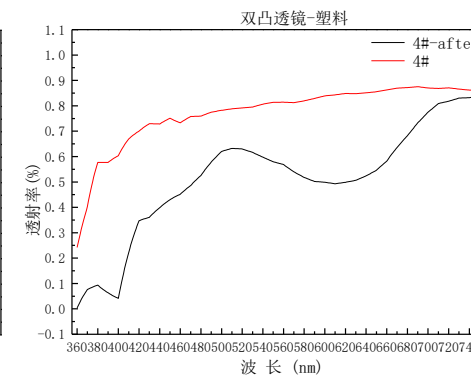
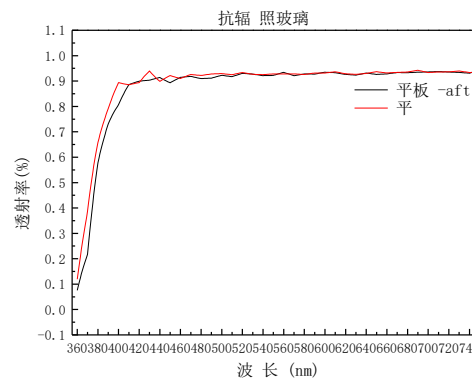
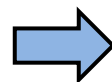


抗辐射光学镜头

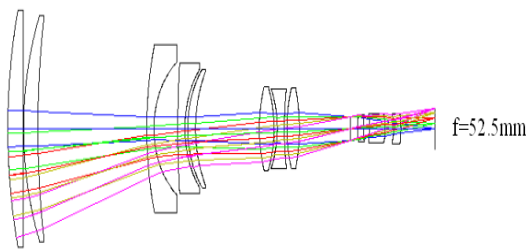
- 抗辐射光学镜头：潜望式镜头、无畸变定焦镜头、微型定焦镜头、6倍光学变焦镜头，抗辐射 $1E4 \sim 1E5$ Gy



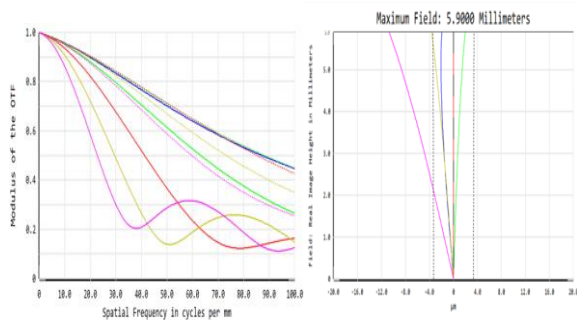
光学材料辐照试验



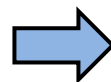
光学材料抗辐射测试筛选



定制化的光学设计



传函、倍率色差、畸变计算



潜望式镜头



无畸变镜头



6倍变焦镜头



微型定焦镜头

三、已有的研究进展

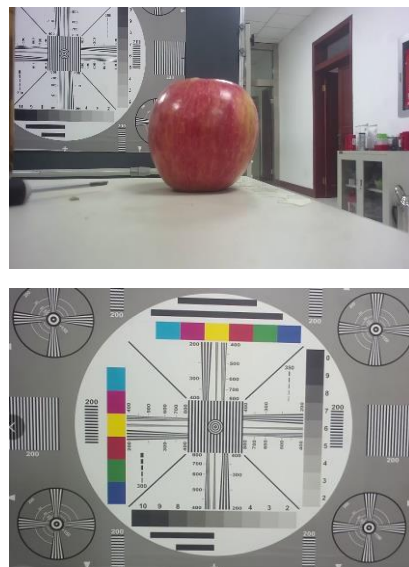


抗辐射相机

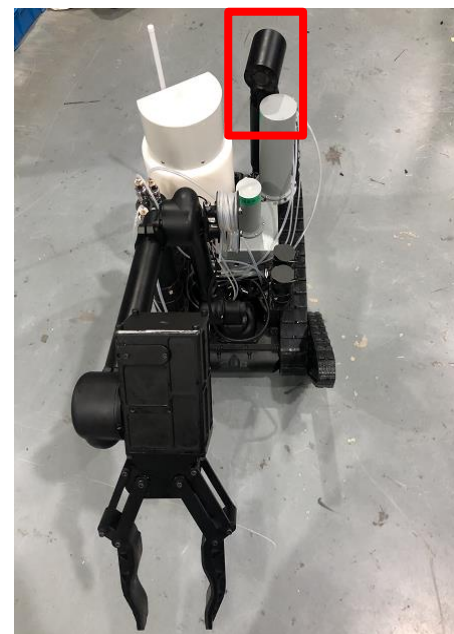
- 2020年研发出首款抗辐射视频设备样机：交付中核、中广核相关单位及新松机器人，成功应用于核电运维、核工业机器人研发，并交付总体单位用于陆军防化机器人任务竞标
 - 高清彩色 (1920×1080)、30fps, 兼容网络视频接口
 - 抗辐射性能：剂量率1000 Gy/h, 总剂量 > 3E3 Gy
 - 尺寸：3.5cm×6cm×12cm, 重量仅350克 (国内同类产品1000Gy, 重量 > 20千克)



首款抗辐射视频设备样机



高清彩色成像效果



应用于防化机器人装备

三、已有的研究进展



抗辐射相机

- 基于抗辐射镜头、抗辐射成像电路，研制了系列抗辐射相机产品：
 - 高抗辐射：总剂量 $\geq 1E4Gy$ ，剂量率 $\geq 1E3Gy/h$
 - 高性能：高清彩色、高速实时、小型轻量化
- 适用于核工业机器人视觉、视频监控、水下视频检查等多场景
 - 应用于核电运维、核应急机器人，交付总体单位用于核生化侦察机器人研制



Φ25mm相机



Φ36mm潜望式相机



机器人视觉相机



高变倍监控相机



水下视频检查设备



带云台水下视频相机

三、已有的研究进展



抗辐射相机

- 智能化噪点去除：高能射线入射图像传感器，必然引起大量噪点，导致成像质量显著下降
 - 建立图像、视频流中特征轮廓在空域、时域中的光流运动模型
 - 结合连续运动矢量和深度学习特征模型，既去除了辐射噪点，又保留了图像细节



Co-60放射源
(侧视图)

强辐射下高噪图像抑制算法



Co-60放射源
(俯视图)

降噪关

强辐射下 (1000Gy/h) 噪点抑制算法

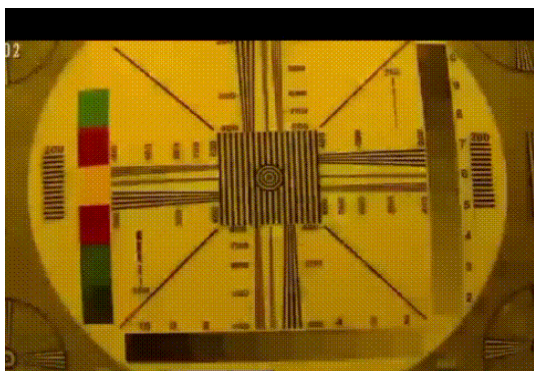
三、已有的研究进展



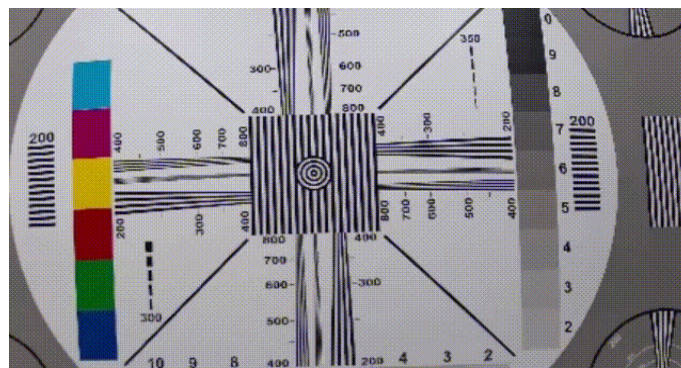
抗辐射相机

■ 智能化处理：针对辐射导致成像退化的规律，开发了智能处理、自动补偿及数据压缩算法

➤ 自动白平衡：校准RGB值，还原真实色彩



➤ 自动曝光算法：调整最佳曝光值，适应弱光场景



➤ 自动对焦算法：定位最佳清晰度位置



➤ H.264/265实现低码率，与兼容网络监控及组网

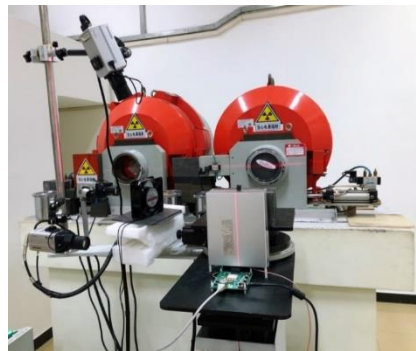


三、已有的研究进展



辐射探测器

- 基于闪烁体+SiPM的高灵敏度、能谱探测系统
 - 剂量率范围: $1E-7Gy/h \sim 100Gy/h$
 - 能量分辨率: $\leq 10\% @ 662keV$
- 基于自由空气电离室的高剂量率探测系统
 - 剂量率范围: $10Gy/h \sim 1000Gy/h$
 - 抗总剂量: $\geq 1E4 Gy$



中国原子能院⁶⁰Co源



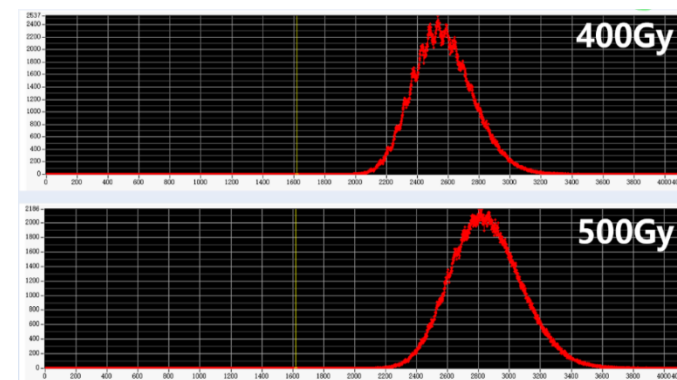
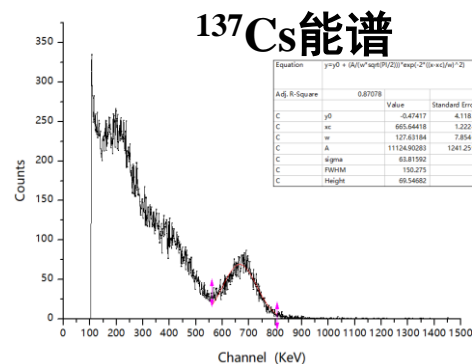
中国辐射防护院⁶⁰Co源



中科院新疆理化所⁶⁰Co源



辐射探测器及读出电子学



能量分辨率: $10\% @ 662keV$

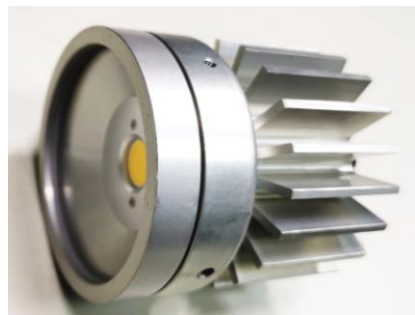
三、已有的研究进展



抗辐射照明光源

1. 热室用泛光光源:

- 最大总剂量: 5E5Gy
- 典型照度: 3000lm
- 显色指数CRI: ≥ 90
- 色温: 4000K
- 发光角度: 120°



抗辐射泛光光源

2. 水下用泛光光源

- 最大总剂量: 5E5Gy
- 典型照度: 2400lm
- 显色指数CRI: ≥ 90
- 色温: 4000K
- 防水级别: IP68



抗辐射水下泛光光源

3. 后处理厂房照明光源

- 最大总剂量: 1E6Gy
- 典型照度: 13000lm
- 显色指数CRI: ≥ 80
- 色温: 4000K
- 防水级别: IP65



后处理热室照明光源

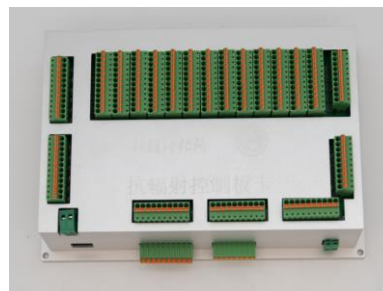
三、已有的研究进展



抗辐射控制处理、驱动模块

■ 抗辐射控制板卡：功能及资源可深度定制

- 抗辐射能力：> 1E4 Gy
- 通信方式：网络、CAN、232、SPI
- IO：定制电压值，12bit ADC
- PWM功率输出...



抗辐射机器人控制及信号处理系统

■ 抗辐射电机驱动：参数可定制

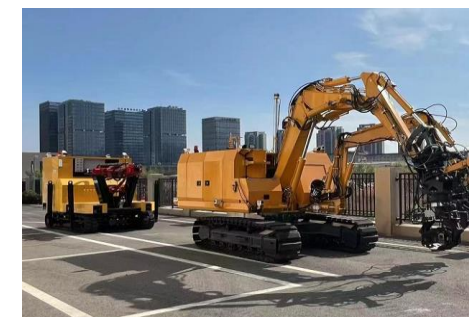
- 抗辐射能力：> 1E4 Gy
- 控制方式：网络、CAN、PWM波
- 具备电流检测功能
- 具备紧急停止功能
- 电机功率：≤48V/36A



抗辐射机器人驱动器



新松核应急机器人



中广核重点研发计划涉核机器人

三、已有的研究进展



抗辐射机器人样机

■ 抗辐射机器人样机 (剂量率 $1E3$ Gy/h, 总剂量 $1E4$ Gy) :

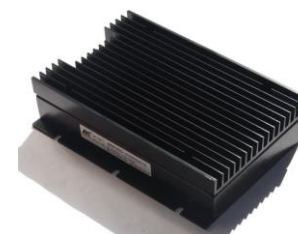
- 机器人驱动器: 网络通讯, 可驱动直流、步进电机; 机器人控制器: 信号处理、数据通讯, 支持网络、CAN等; 机器人电源模块: 输出电压 $0.5V\sim 36V$, 输出电流 $5A$, 转换效率 85% , 可进行定制
- 集成后的抗辐射机器人样机, 达到剂量率 $1E3$ Gy/h, 总剂量 $1E4$ Gy的指标



抗辐射驱动器



抗辐射控制器



抗辐射电源模块



三、已有的研究进展



总体水平

- 上述样机实现了高抗辐射性能，而且体积小、重量轻，抗辐射相机等技术指标已可对标国际同类产品，在国内核工业行业已具备一定影响力
- 获首届科技部颠覆性技术创新大赛优胜奖，抗辐射相机入选中科院2021自主研制仪器名录
- 成为了中核、中广核合格供应商，获应用证明5份，国际核工业展（2021）上，抗辐射相机供应商ERMES提出代理产品销往欧洲核工业市场

抗辐射相机与国内外水平的对比

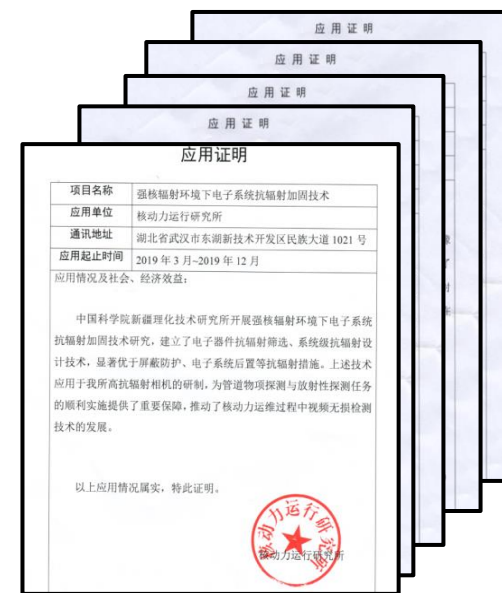
	国际先进	国内其它 现有产品	新疆理化所
抗辐射性能	> 1E4 Gy	1E3 Gy	1E4 Gy
常规性能	1080p, 30fps	工业机芯	1080p, 30fps
智能化水平 (ISP、去噪)	半智能	非智能	半智能
相机重量	8~20kg	15~20kg	350g~3.3kg



核工业机器人联盟会议



2021中国核工业展



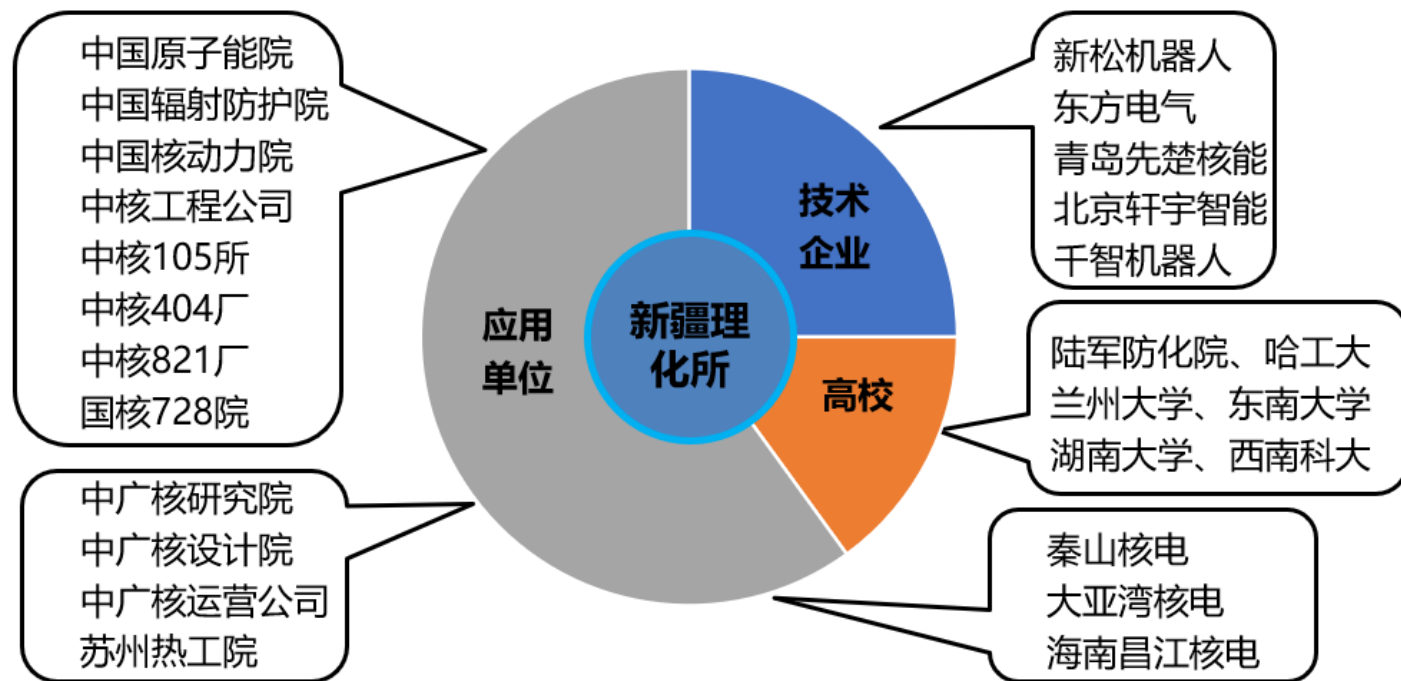
技术应用证明

三、已有的研究进展



行业合作

- 核工业智能装备研发越来越受重视，我们在抗辐射关键技术方面已发挥小核心的作用，为核工业单位、技术企业、技术研发机构及高校提供产品及技术服务
- 成为核工业机器人与智能装备创新联盟理事单位，与中核105、中广核研究院、秦山、大亚湾、404厂、821厂、中辐院、新松机器人建立了战略合作关系



一

背景及现状

二

我们的解决方案

三

已有的研究进展

四

后续研究计划

五

固体辐射物理团队简介

四、后续研究计划

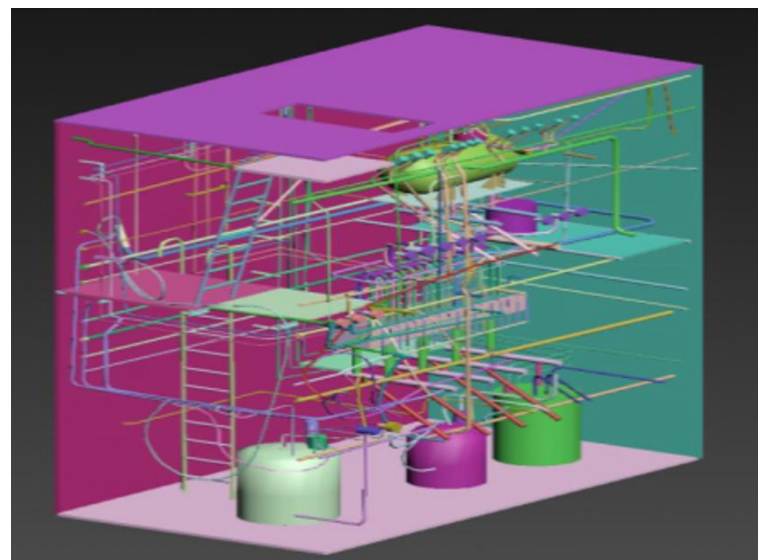


技术趋势

- 核工业对智能装备的需求日益迫切，目前强辐射环境用抗辐射装备尚未取得实质性突破
 - 制约着装备关键技术的发展：先进驱动机构、灵巧末端执行机构、实时控制与遥操作、数据传输
 - 数字化、网络化、智能化等先进工业技术难以获得应用：无线互联、智能传感、图像识别、自主导航、机器学习...



数字化、网络化、智能化技术



三维扫描重建

四、后续研究计划



研究计划

- 系列化抗辐射相机：
 - 不同等级、不同特点的抗辐射相机 (1E3Gy~1E6Gy)
 - 满足在役检查、热室监控、机器人可视化、视觉测量等应用

- 机器人抗辐射模块：
 - 驱动器、控制器、数据传输模块、传感器模块、照明光源

- 数字化传感器、仪表：
 - 数字化传感器 (温度、湿度、压力、气体、辐射剂量...)
 - 激光三维扫描与重建、热像仪...

- 智能化识别、运算模块：支持VR、AR、深度神经网络等应用

四、后续研究计划



研究计划

- 抗辐射评估与验证（辐照试验及测试）
 - 材料与器件
 - 组件、模块和设备
- 相关技术规范、验证标准的制定
 - 产品抗辐射设计规范
 - 组件和设备抗辐射性能验证标准

未来与高校、企业深入合作，优势互补、协同创新，满足行业定制化需求，推动技术进步！

一

背景及现状

二

我们的解决方案

三

已有的研究进展

四

后续研究计划

五

固体辐射物理团队简介

五、 固体辐射物理团队简介



发展概况

- 新疆理化所固体辐射物理团队在国内最早开展电子器件总剂量效应研究
 - 指导研制出我国首批CMOS加固电路，用于“东方红三号”；研制出首套PMOS空间辐射剂量计，实现空间辐射剂量在轨测量；建立了多种新型器件辐射效应试验方法，应用于航天工程和国产元器件研制
 - 成果和技术应用于“北斗”、“风云”、“高分”、“核高基”等航天和元器件重大工程
- 是国家有关部门指定的元器件抗辐射考核试验单位，是航天科技集团一、五、八院的签约实验室，为航天、核技术、元器件领域上百家单位提供辐射效应试验评估服务

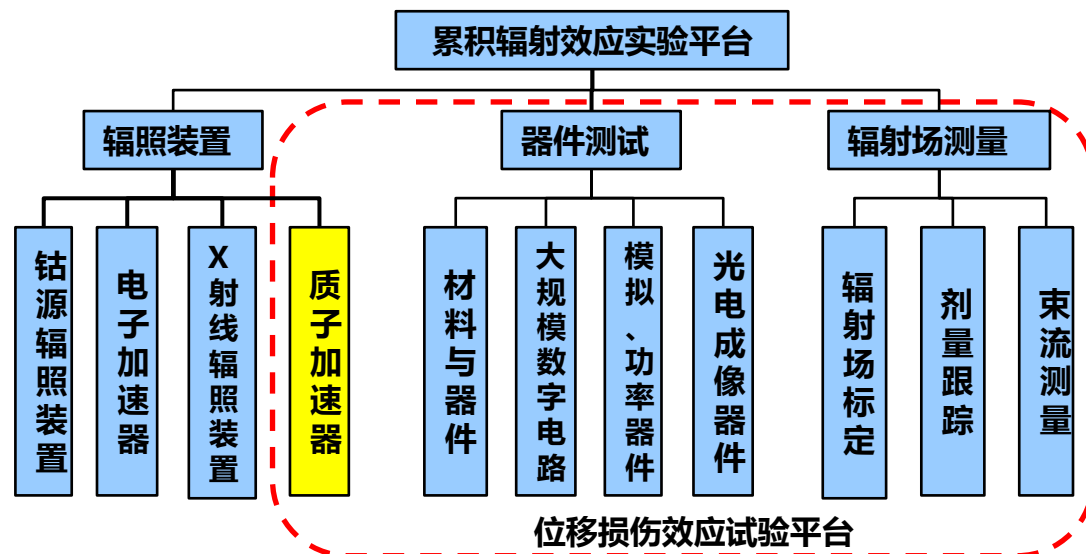


五、固体辐射物理团队简介



团队与平台

- 组建了由半导体物理、核技术、微电子、光学工程等多学科专业背景研究人员构成的创新团队：
 - 成员70人，研究员8人，副高6人，装发专业组专家1人，中科院元器件专家组专家1人，电子学会会士2人
 - 面向全社会培养抗辐射加固硕博士，毕业生已成为航天、核工业、集成电路领域的核心骨干
- 拥有由辐照装置、器件测试系统和辐射场测量设备构成的试验平台；具备辐射效应试验测试和损伤机理分析能力，形成了面向航天、核工业和元器件行业的共用技术平台

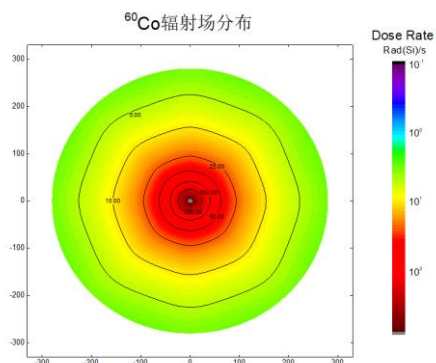
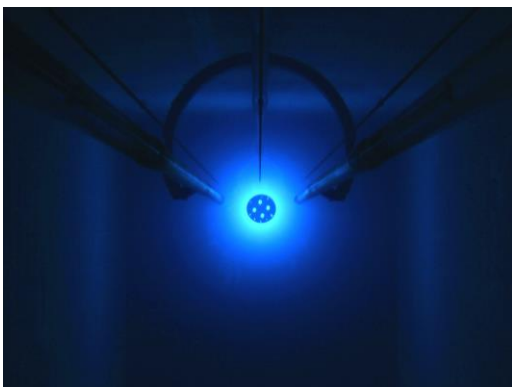


五、固体辐射物理团队简介



辐照装置

■ 钴源



高剂量率钴源:

γ 射线能量: 平均1.25MeV

圆柱形源棒

辐照室为同心圆剂量场

剂量率范围: 1 ~ 385 rad/s

3.6~1.4E4 Gy/h

低剂量率钴源:

γ 射线能量: 平均1.25MeV

圆柱形源棒, 扇形剂量场

辐照室面积: 60平米

剂量率范围: 1E-4 ~ 1 rad/s

■ 电子加速器



高频高压型电子加速器:

能量: 1.0 ~ 2.0 MeV

剂量率范围: 4 ~ 1E5 rad/s

■ X射线辐照装置



晶圆级器件辐照测试装置:

能量: 8~20 keV

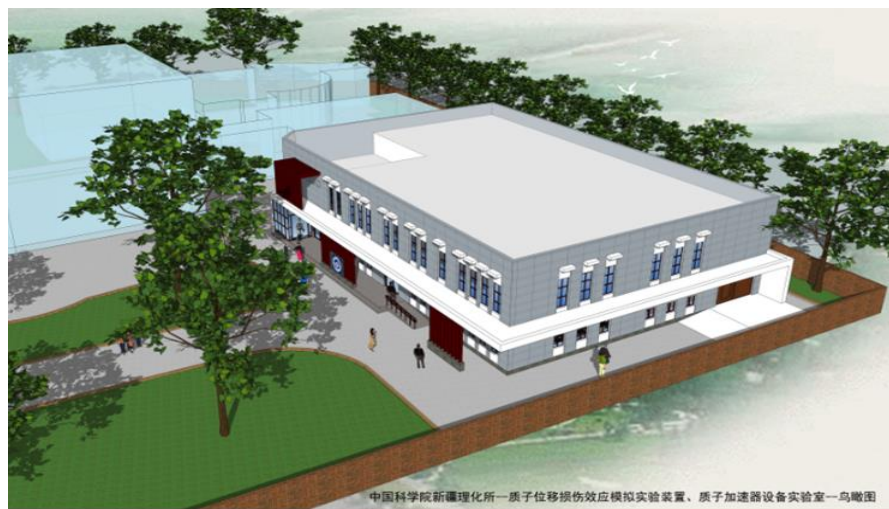
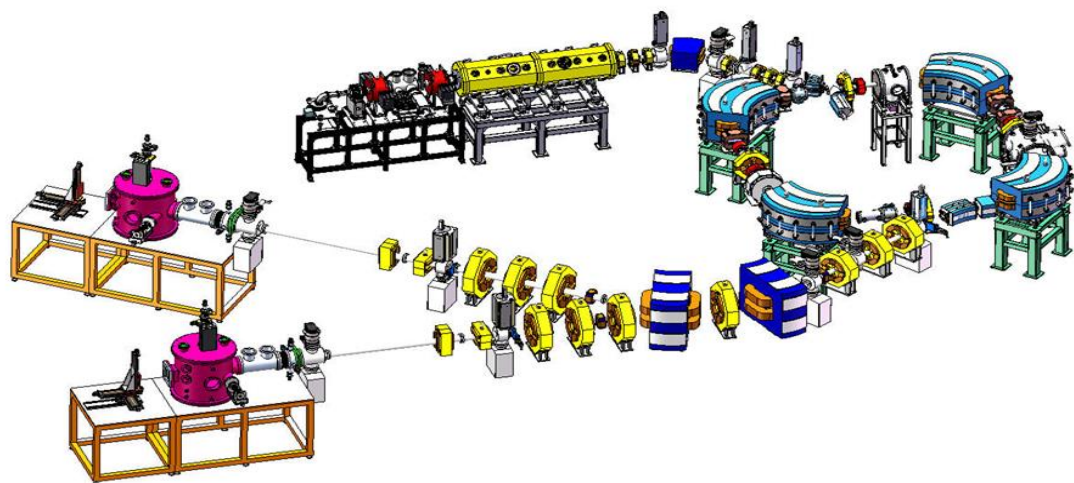
剂量率范围: 0.5 ~ 100 rad/s

五、固体辐射物理团队简介



辐照装置

- 在建10~60MeV能量段输出连续可调质子的加速器(PREF)，将应用于电子器件空间位移损伤试验，完善我国空间元器件保障技术体系
- 装置建成后将作为公共科研基础设施，为抗辐射加固、新型材料研发提供有效的试验和研究平台



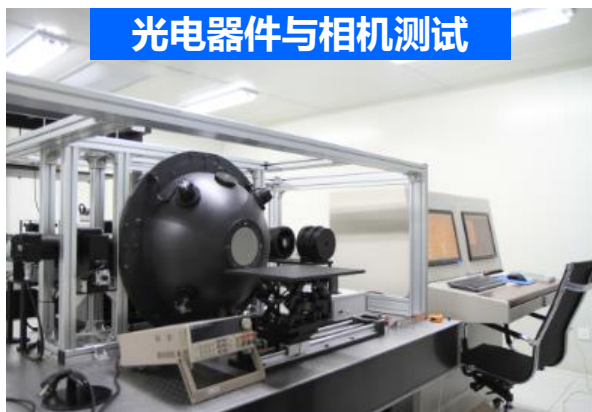
中国科学院新疆理化所—质子位移损伤效应模拟实验装置、质子加速器设备实验室—鸟瞰图

五、固体辐射物理团队简介

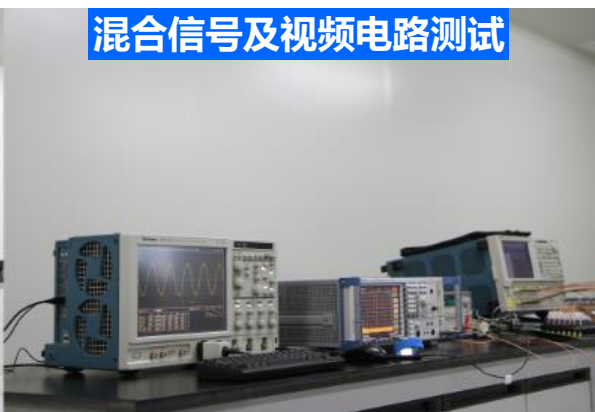


测试平台

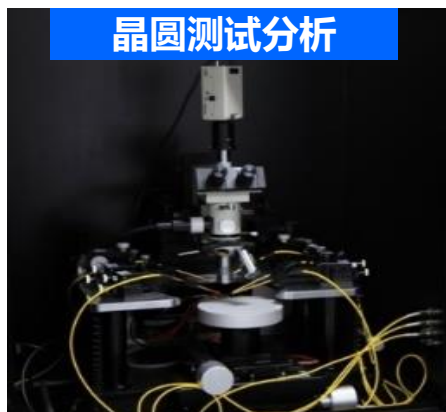
- 功能完整的电子器件测试平台，涵盖数字、模拟、光电、功率、微波射频等各类器件测试系统



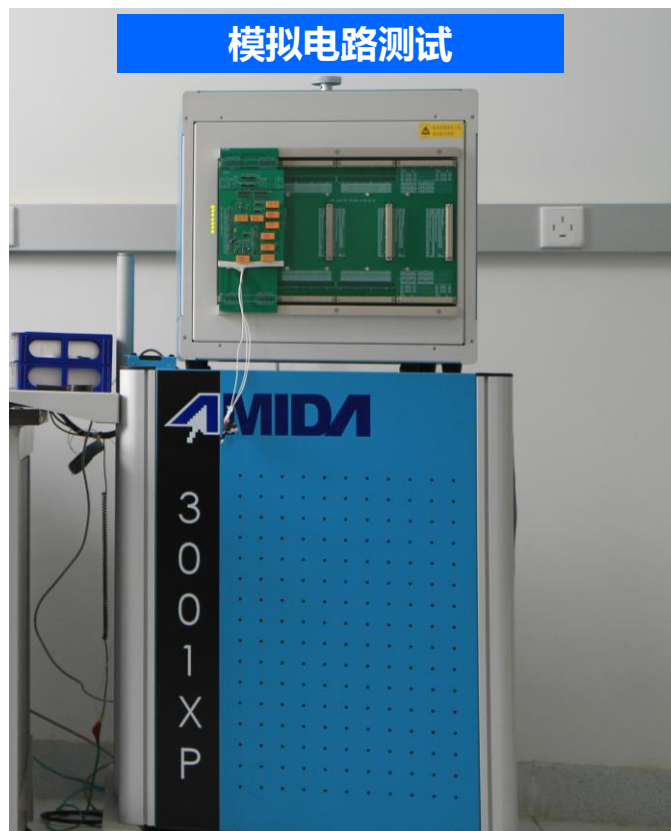
光电器件与相机测试



混合信号及视频电路测试



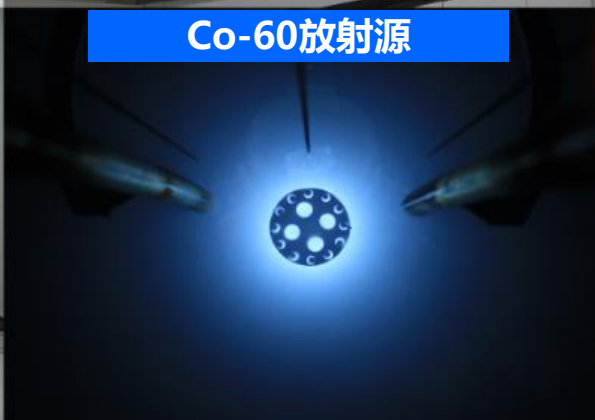
晶圆测试分析



模拟电路测试



超大规模电路测试



Co-60放射源



半导体参数分析

感谢聆听，请多多指导！

李豫东 15276736875
lydong@ms.xjb.ac.cn

中国科学院新疆理化技术研究所