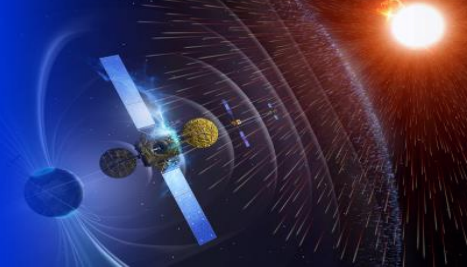


强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室
National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect

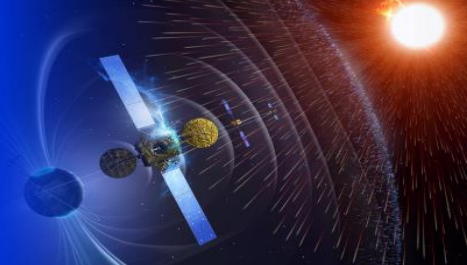
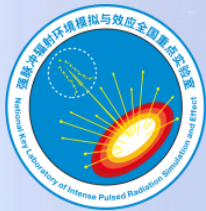


基于CSNS Back-n装置的 电子器件中子辐射效应研究

汇报人：陈伟

2023年9月

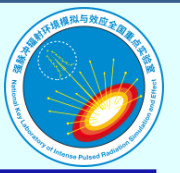




目录

1. 研究背景
2. 中子单粒子效应研究
3. 中子位移损伤效应研究
4. 总结与展望





1. 研究背景

抗辐射加固技术：提高系统在辐射环境中的抗辐射损伤能力、确保可靠完成规定任务的技术，是确保系统在辐射环境中可靠工作的关键技术。

研究内容包括辐射环境模拟、**辐射效应机理**、**试验和评估技术**、**加固技术**、**加固设计保证**等。

是辐射物理和微电子的前沿交叉技术，具有很强的**探索性和挑战性**，是世界核大国和航天大国长期关注的热点和难点。



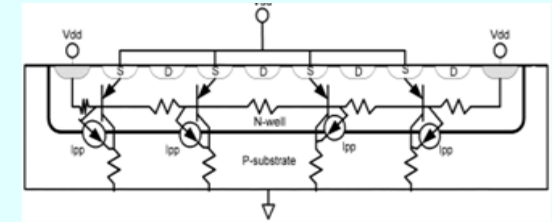
1. 研究背景:人为辐射环境与效应

核反应堆



瞬时剂量率效应

瞬时光电流



晶格缺陷 数据翻转

核辐射损伤会导致系统性能下降甚至损毁
抗核辐射加固是确保系统高生存高可靠的关键技术

环境

辐射环境

应

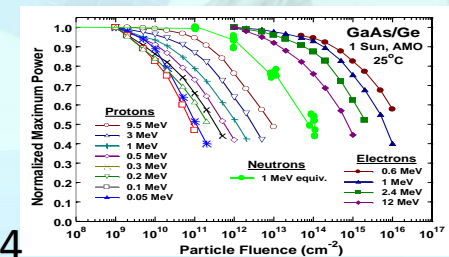
效应

入射中子

● 间隙原子
○ 空位

总剂量效应

性能漂移



1. 研究背景：空间辐射环境与效应

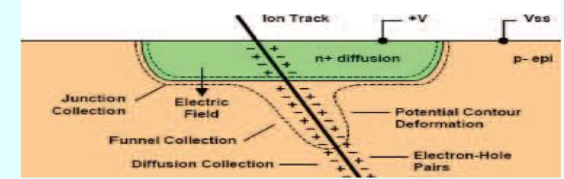
银河宇宙射线

重离子、质子



单粒子效应

重离子、质子 → 辐射感生载流子



重离子、质子

质子、电子 → 陷阱电荷

空间辐射损伤导致的故障占航天器在轨故障的45%

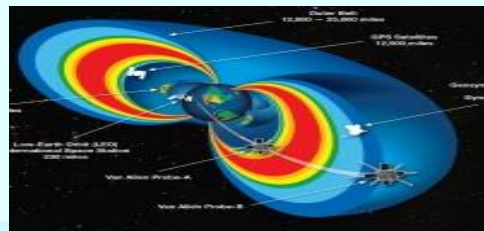
抗空间辐射加固是确保航天器高可靠长寿命的关键技术

境

线

应

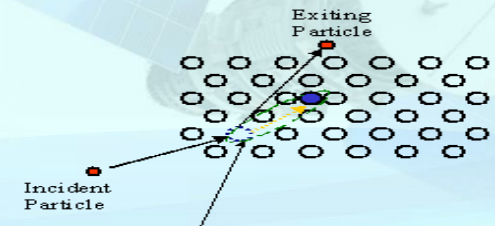
质子、电子



地球辐射带

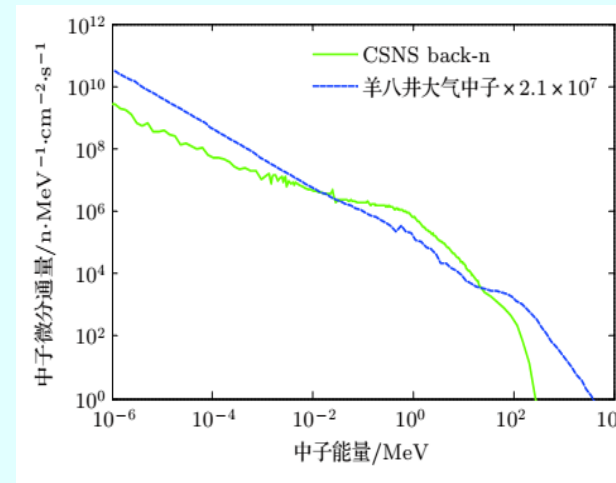
空间位移损伤

质子、电子 → 晶格缺陷

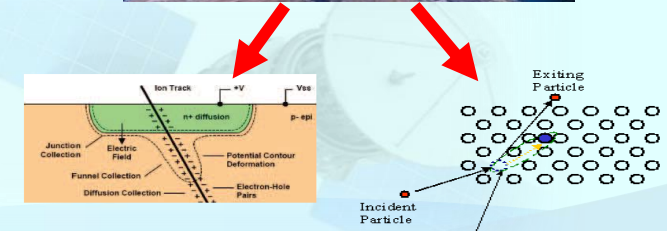
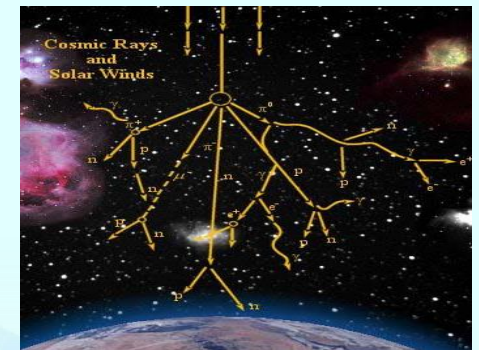


1. 研究背景

- 白光中子源是国际上开展中子物理学试验研究的重要试验装置。
- 适合开展电子元器件的辐照效应试验研究，特别是**单粒子效应**和**位移损伤效应**试验研究。

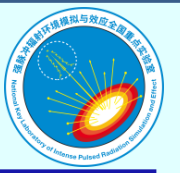


CSNS中子能谱接近大气中子能谱



单粒子效应

位移损伤效应



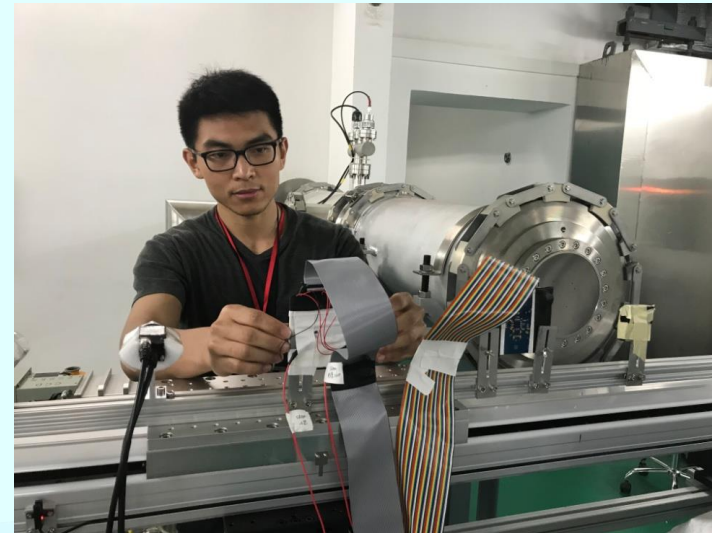
1. 研究背景

■ 单粒子效应 single event effect, SEE

- 单个粒子穿过器件敏感区域，电离产生的电子-空穴对被电场收集形成脉冲电流，导致器件辐射损伤的现象。

■ 位移损伤 displacement damage, DD

- 粒子与器件材料原子核发生碰撞，引起晶格中的原子离开原来位置，导致器件性能下降的现象。

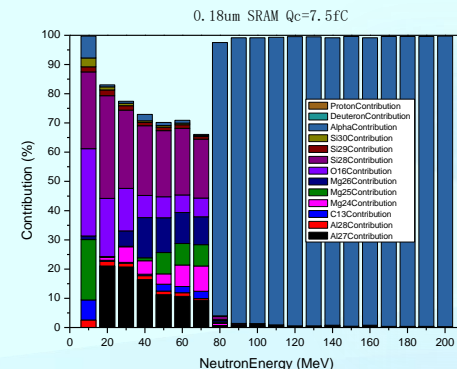
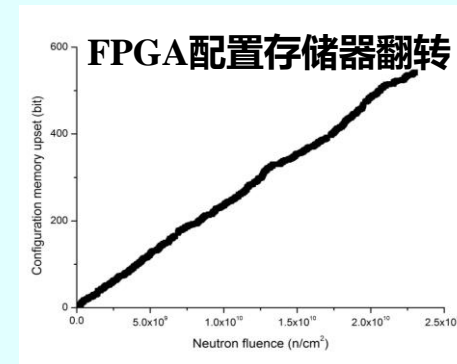


2.中子单粒子效应研究

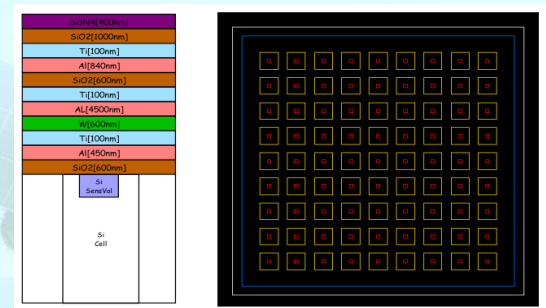
- 作为首批用户单位自2018年起在散裂中子源开展了FPGA、DSP、SRAM、FLASH等多种集成电路的中子单粒子效应实验研究工作。
- 器件特征工艺尺寸涵盖40nm到1.5 μm 范围，系统掌握了中子单粒子效应规律和机理。

No.	Technology node	Type	Manufacturer	Capacity	Supply Voltage
1	More than 1.50 μm	HM616	HITACHI	16 k(2 k \times 8 bit)	5.0 V
2	1.50 μm	HM624	HITACHI	64 k(8 k \times 8 bit)	5.0 V
3	0.80 μm	HM628128	HITACHI	1 M(128 k \times 8 bit)	5.0 V
4	0.80 μm	HM62256B	HITACHI	2 M(256 k \times 8 bit)	5.0 V
5	0.50 μm	HM628512A	HITACHI	4 M(512 k \times 8 bit)	5.0 V
6	0.35 μm	HM628512B	HITACHI	4 M(512 k \times 8 bit)	5.0 V
7	0.35 μm	HM62W8512B	HITACHI	4 M(512 k \times 8 bit)	3.3 V
8	0.18 μm	HM62V8100	HITACHI	8 M(1 M \times 8 bit)	3.0 V
9	0.18 μm	HM628512C	HITACHI	4 M(512 k \times 8 bit)	5.0 V
10	0.13 μm	HM62V16100	HITACHI	16 M(2 M \times 8 bit)	3.0 V
11	0.13 μm	IS62WV1288	ISSI	1 M(128 k \times 8 bit)	3.3 V
12	90 nm	IS61WV12816	ISSI	2 M(256 k \times 8 bit)	3.3 V
13	65 nm	IS64WV25616	ISSI	4 M(512 k \times 8 bit)	3.3 V
14	40 nm	IS61WV204816	ISSI	32 M(4 M \times 8 bit)	3.3 V

研究涉及的主要SRAM存储器列表



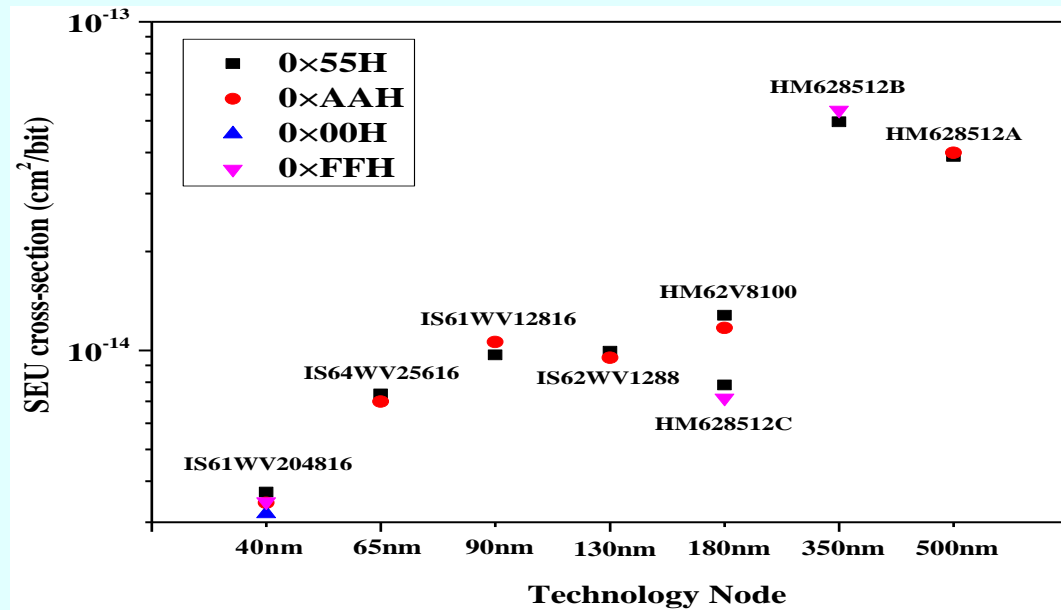
次级粒子贡献率



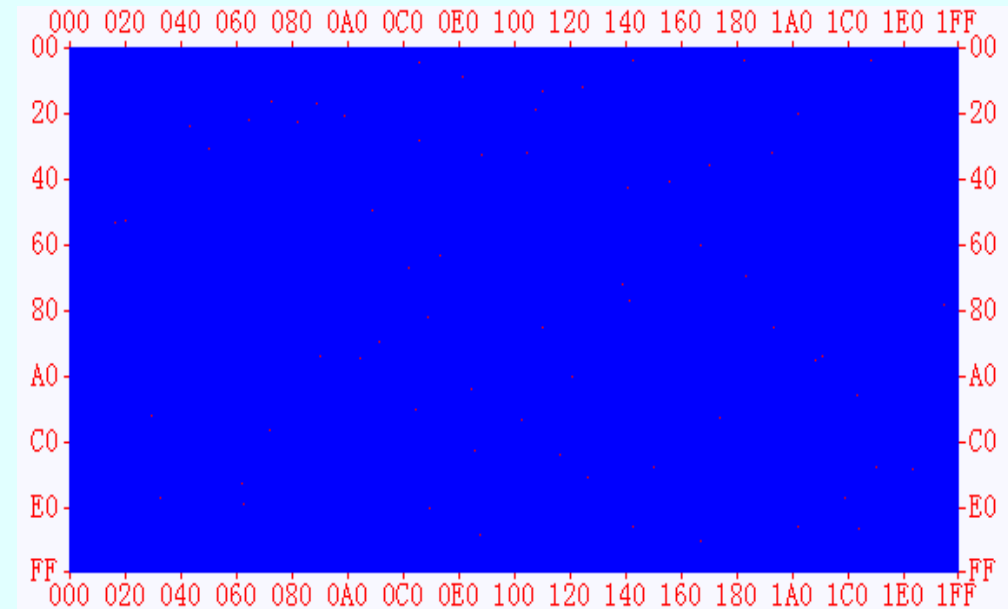
中子单粒子翻转效应仿真分析

2. 中子单粒子效应研究

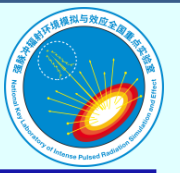
在CSNS反角白光中子源的实验中，对不同测试图形（55、AA、00、FF）对中子单粒子效应的影响都进行了测试。从图中数据可以看出，写入数据类型对中子单粒子翻转截面测量无明显影响，表明CSNS白光中子导致SRAM器件0→1和1→0翻转截面相等。从器件的翻转位图可以看出，中子单粒子效应的翻转体现为均匀翻转。



写入数据类型的影响

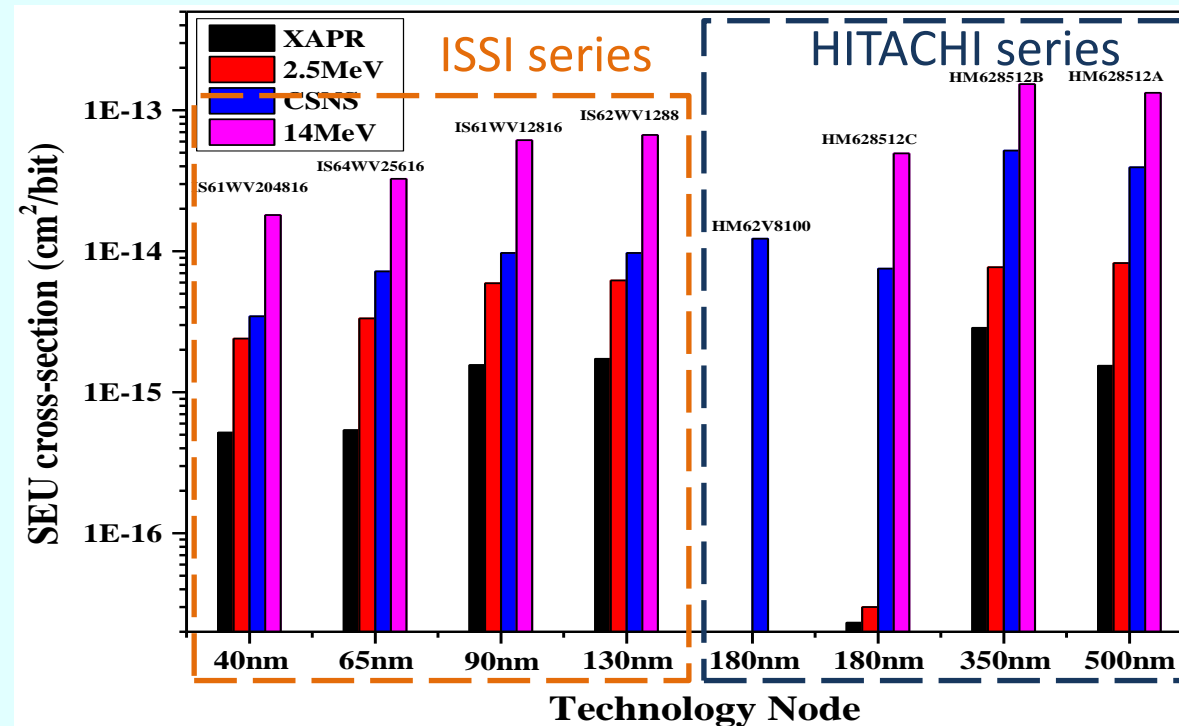


中子单粒子效应典型翻转位图（均匀翻转）



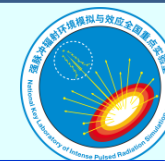
2.中子单粒子效应研究

✓对于纳米工艺（小于130nm）SRAM，中子单粒子翻转截面随工艺尺寸减小而降低。

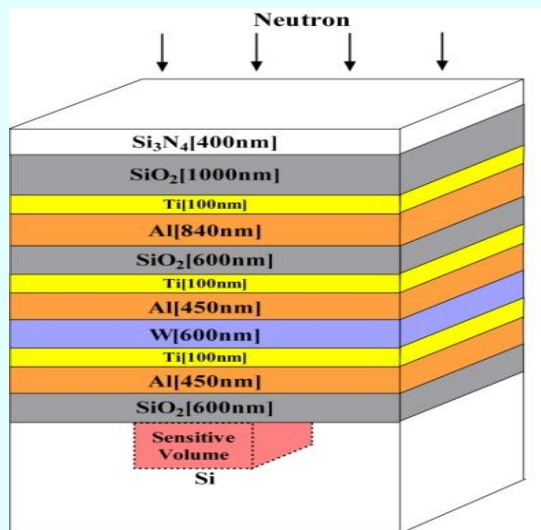


不同中子源SRAM翻转截面对比

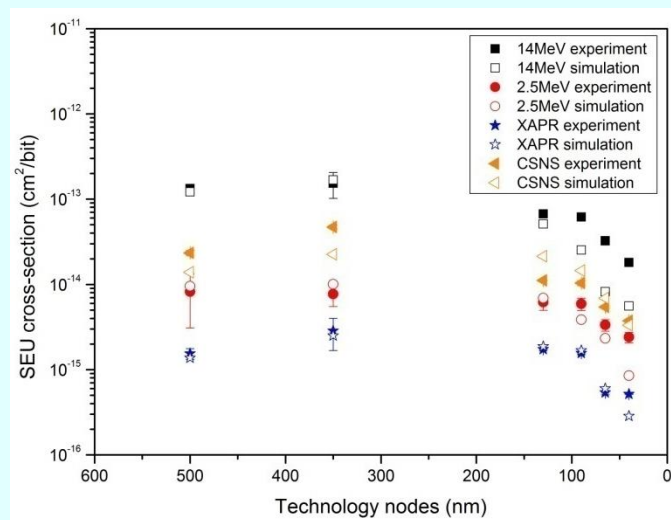
2.中子单粒子效应研究



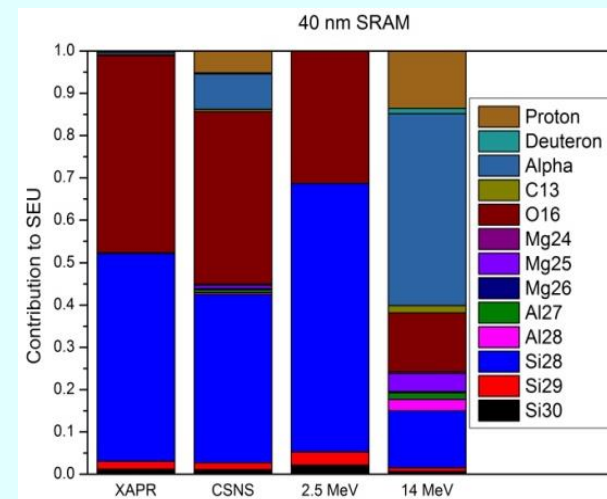
根据器件逆向工程数据建立了SRAM中子单粒子效应仿真模型，对CSNS中子在不同工艺尺寸SRAM的中子单粒子翻转截面进行了仿真计算，表明中子与器件材料核反应产生的Si离子、O离子、 α 粒子、质子导致SRAM存储单元发生单粒子翻转。



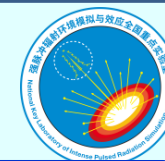
仿真模型



翻转截面的仿真结果与实验结果的对比

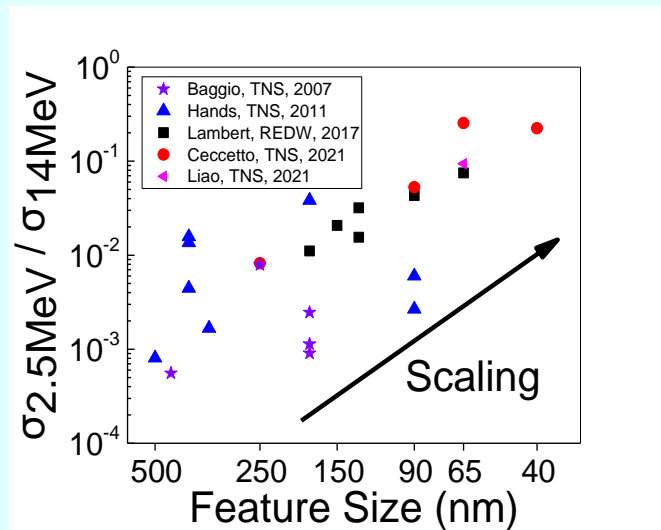
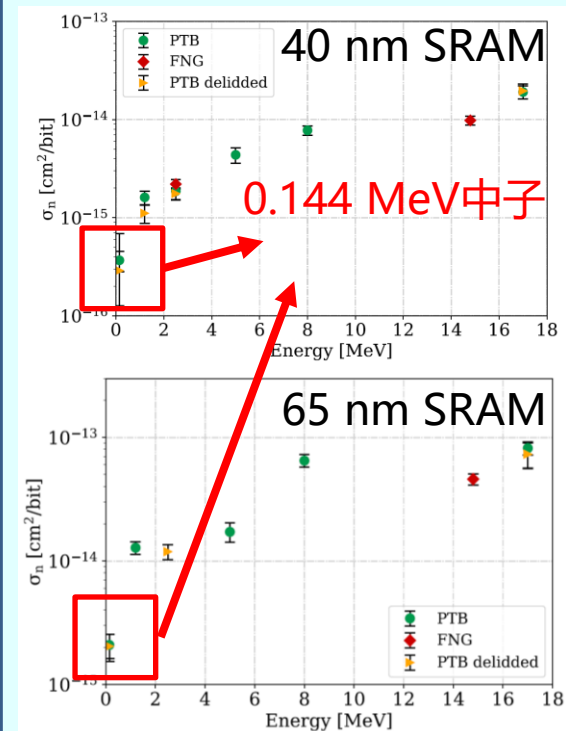


次级粒子对单粒子翻转的贡献率

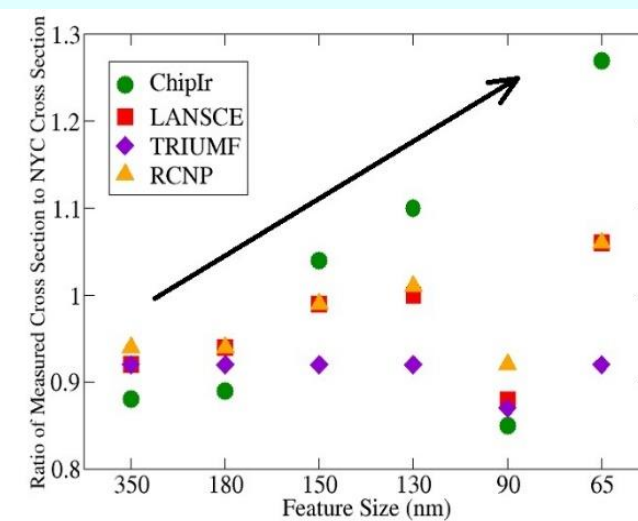
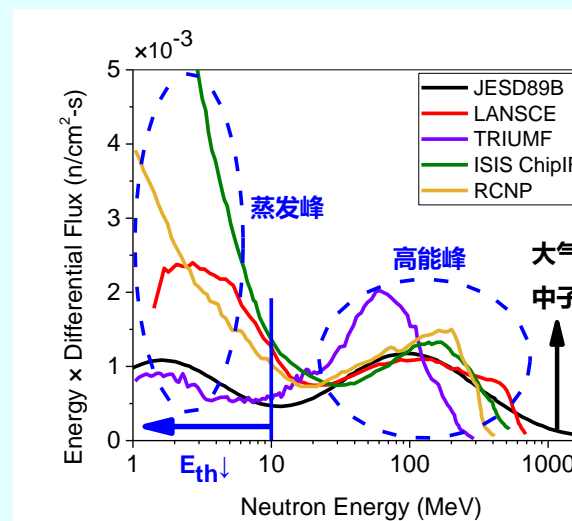


百纳米以下工艺中子单粒子翻转能量依赖性的新特点

- 中子能量阈值降低至1 MeV以下
- 几MeV以下较低能段翻转截面相对提高

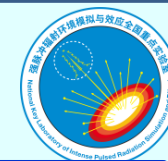


2.5 MeV中子翻转截面从不到14 MeV的千分之一，提高到了与之相比拟的水平



基于10MeV截断能量的大气中子SER预估方法存在高估的风险

2.中子单粒子效应研究



综合利用包括CSNS Back-n在内的不同能量中子源，开展了40nm工艺SRAM的能量依赖性研究

➤ 辐照中子源



CSNS Back-n

0.1 eV~200MeV



高压倍加器

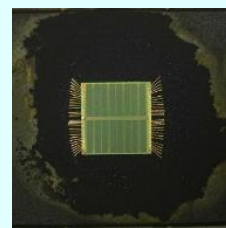
d-T: 14 MeV
d-D: 2.5 MeV



CFBR-II反应堆

近似纯裂变谱
平均能量~1 MeV

➤ 实验对象



➤ 自研SRAM在线测试系统



➤ 实验测试方法

辐照前

辐照过程中

写入
预定
数据

循环
定时
回读

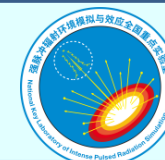
比较
判定
翻转

$$N_{upset}(t)$$

$$\sigma_{facility}(E_{min}) = \frac{N_{upset}}{\Phi_{facility}(E_{min}) \cdot T \cdot N_{bit}}$$

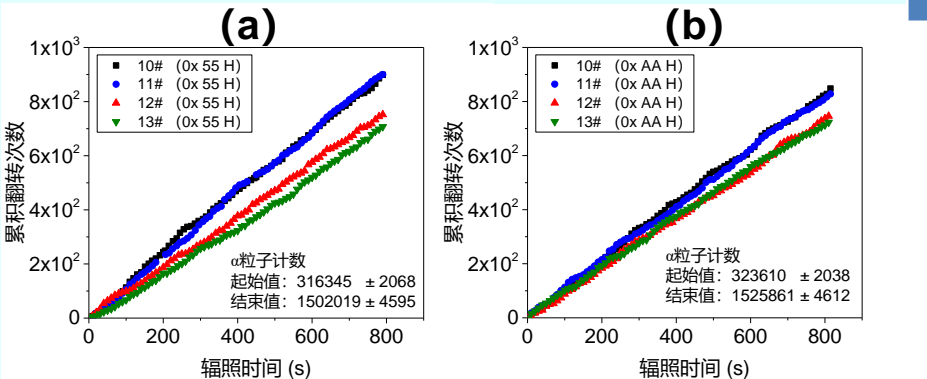
位翻转截面: cm²/bit

2.中子单粒子效应研究

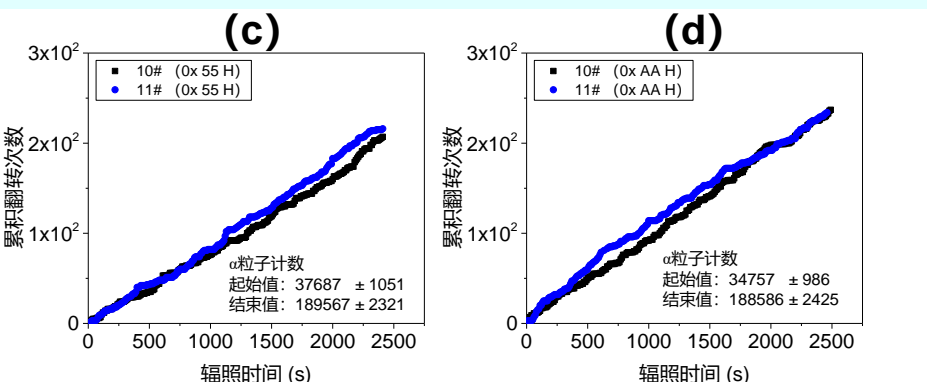


实验获取了翻转截面

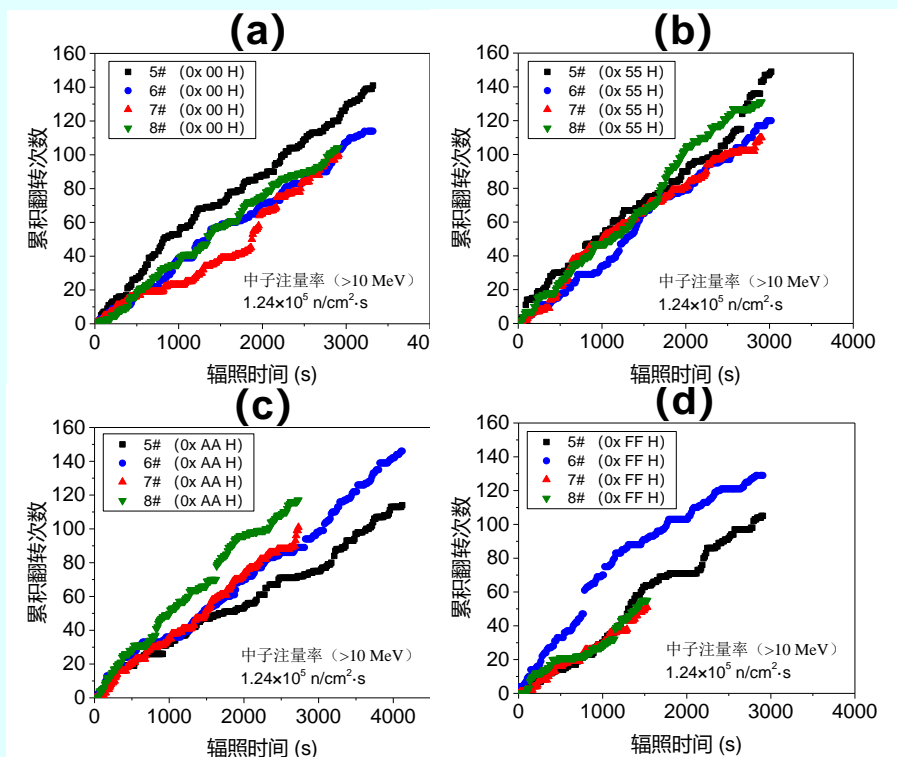
中子源	2.5 MeV	14 MeV	CFBR-II (>0.01 MeV)	CSNS Back-n (>10 MeV)
翻转截面	2.52×10^{-15}	1.78×10^{-14}	1.04×10^{-15}	3.68×10^{-14}
相对不确定度	22%	12%	11%	15%



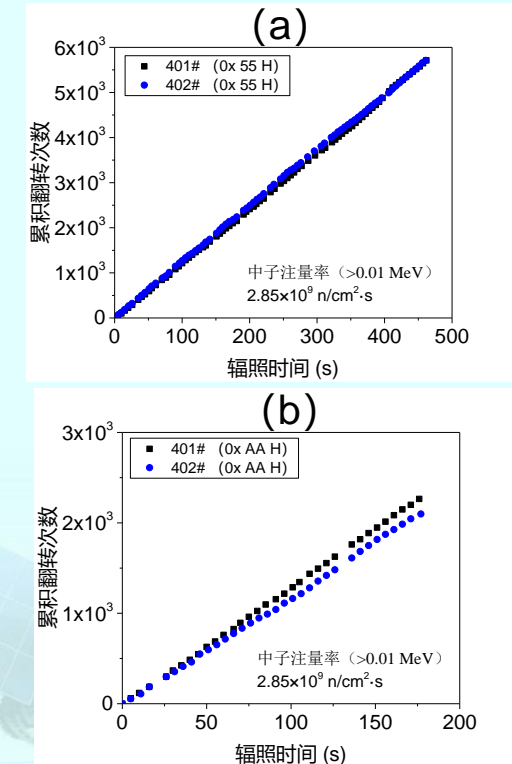
14 MeV: 4样品, 0x 55 H、0x AA H



2.5 MeV: 2样品, 0x 55 H、0x AA H

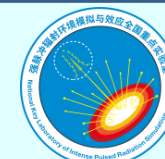


CSNS: 4样品 0x 00 H、0x 55 H
0x AAH、0x FF H



CFBR-II: 2样品
0x 55 H、0x AA H

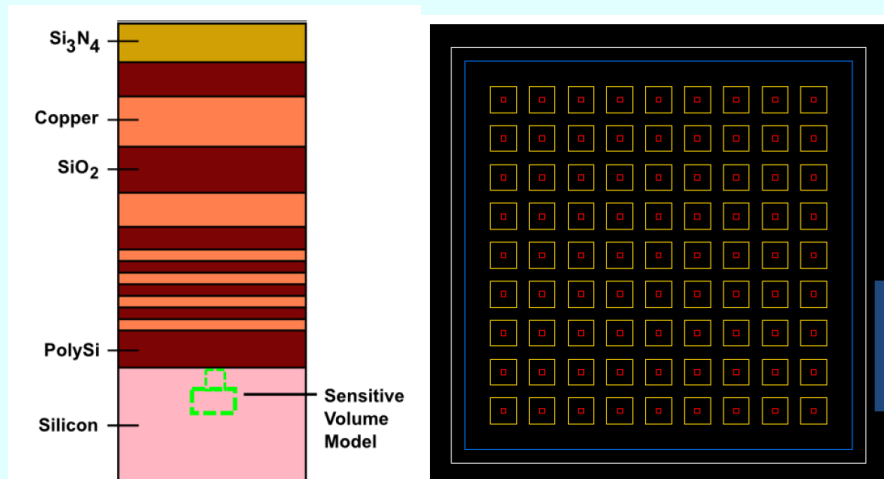
2.中子单粒子效应研究



基于集成电路的反向分析数据构建了Geant4探测器模型。

RPP模型的灵敏体积高度
漏斗长度: 200/300/400/500 nm

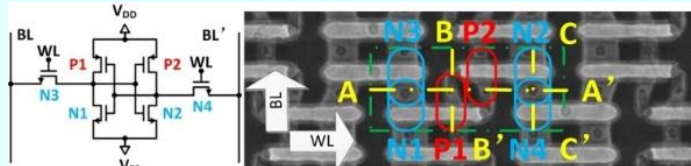
传统建模方式



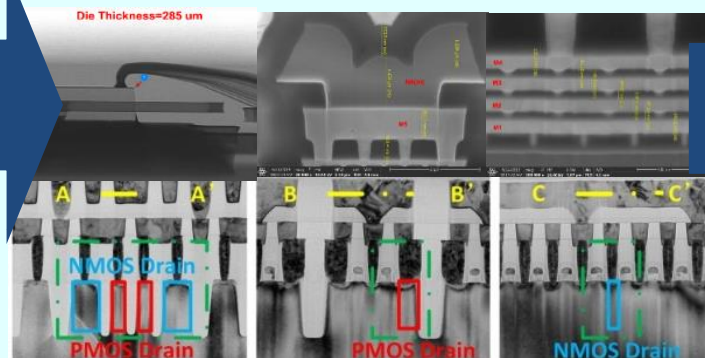
- (1) 部分堆栈层: 钝化层→部分衬底
- (2) 材料结构简化: W栓塞、Si₃N₄侧墙
- (3) 阵列规模小: ~100电路单元

μm	SRAM	PMOS漏区	NMOS漏区
长度	0.763	0.066	0.134
宽度	0.352	0.120	0.070

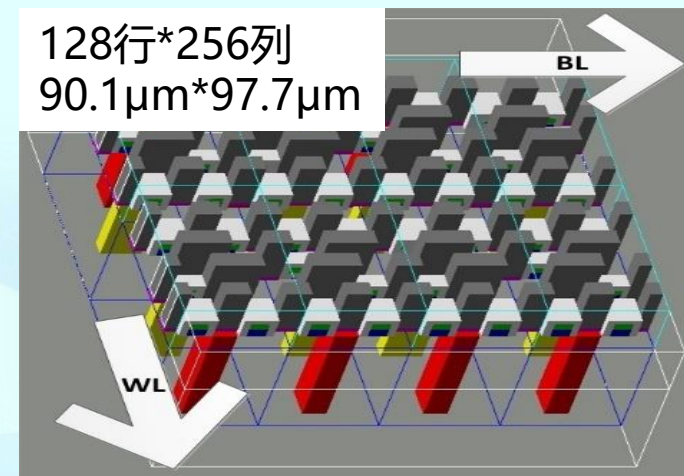
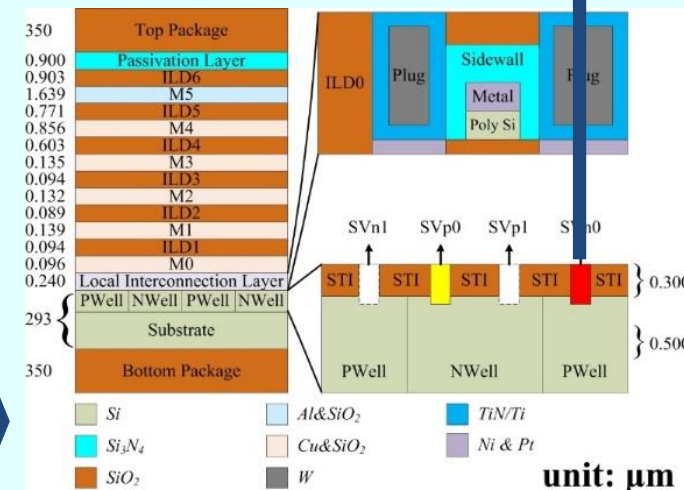
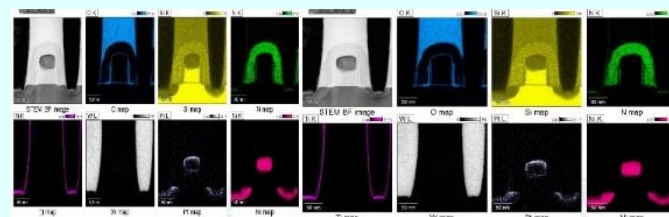
SEM: 平面结构分析



SEM: 纵向结构分析



EDX: 材料组分分析



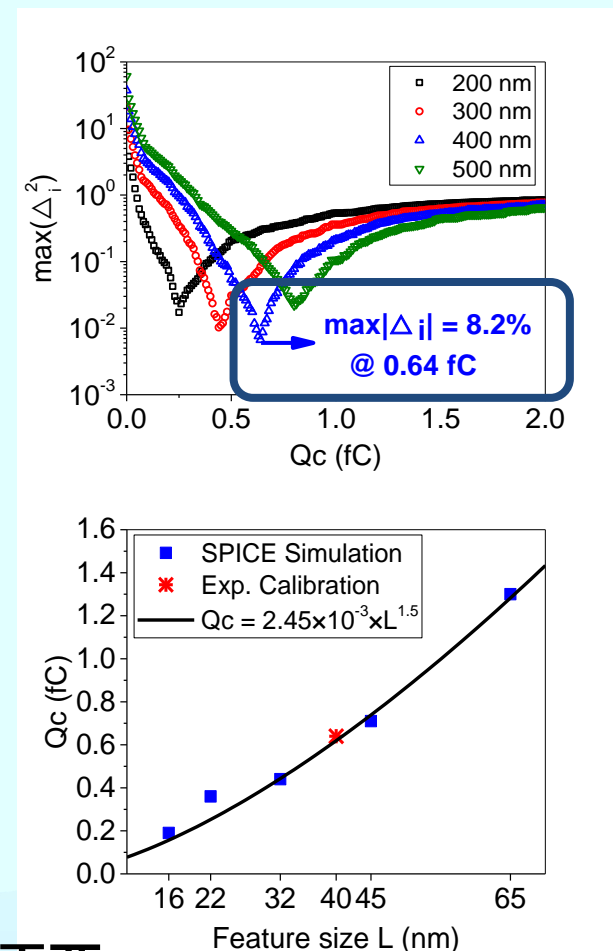
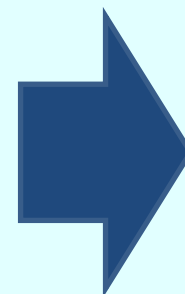
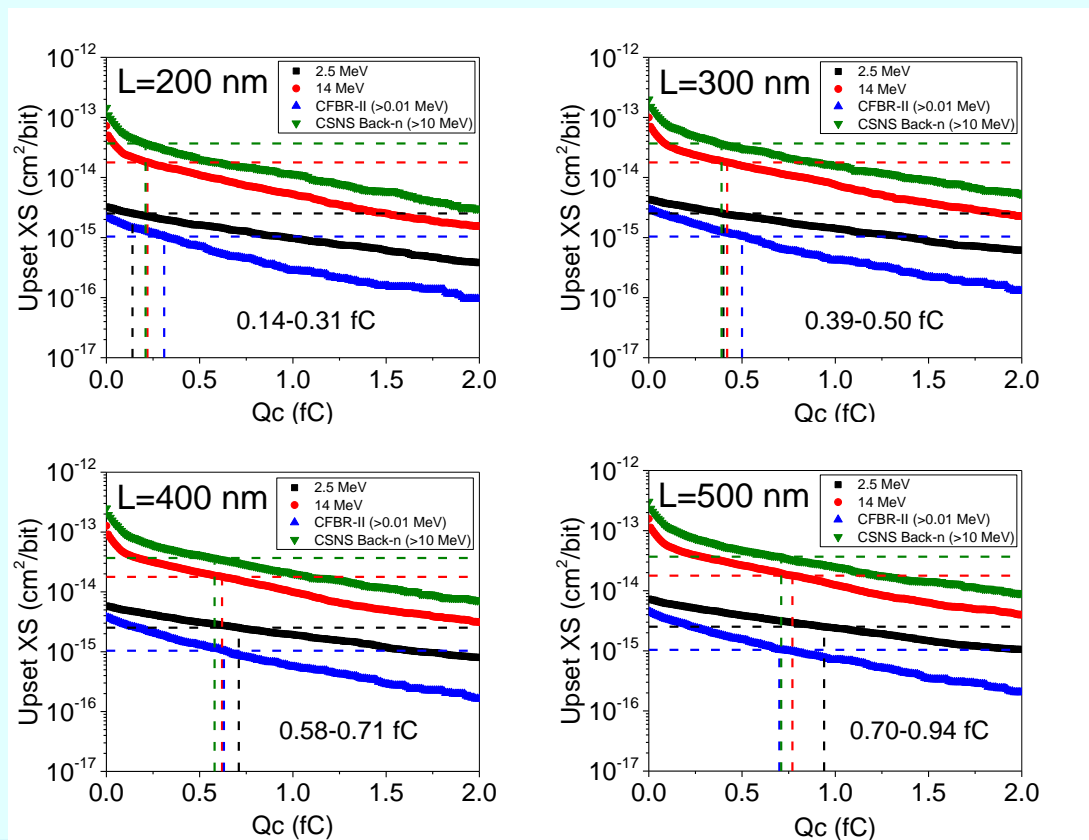
构建了以顶层封装到底层封装完整堆栈、局部结构精细、大规模阵列为主要特征的几何模型

2.中子单粒子效应研究



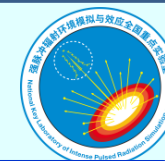
利用辐照实验翻转截面数据对漏斗长度、临界电荷进行了校准。

翻转截面计算结果



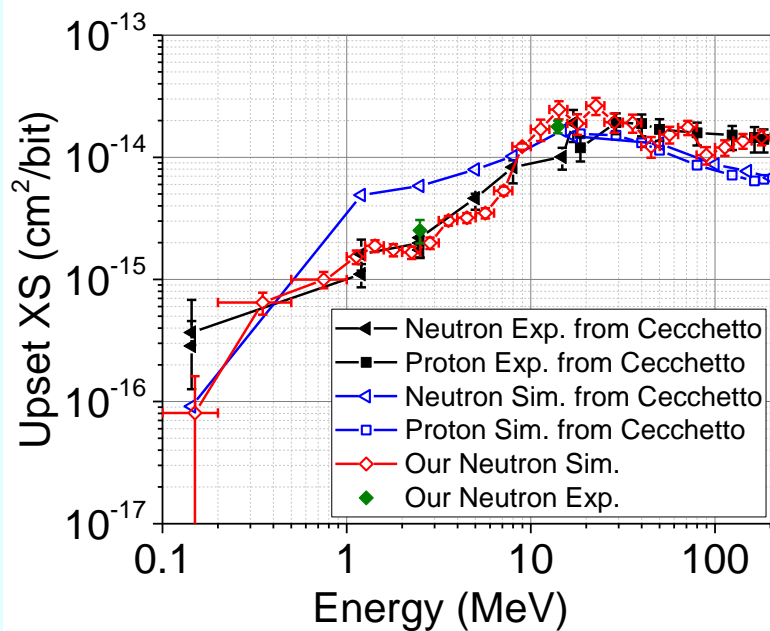
400 nm、0.64 fC的参数组合能够满足中子单粒子翻转模拟计算需要。

2.中子单粒子效应研究

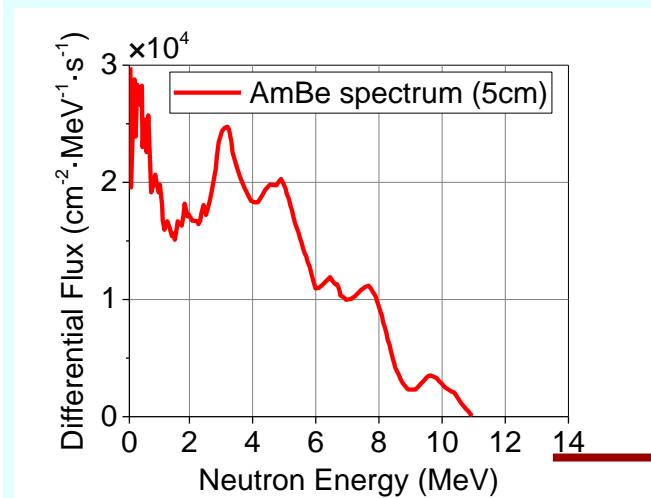


模型计算得到的翻转截面能量依赖函数，与单能中子/质子源试验数据吻合较好

- 2021年，CERN团队报道了相同型号SRAM的实验数据
- 0.144~17 MeV共7个单能中子点、18.6~184 MeV共8个单能质子点、AmBe同位素源



40nmSRAM翻转截面的能量依赖函数



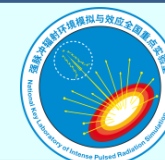
AmBe源SER实测值:
39 SEU/Mbit-day

偏差8.5%

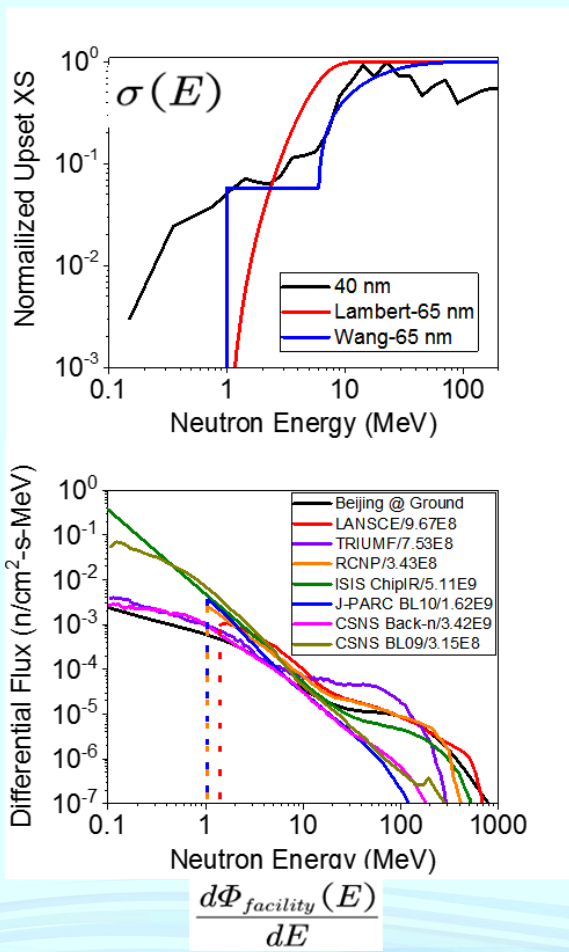
模型计算值:
42.3 SEU/Mbit-day

$$SER = \int_0^{\infty} \sigma(E) \frac{d\Phi(E)}{dE} dE$$

2.中子单粒子效应研究



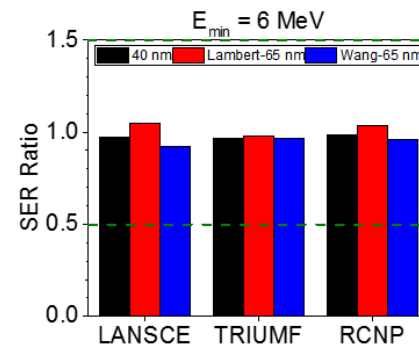
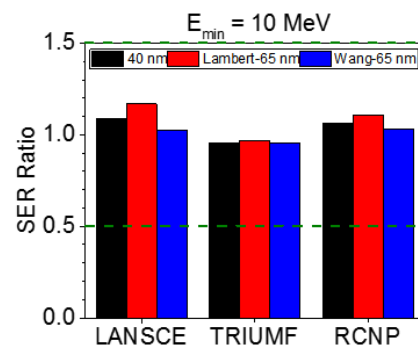
针对40 nm SRAM、2款65 nm SRAM，理论分析了大气中子SER预估方法的准确性。



第1组

$$SER\ ratio = \frac{\int_0^\infty \sigma(E) \frac{d\Phi_{facility}(E)}{dE} dE}{\int_{E_{min}}^\infty \frac{d\Phi_{facility}(E)}{dE} dE} / \frac{\int_0^\infty \sigma(E) \frac{d\Phi_{atmosphere}(E)}{dE} dE}{\int_{E_{min}}^\infty \frac{d\Phi_{atmosphere}(E)}{dE} dE}$$

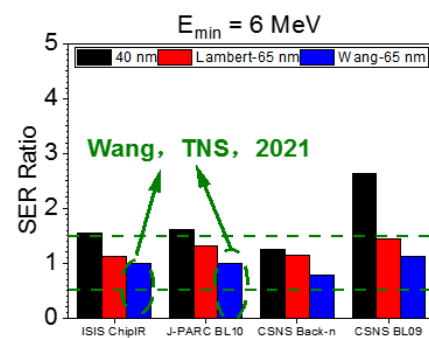
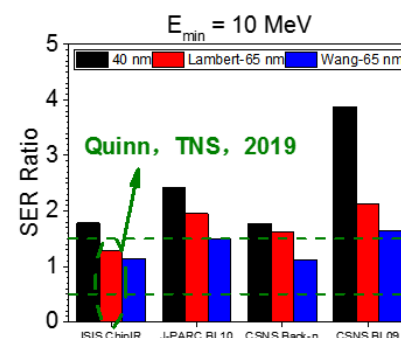
>1 高估
<1 低估



偏差 < 20%，对 E_{min} 的取值和 $\sigma(E)$ 均不敏感

更接近大气能谱，准确度较高

第2组



$E_{min} = 10\text{MeV}$:
(JEDEC JESD89B, 2021)

高估 78%~287%;

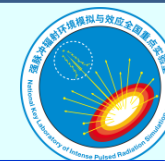
$E_{min} = 6\text{MeV}$:
(Liao, Ito, Abe, IEEE TNS, 2021)

65 nm: 高估 < 50%

40 nm: 高估最高 164%

能谱偏软，预估偏差与能谱、实验对象强相关，简单降低 E_{min} 不具备普适性

2.中子单粒子效应研究



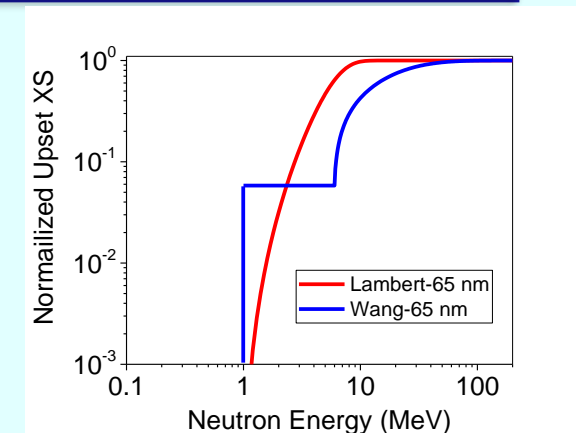
2款65 nm SRAM: 散裂源1-10MeV翻转比例显著高于大气中子

Lambert 65nm: 不同能区的翻转比例

能区/MeV	北京地面大气 /%	ISIS ChipIR /%	J-PARC BL10 /%	CSNS Back-n /%	CSNS BL09 /%
1-6	5.9	18.2	32.1	22.0	38.1
6-10	6.5	14.1	23.2	24.3	21.0
10-200	66.3	55.4	44.7	53.5	38.7
>200	21.3	12.3	~0	0.2	2.2

Wang 65nm: 不同能区的翻转比例

能区/MeV	北京地面大气 /%	ISIS ChipIR /%	J-PARC BL10 /%	CSNS Back-n /%	CSNS BL09 /%
1-6	2.9	15.8	40.4	17.8	43.4
6-10	2.5	5.6	10.6	12.6	10.0
10-200	70.0	62.6	49.0	69.2	43.3
>200	24.6	16.1	~0	0.4	3.3



大气10 MeV以下: ~12%



散裂源10 MeV以下: 32%~60%

大气10 MeV以下: ~6%



散裂源10 MeV以下: 21%~53%

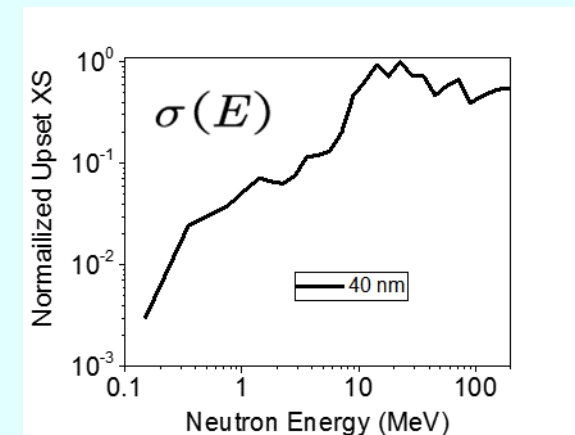
2.中子单粒子效应研究



40 nm SRAM: 进一步考虑了0.1~1 MeV能区的影响

40 nm SRAM: 不同能区的翻转比例

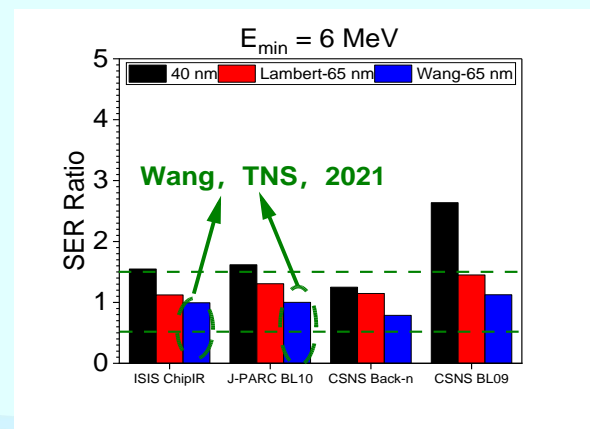
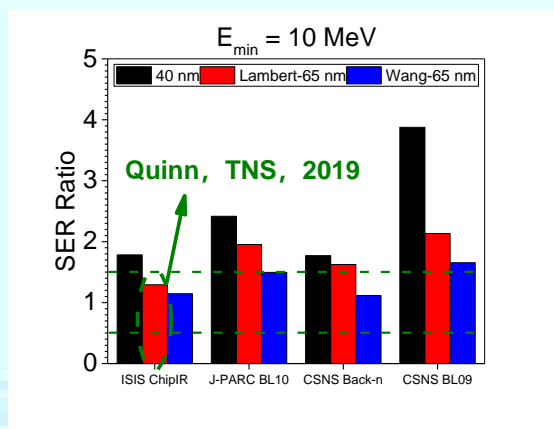
Energy Range /MeV	北京地面大气 /%	ISIS ChipIR /%	J-PARC BL10 /%	CSNS Back-n /%	CSNS BL09 /%
0.1-1	1.5	26.1	-	9.2	34.5
1-6	6.8	18.7	43.9	21.9	34.2
6-10	4.2	5.7	12.0	12.8	6.5
10-200	64.0	41.5	44.1	55.9	23.7
>200	23.5	8.0	~0	0.2	1.1



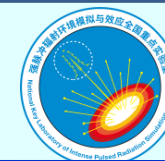
大气10 MeV以下: ~13%



散裂源10 MeV以下: 44%~75%



散裂源 10 MeV 以下的翻转中，21%~52%由1MeV以下的中子贡献，是40nmSRAM较65nm高估更严重的重要原因。



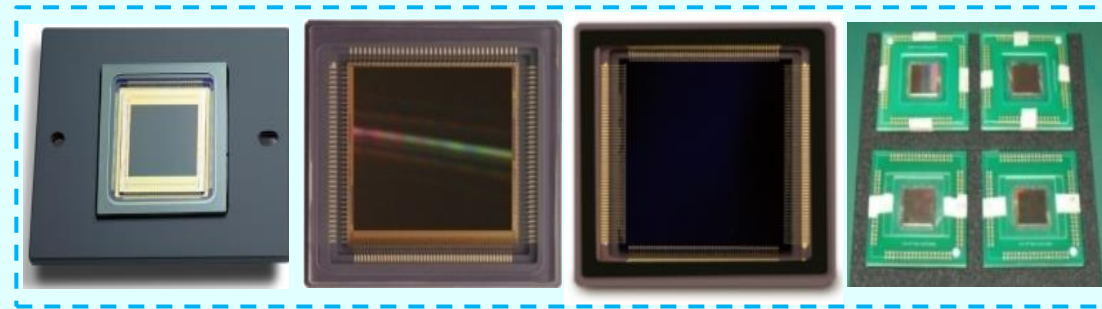
➤ 小结

- 写入数据类型对中子单粒子翻转截面测量无明显影响
- 中子单粒子效应的翻转体现为均匀翻转
- 建立了经多种类型与能量中子辐照实验校准的蒙特卡罗模拟计算模型，适用于很宽中子能量范围内的中子单粒子翻转模拟。
- 对40 nm、65 nm SRAM大气中子SER预估的理论分析表明，10 MeV以下中子份额较高的散裂中子源倾向于低估器件抗辐射性能；将 E_{min} 从10 MeV降低到6 MeV可以一定程度上减轻高估程度，但最高仍可达~164%。在纳米集成电路预估时，要考虑这一因素的影响。
- 相比于65 nm SRAM，40 nm SRAM预估结果的高估更严重，主要原因在于1 MeV以下中子单粒子翻转对预估结果有重要影响。

3.中子位移损伤效应研究

- **中子位移损伤**是导致电子器件发生失效的重要因素之一，CSNS中子与其它中子源之间的辐射损伤异同性研究十分重要。
- 研究了二十余种光电器件、双极器件的白光中子位移损伤效应规律和机理。

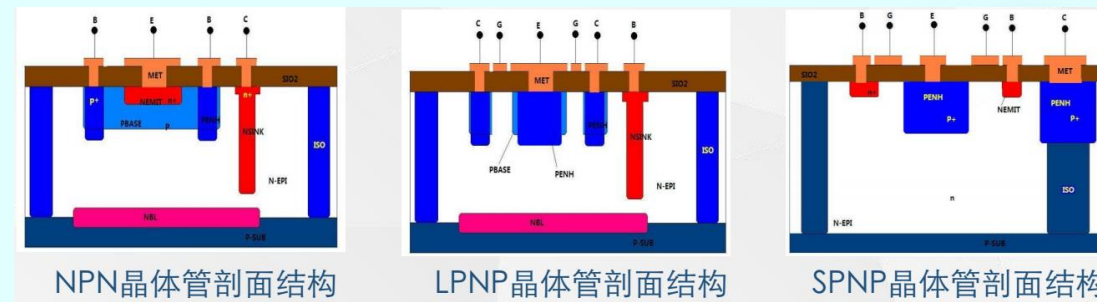
名称	像素尺寸	数量	传感器类型
BFLY-PGE-09S2M-CS	4.08 μm	1	Sony ICX692 CCD
BFLY-PGE-03S2C-CS	7.4 μm	1	Sony ICX424 CCD
BFLY-PGE-03S3C-CS	9.9 μm	1	Sony ICX414 CCD
BFLY-PGE-20E4M-CS	4.5 μm	1	e2v EV76C570 CIS
BFLY-PGE-23S2C-CS	2.8 μm	1	Sony IMX136 CIS
BFLYPGE-23S6M-C	5.86 μm	1	Sony IMX249 CIS
G400 FSI	11	1	CIS
G400 2020 FSI	6.5	1	CIS
G400 2020 BSI	6.5	1	CIS
Sony_CCD	6.45	1	Sony ICX285 CCD



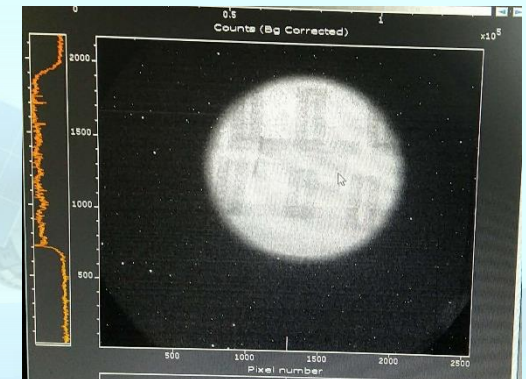
大面阵CMOS图像传感器、CCD相机等研究对象



器件编号	发射区面积(μm^2)	基区宽度 (μm)
N1	250*20	11
N2	80*20	11
N3	40*20	11
N4	90*10	11
N5	50*50	5
LP1	140*26	12
LP2	70*26	12
LP3	35*24	12
SP1	66*28	11(EB 间距)
SP2	72*28	EB 交叠 1 μm

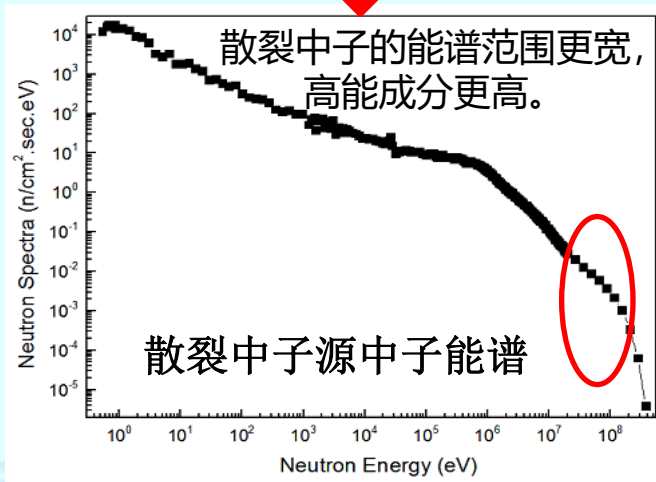
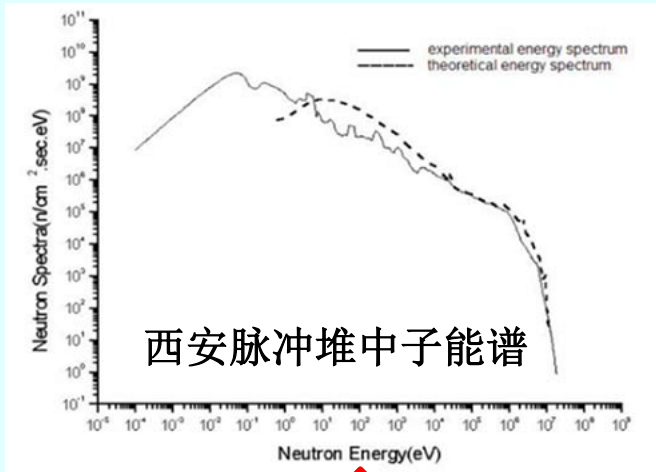


各种不同结构的晶体管电路



3.中子位移损伤效应研究

3.1 散裂中子和反应堆中子位移损伤等效研究



➤ 采用四种方法对比了散裂中子在硅材料中的电离/非电离kerma因子

01

粒子输运计算

利用GEANT4软件计算了散裂中子在硅材料中电离/非电离kerma因子

02

积分算法

依据ASTM E722-14中的硅位移函数表计算得到非电离kerma因子, 并根据总kerma因子得到电离kerma因子

03

热释光剂量测量

利用热释光剂量计的方法对散裂中子辐照下的电离剂量进行了测量, 得到散裂中子的电离kerma因子

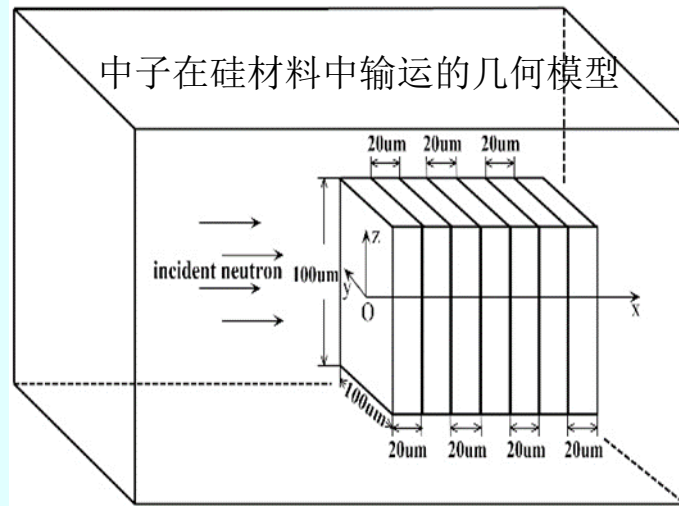
04

晶体管损伤常数

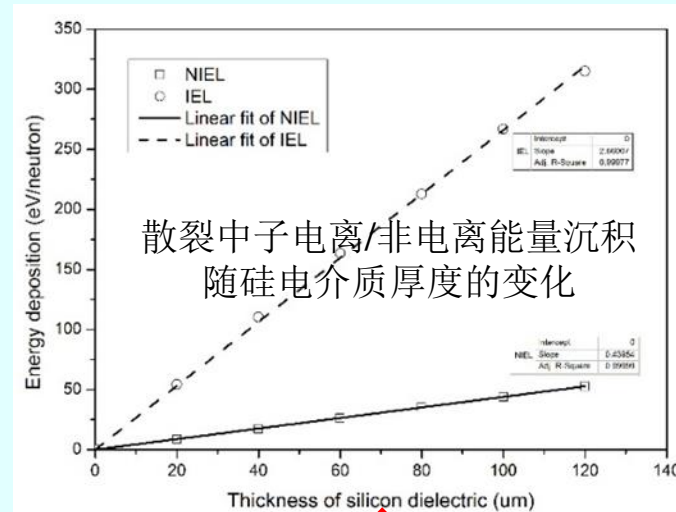
根据晶体管增益倒数随中子注量的退化特征, 利用晶体管位移损伤因子得到了散裂中子的非电离kerma因子

3.中子位移损伤效应研究

1) 散裂中子在硅材料中电离/非电离kerma因子的计算



仿真中建立的几何结构由七层硅介质组成，根据器件工艺尺寸，每层的长宽分别设置为100μm、20μm。入射中子的方向与第一层硅的表面垂直。入射中子的能量被划分为252个连续能量段，能量范围从0.283eV到373.2MeV。



硅介质的厚度远远小于入射中子在硅材料中的射程，能量沉积能够均匀地分布在每个硅层中，累积的电离和非电离能量损失随硅介质的厚度呈线性增加。

$$K_{\text{NIEL}} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{N} \frac{dE_{\text{NIEL}}}{dx}$$

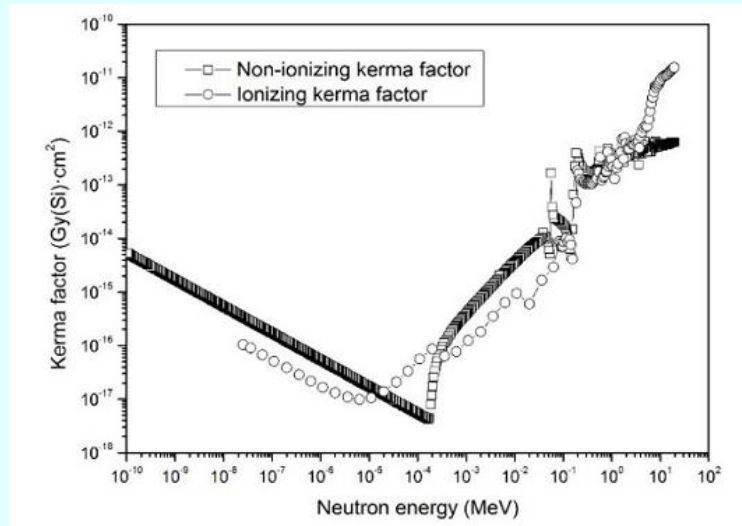
$$K_{\text{IEL}} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{N} \frac{dE_{\text{IEL}}}{dx}$$

$$K_{\text{NIEL}} = 3.03 \times 10^{-13} \text{ Gy(Si)·cm}^2$$

$$K_{\text{IEL}} = 1.83 \times 10^{-12} \text{ Gy(Si)·cm}^2$$

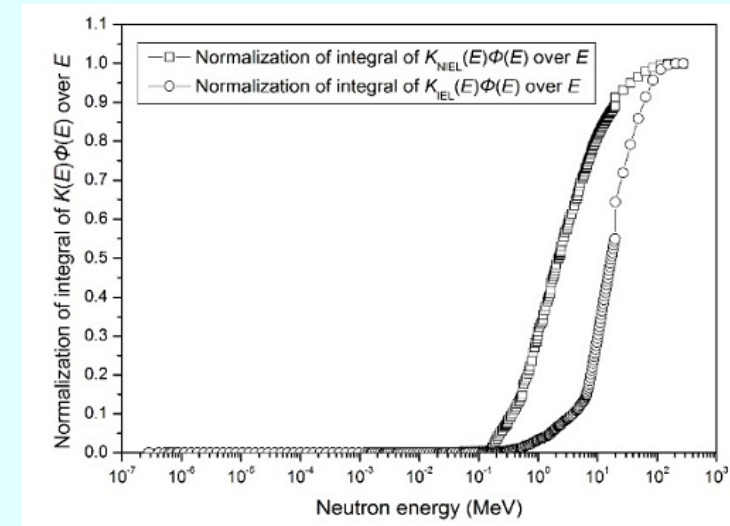
3.中子位移损伤效应研究

2) 基于积分算法的散裂中子电离和非电离 kerma 因子



$$K_{\text{NIEL}} = \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \phi(E) K_{\text{NIEL}}(E) dE$$

$$K_{\text{IEL}} = \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \phi(E) K_{\text{IEL}}(E) dE$$



硅中的电离和非电离kerma 因子与中子能量的关系

归一化的 $K(E)\Phi(E)$ 随中子能量 E 的kerma函数关系

基于ASTM标准得到散裂中子

$$K_{\text{NIEL}} = 2.96 \times 10^{-13} \text{ Gy(Si)·cm}^2$$

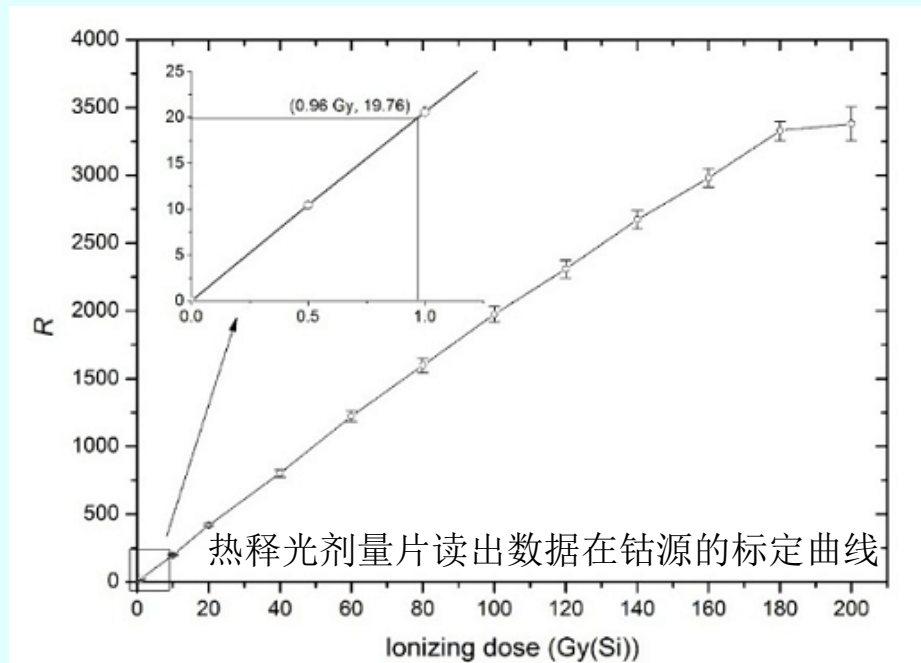
$$K_{\text{IEL}} = 1.81 \times 10^{-12} \text{ Gy(Si)·cm}^2$$

对于散裂中子能谱，在硅材料中几乎所有的电离能量沉积和非电离能量沉积都是由0.1MeV以上能量的中子产生的。

3.中子位移损伤效应研究

3) 基于热释光剂量计的电离能量沉积实验验证

利用热释光剂量计的方法对散裂中子辐照下的电离剂量进行了测量



标定

获得剂量片测量系数

测量

靶面及本底剂量测量

计算

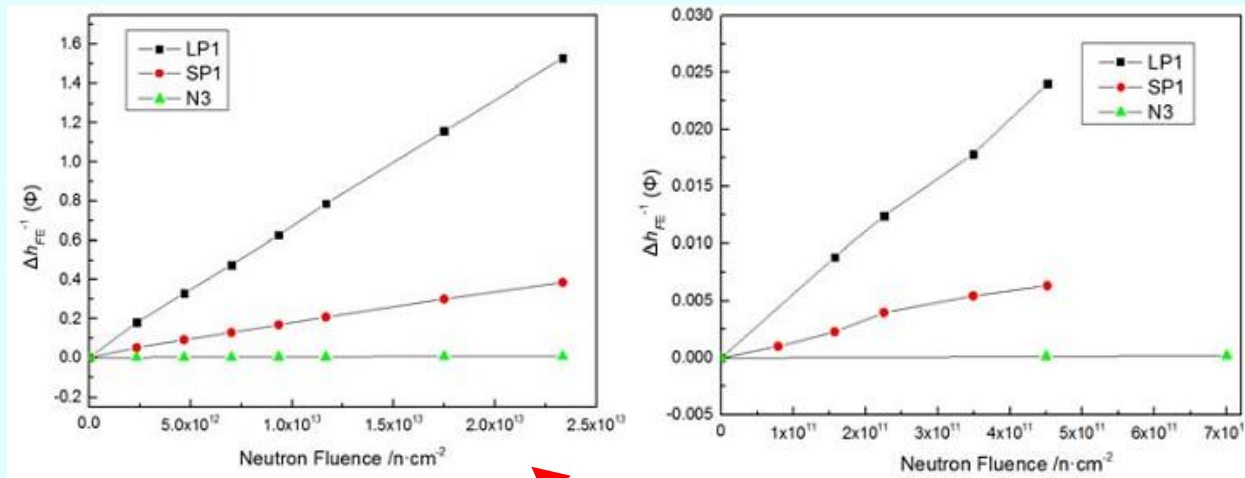
$$\frac{R}{s} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{R_i}{s_i} = K_{IEL} \phi_n + d_p t_r + B$$

根据热释光剂量测量的结果计算得到散裂中子的电离kerma因子 K_{IEL} 为

$$K_{IEL} = 1.94 \times 10^{-12} \text{ Gy(Si)·cm}^2$$

3.中子位移损伤效应研究

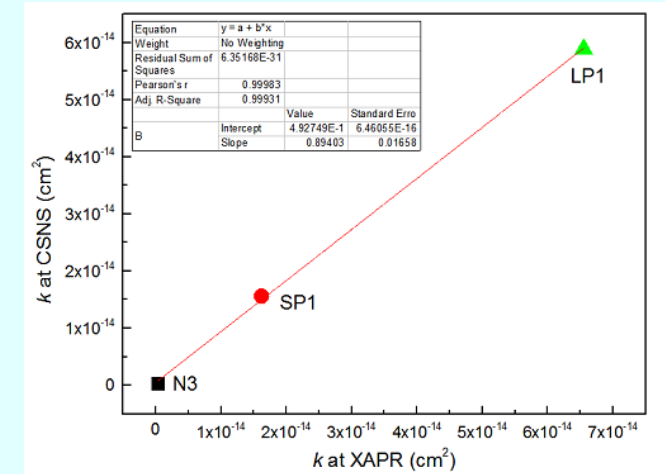
4) 基于晶体管位移损伤常数的非电离能损计算



XAPR反应堆中子辐照

CSNS散裂中子辐照

$$\Delta h_{FE}^{-1}(\Phi) = k_{\Phi} \cdot \Phi = \frac{\Delta I_B}{I_C}$$



三种晶体管中子损伤因子的比较

$$\frac{k_{CSNS}}{k_{1MeV}} = \frac{K_{NIEL}(CSNS)}{K_{NIEL}(1MeV)}$$



散裂中子的非电离kerma因子为

$$K_{NIEL} = 2.92 \times 10^{-13} \text{ Gy(Si)} \cdot cm^2$$

器件编号	器件类型	1MeV 等效中子损伤因子	散裂中子损伤因子
LP1	LPNP	$6.55 \times 10^{-14} \cdot cm^2$	$5.89 \times 10^{-14} \cdot cm^2$
SP1	SPNP	$1.62 \times 10^{-14} \cdot cm^2$	$1.56 \times 10^{-14} \cdot cm^2$
N3	VNPN	$3.37 \times 10^{-16} \cdot cm^2$	$3.22 \times 10^{-16} \cdot cm^2$

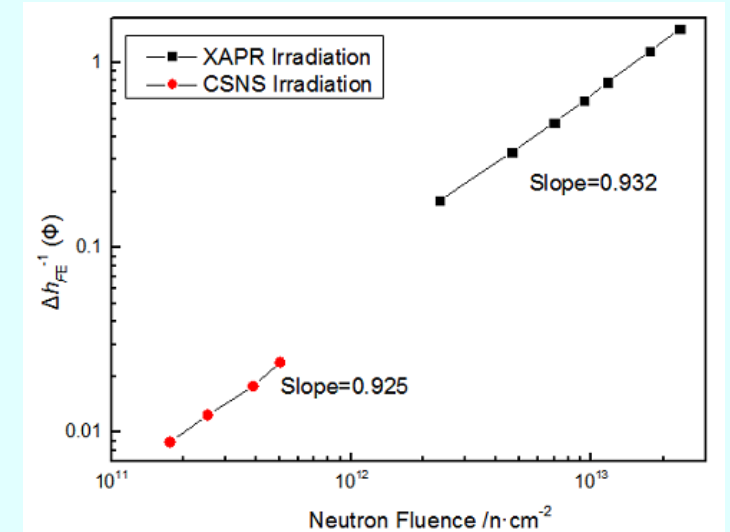
3.中子位移损伤效应研究

四种方法对散裂中子kerma因子计算结果的对比

方法	非电离 kerma ($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)	电离 kerma ($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)
GEANT4 仿真	3.03×10^{-13}	1.83×10^{-12}
积分算法	2.96×10^{-13}	1.81×10^{-12}
热释光剂量测量	-	1.94×10^{-12}
晶体管位移损伤常数	2.92×10^{-13}	-

↑
差异性小于4%

↑
差异性小于7%



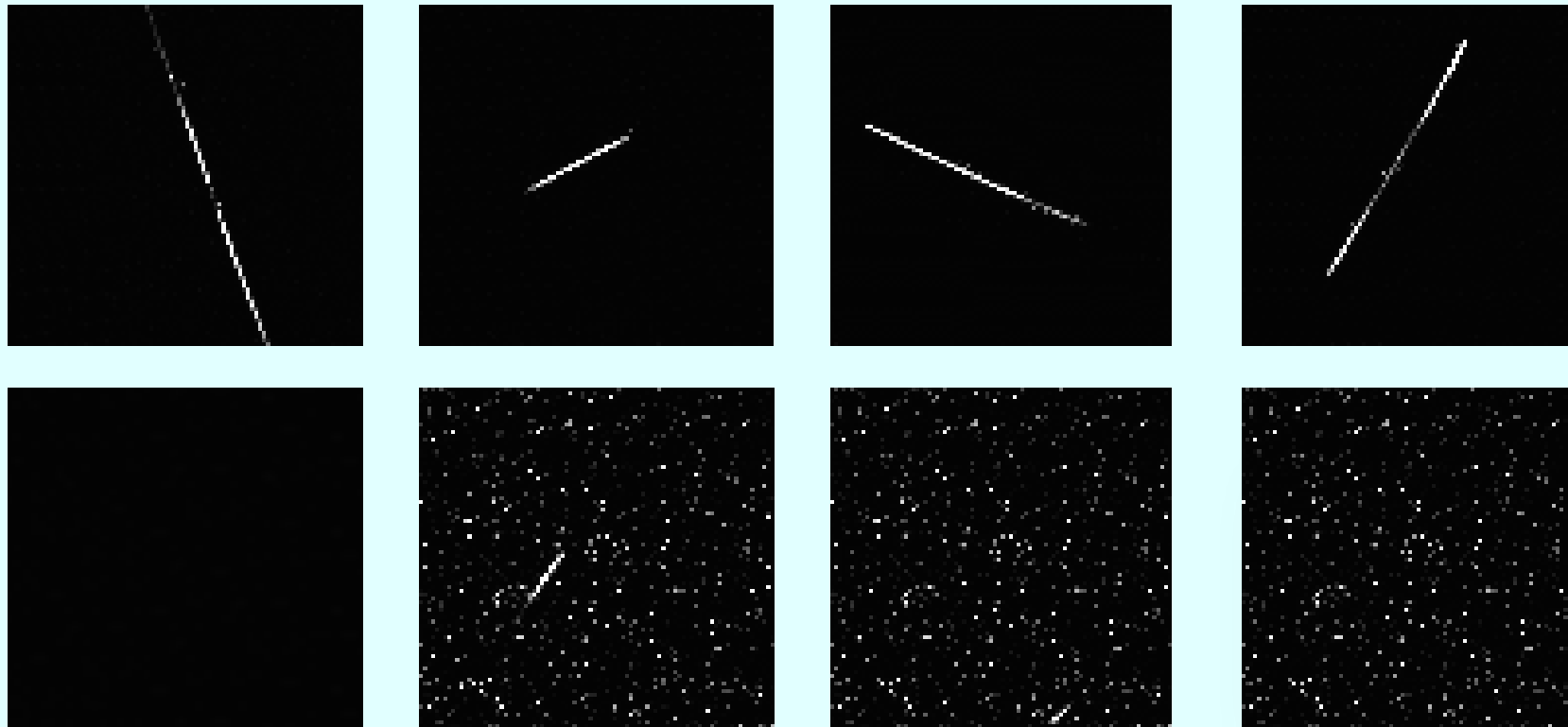
晶体管增益倒数退化和1MeV等效中子注量的关系

➤ 对于硅基晶体管，散裂中子与反应堆中子之间的辐射损伤能够通过1MeV中子进行等效。

3.中子位移损伤效应研究

3.2 光电器件中子位移损伤效应研究

国内首次获得CMOS图像传感器的中子单粒子效应典型实验特征：中子诱发产生暗信号尖峰和亮线，辐照结束后，暗信号尖峰和亮线均消失。



(a) 辐照前

(b) 辐照中#1

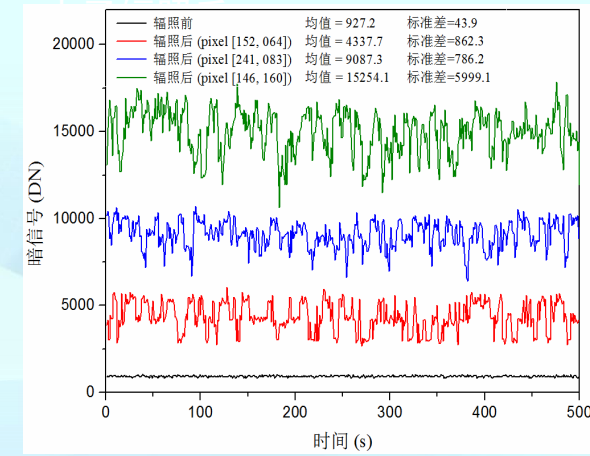
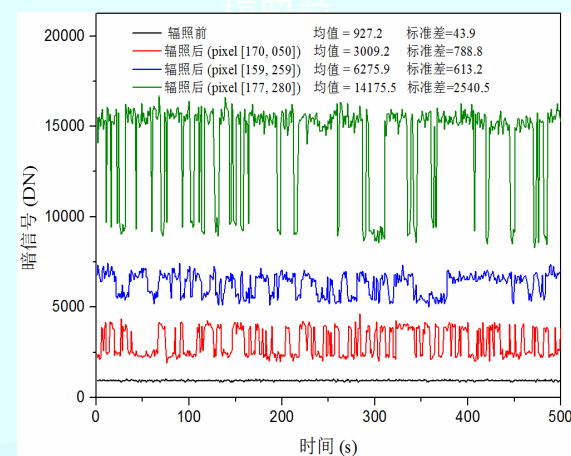
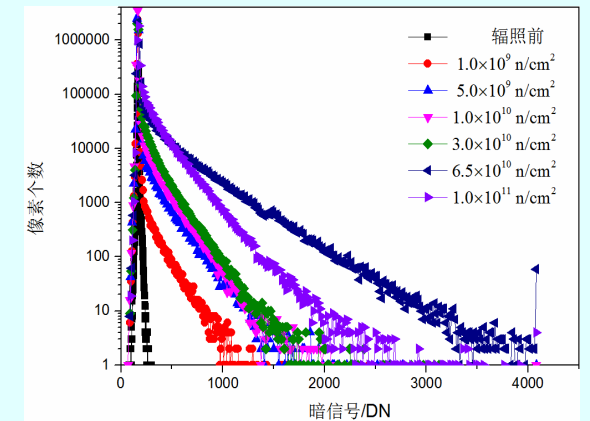
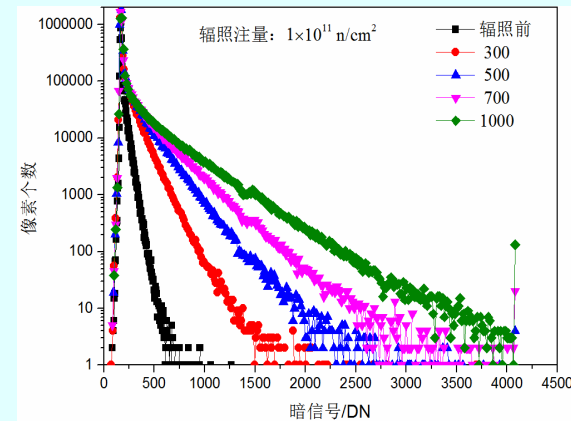
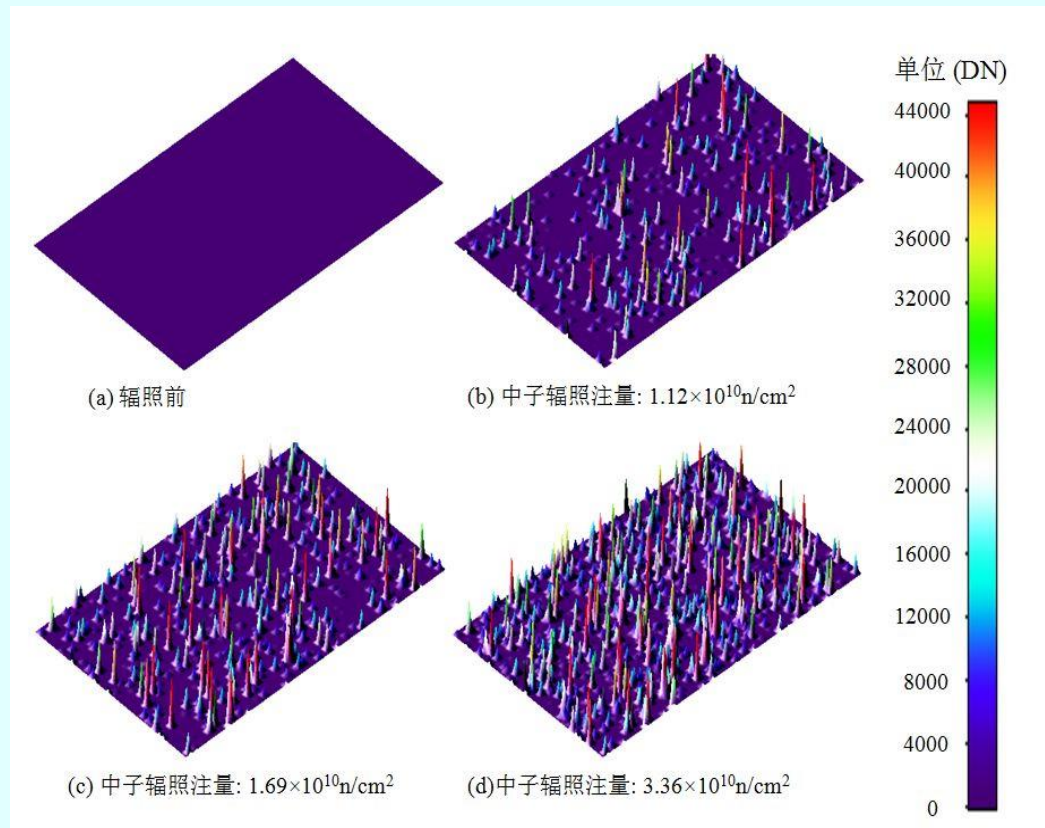
(c) 辐照中#2

(d) 辐照后

辐照过程中CMOS图像传感器响应的特征实验图

3. 中子位移损伤效应研究

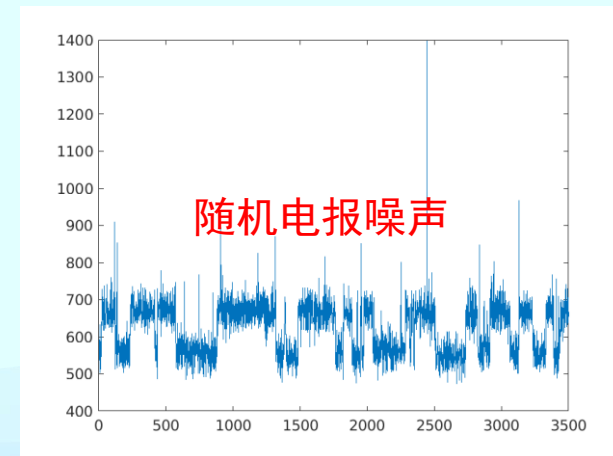
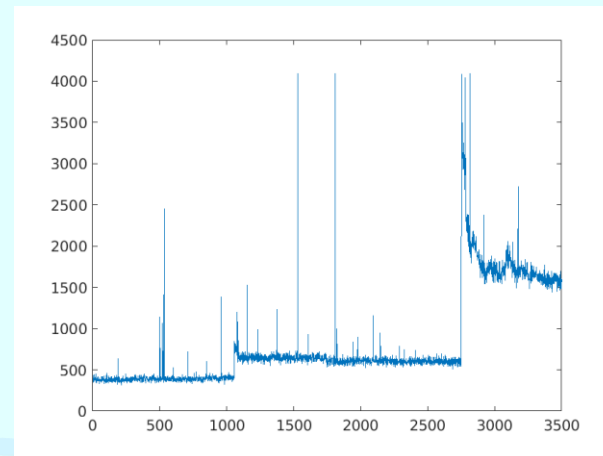
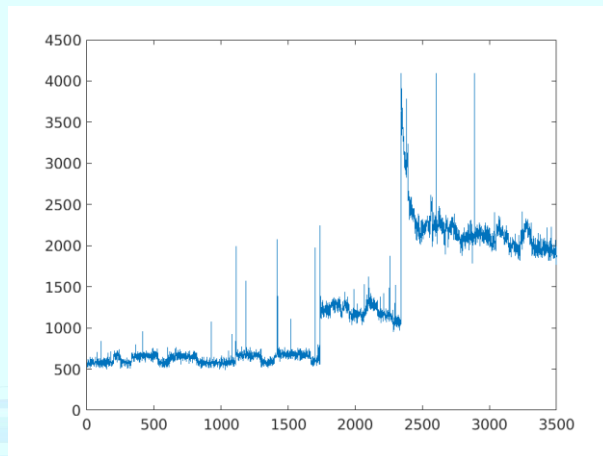
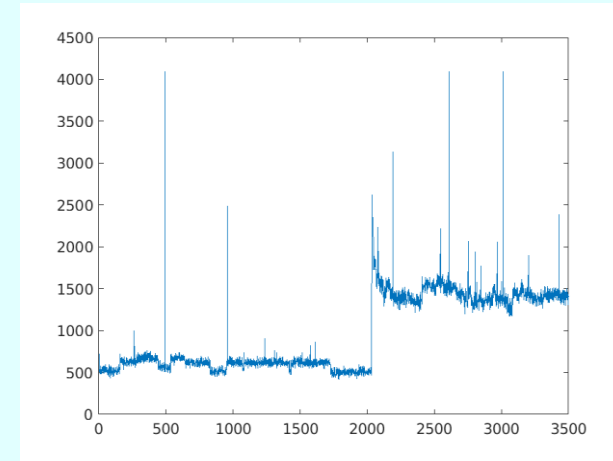
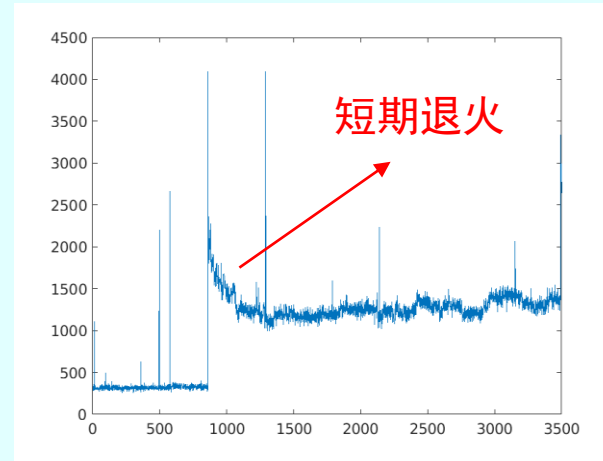
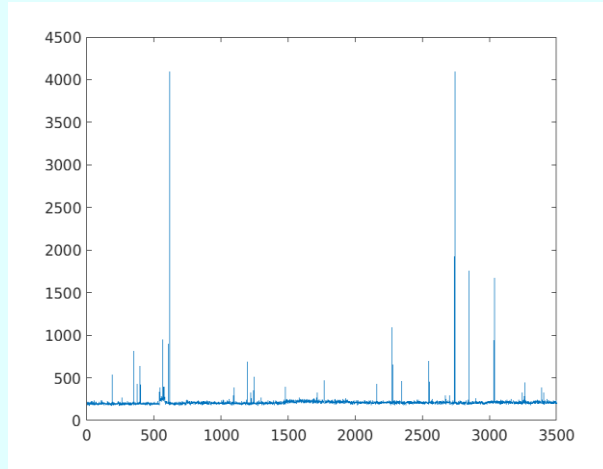
中子辐照后，图像传感器的平均暗信号、暗信号非均匀性、暗信号分布等参数发生明显退化，但并非所有像素单元均受到损伤。



中子位移损伤诱发暗信号尖峰产生

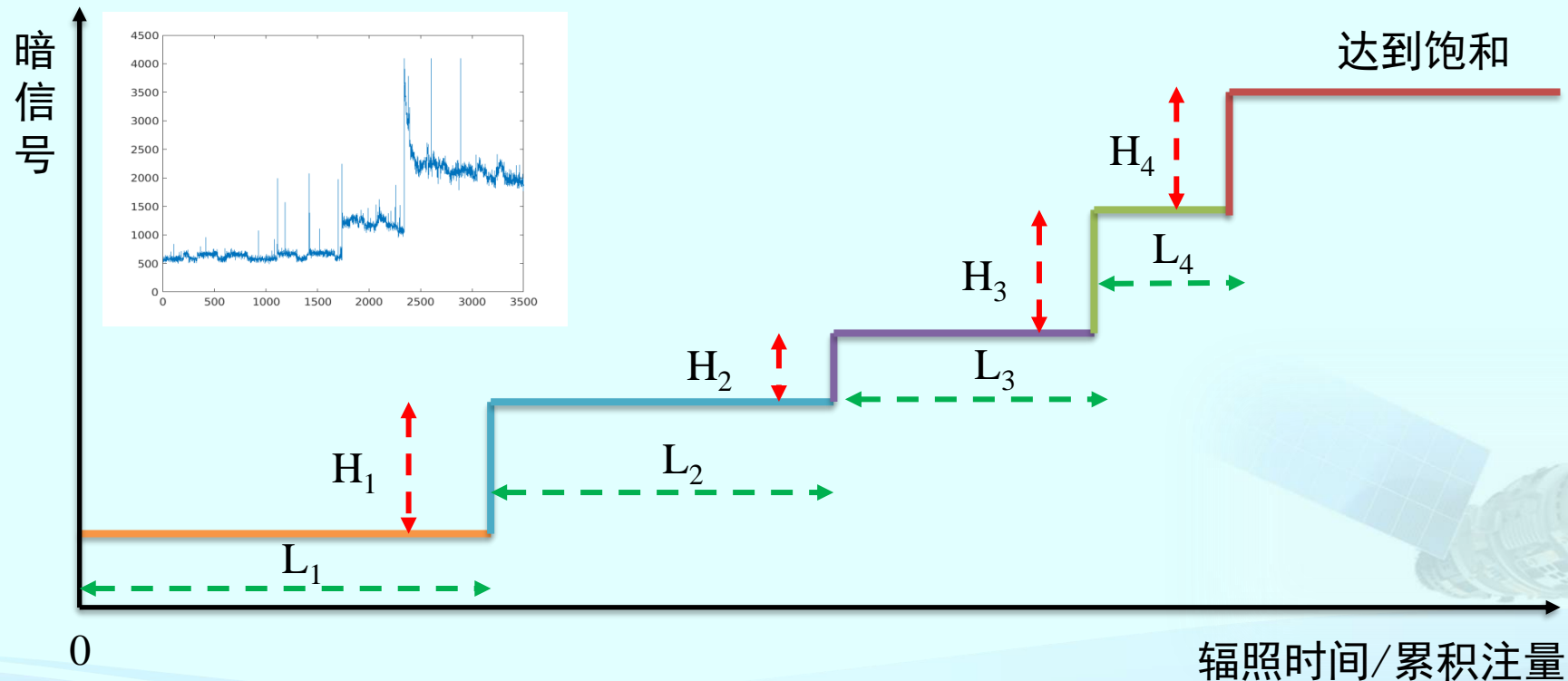
3.中子位移损伤效应研究

- 中子单次碰撞，在图像传感器中产生位移缺陷，导致像素单元输出暗信号阶跃式升高；
- 中子辐照后存在明显的短期退火效应并会产生随机电报噪声。



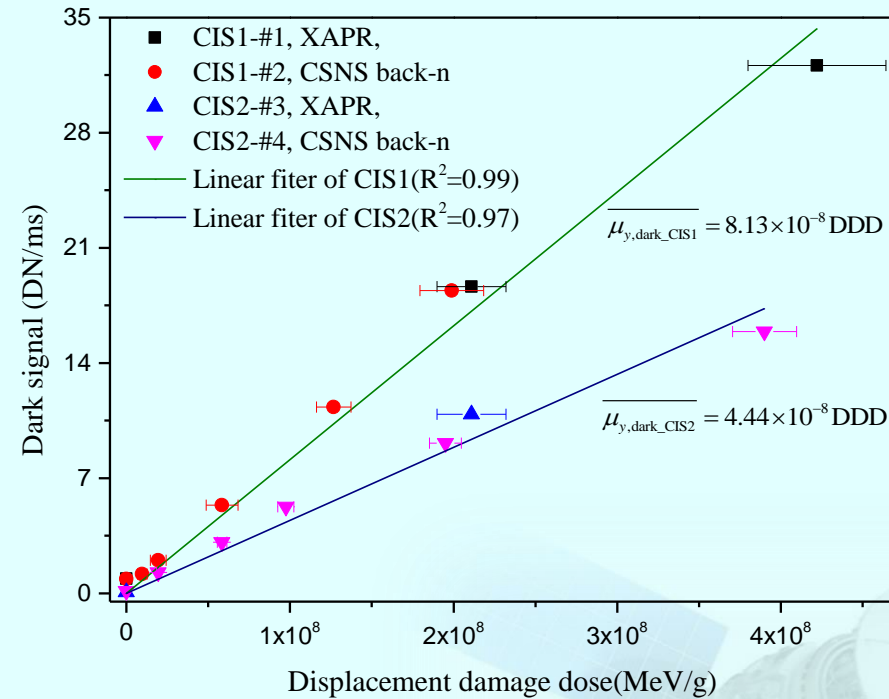
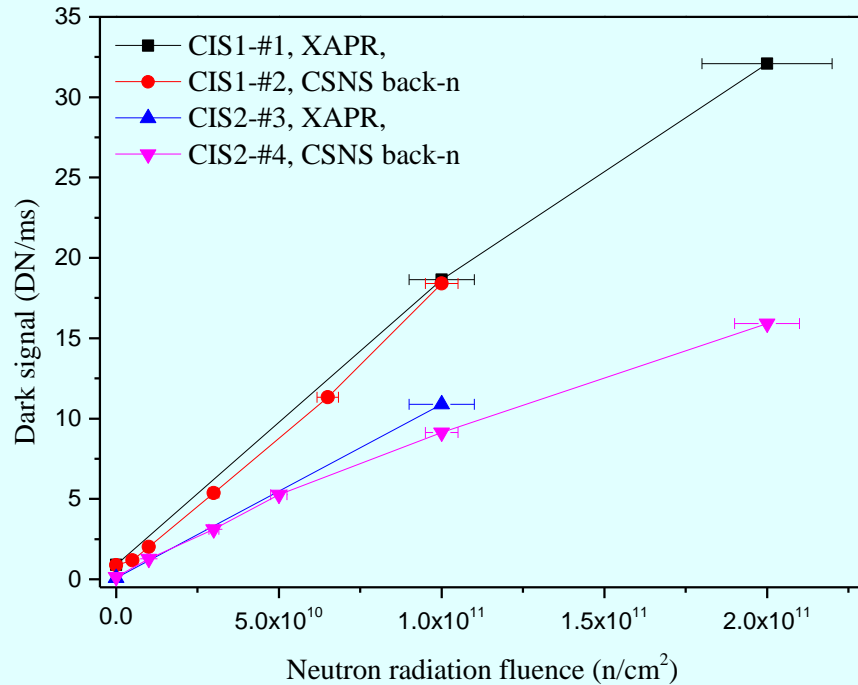
3.中子位移损伤效应研究

- ▶ 暗信号幅值(H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4)与PKA的能量密切相关, 将PKA转换为位移损伤剂量, 从而可以建立其与暗信号幅值的关系;
- ▶ 暗信号阶跃式升高的间隔(L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4)与碰撞截面密切相关。



3.中子位移损伤效应研究

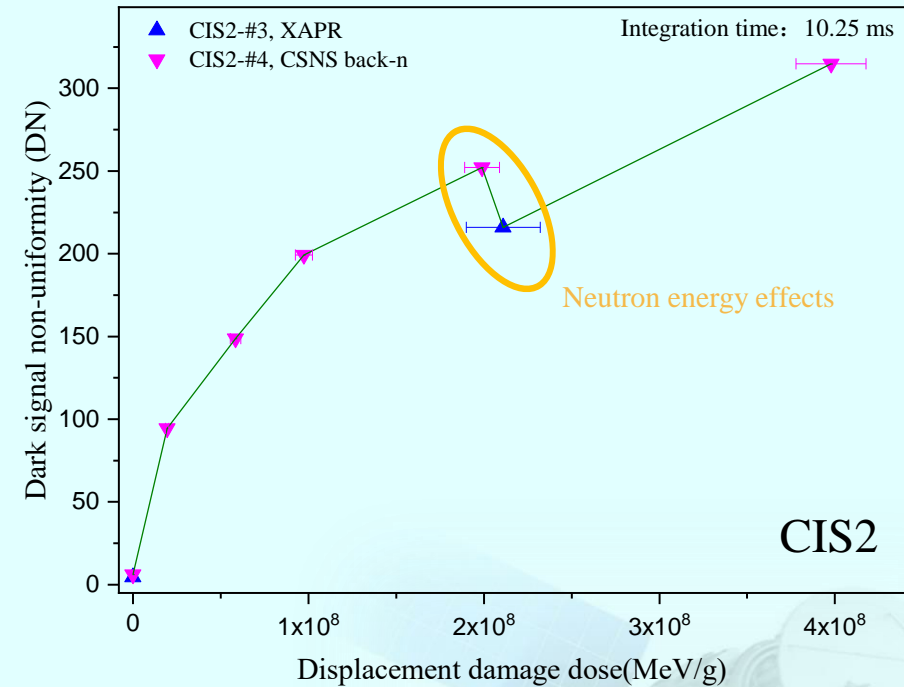
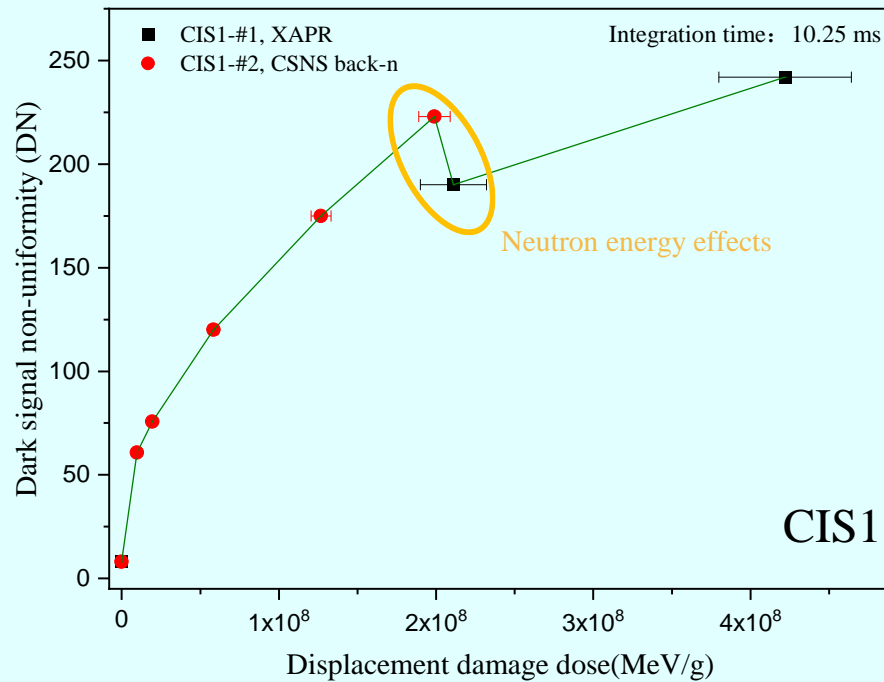
以两款国产大面阵CMOS图像传感器为研究对象，分别在西安脉冲反应堆和白光中子终端上开展了中子辐照实验，给出了平均暗信号随位移损伤剂量的关系。



CMOS图像传感器的平均暗信号与位移损伤剂量成正比，中子能量影响较小。平均暗信号参数可以基于NIEL方法进行等效。

3. 中子位移损伤效应研究

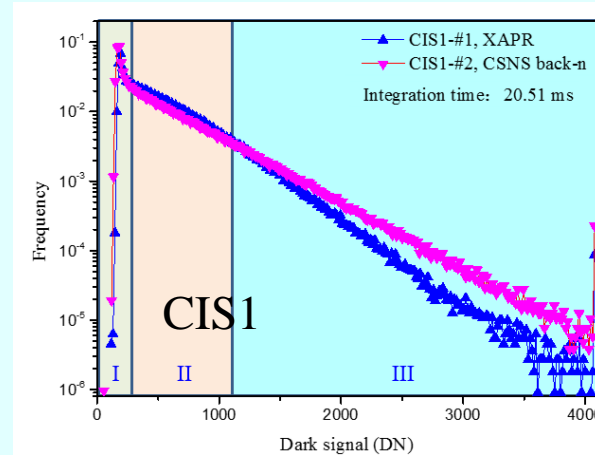
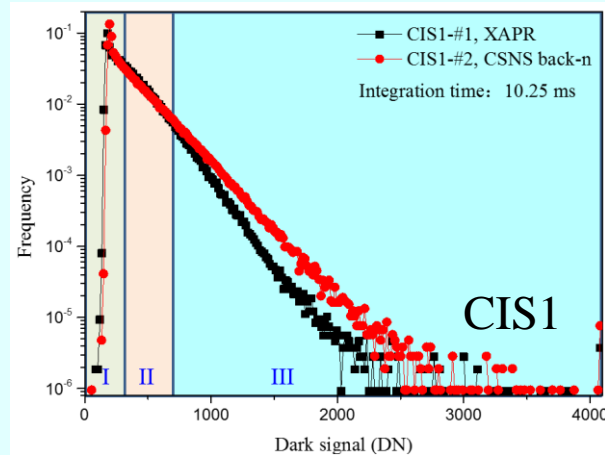
以两款国产大面阵CMOS图像传感器为研究对象，分别在西安脉冲反应堆和白光中子终端上开展了中子辐照实验，给出了暗信号非均匀性随位移损伤剂量的关系。



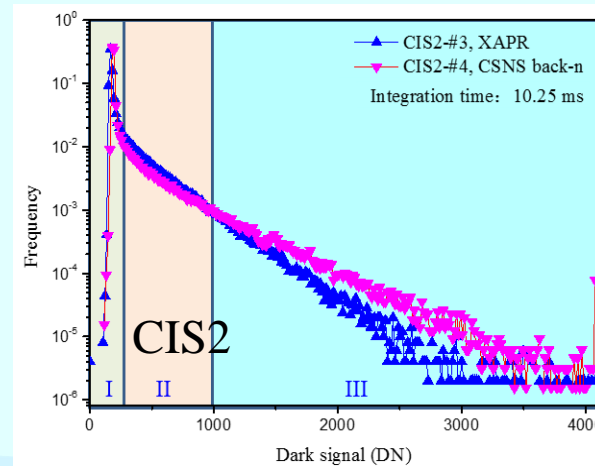
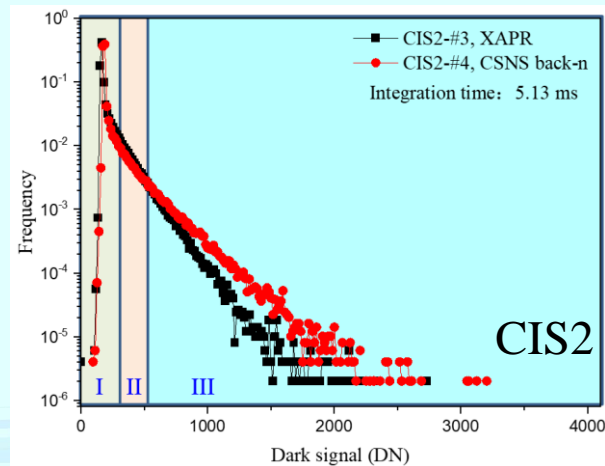
中子能量对CMOS图像传感器的暗信号非均匀性产生较大影响。
暗信号非均匀性参数**不能**基于NIEL方法进行等效。

3. 中子位移损伤效应研究

- 给出了不同积分时间条件下两款国产大面阵CMOS图像传感器在西安脉冲反应堆和白光中子辐照后的暗信号分布曲线。

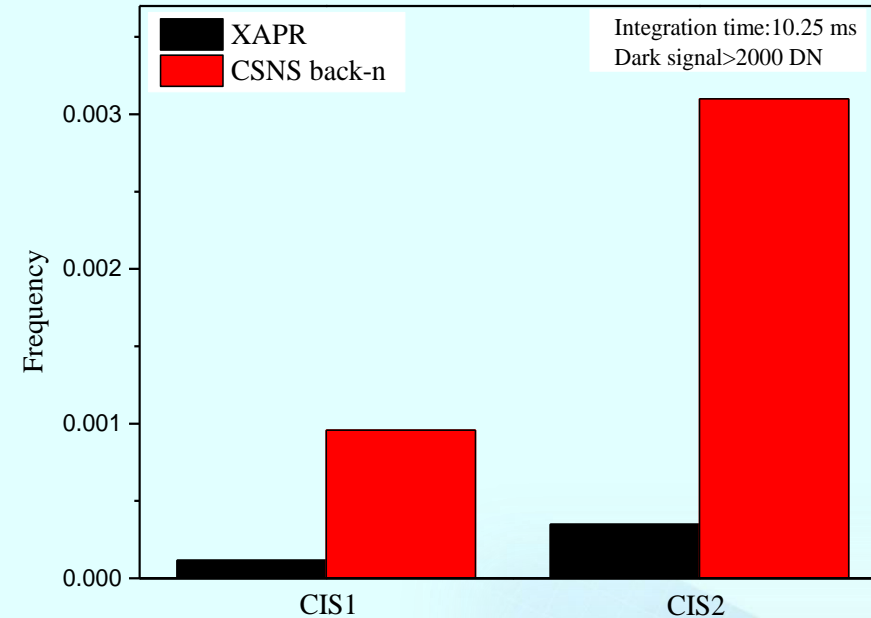
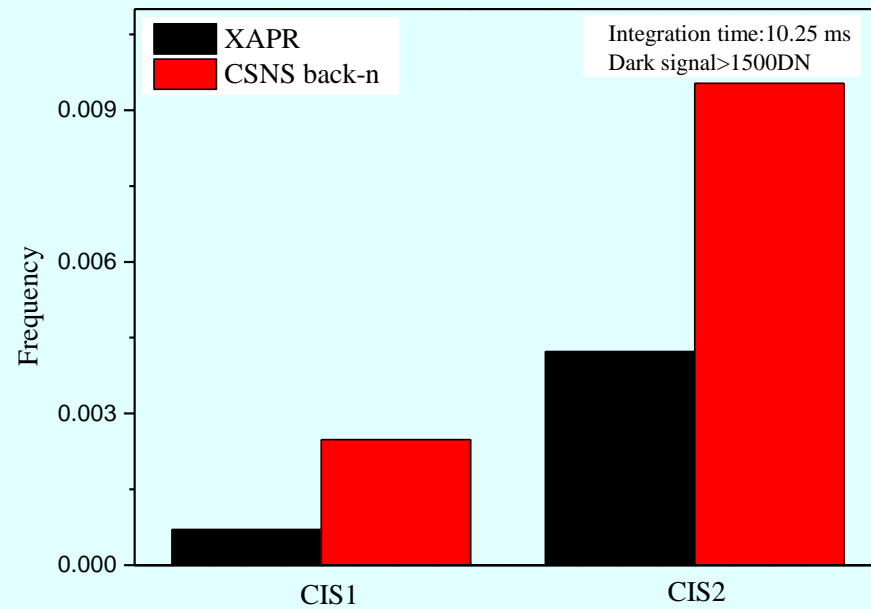


可以看出：CSNS back-n 对暗信号非均匀性的影响大于反应堆中子。



3.中子位移损伤效应研究

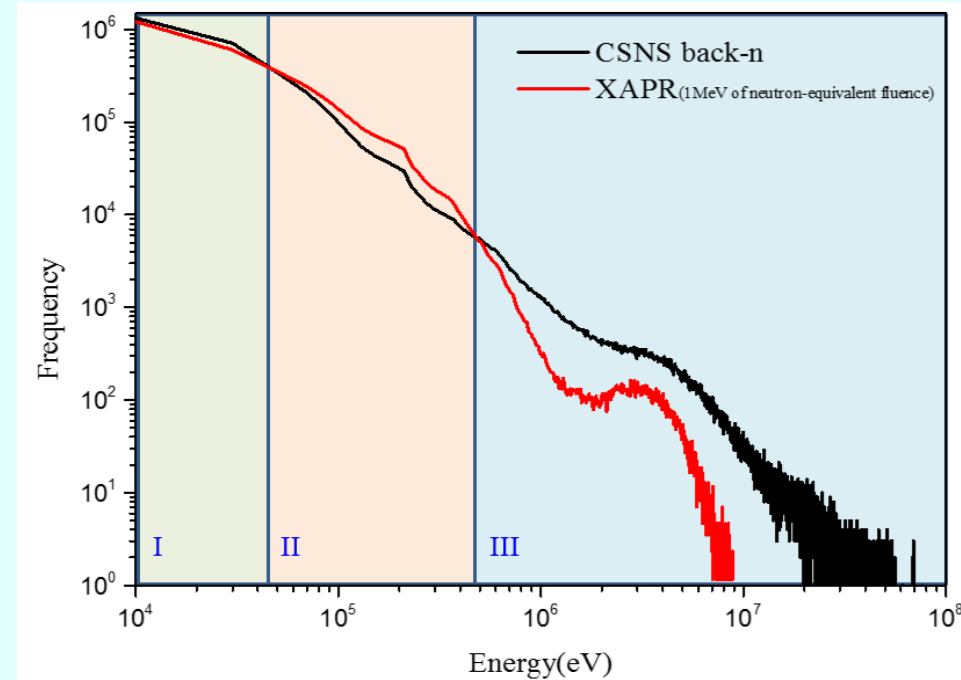
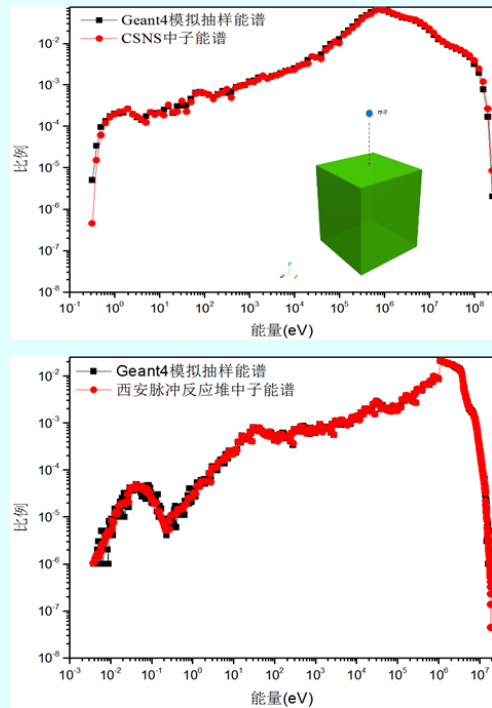
- 给出了不同积分时间条件下两款国产大面阵CMOS图像传感器在西安脉冲反应堆和CSNS back-n辐照后的暗信号尖峰占比。



- CSNS back-n 对CMOS图像传感器暗信号尖峰的影响大于反应堆中子；
- 在评估暗信号尖峰和暗信号非均匀性的过程中需要考虑中子能量带来的影响。

3.中子位移损伤效应研究

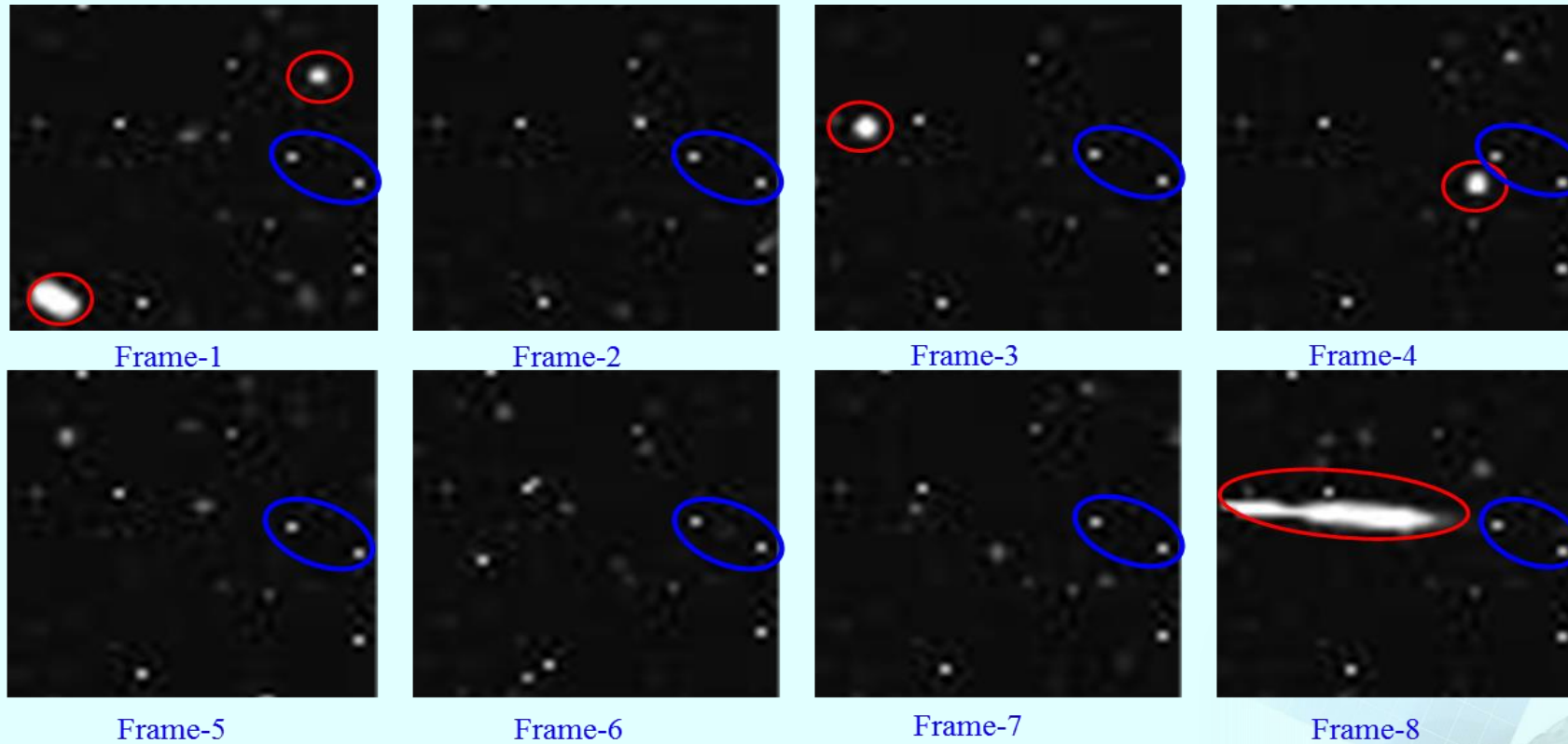
➤ 基于Geant4进行模拟计算，给出了西安脉冲反应堆和CSNS back-n 产生次级粒子的能谱分布。



- CSNS白光中子与反应堆中子产生的PKA分布可以分为三个区域，与辐照实验获得结果吻合度较好；
- 相同位移损伤剂量下，次级粒子能谱的差异是造成暗信号非均匀性不同的本质因素。

3.中子位移损伤效应研究

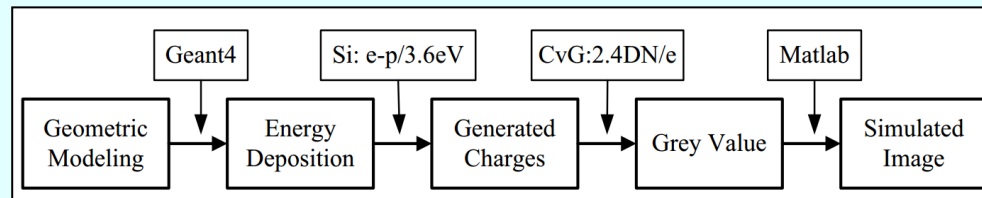
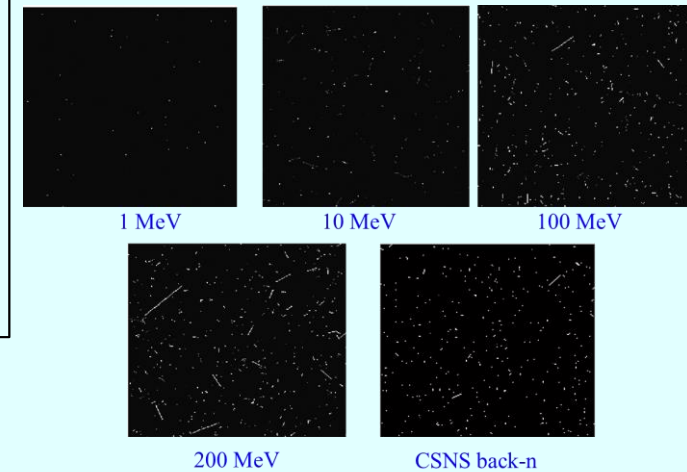
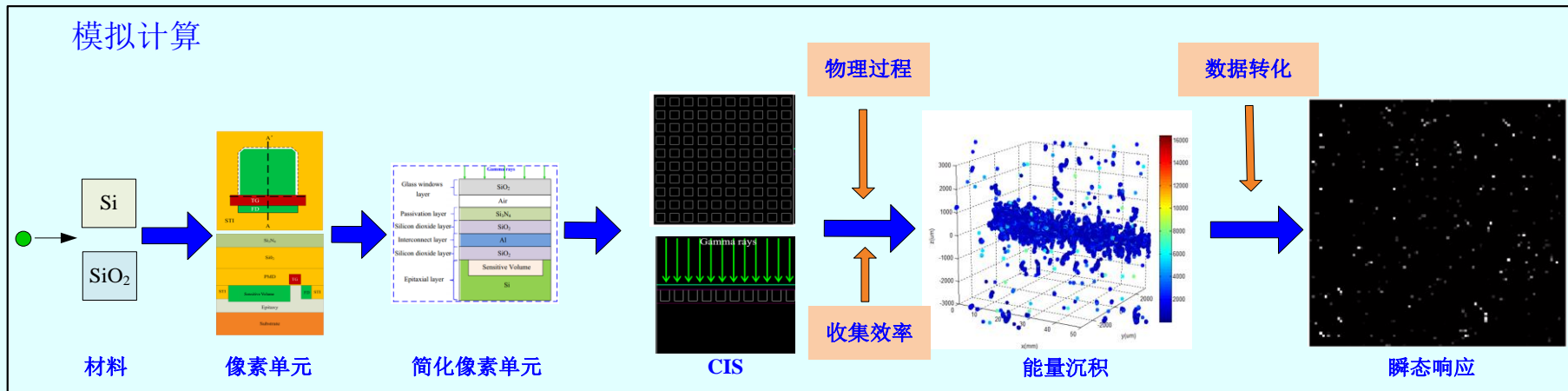
- 获得了中子辐照条件下CMOS图像传感器像素阵列中产生的单粒子瞬态。



- 辐照过程中，中子与材料相互作用产生的次级粒子电离在图像传感器中产生单粒子瞬态；
- 辐照后中子在图像传感器中产生位移损伤，出现大量的热像素尖峰；
- 位移损伤产生的热像素尖峰位置是固定不动的，而单粒子瞬态是随机出现的。

3.中子位移损伤效应研究

➤ 建立了面阵CMOS图像传感器（CIS）像素阵列单粒子瞬态模拟计算方法。

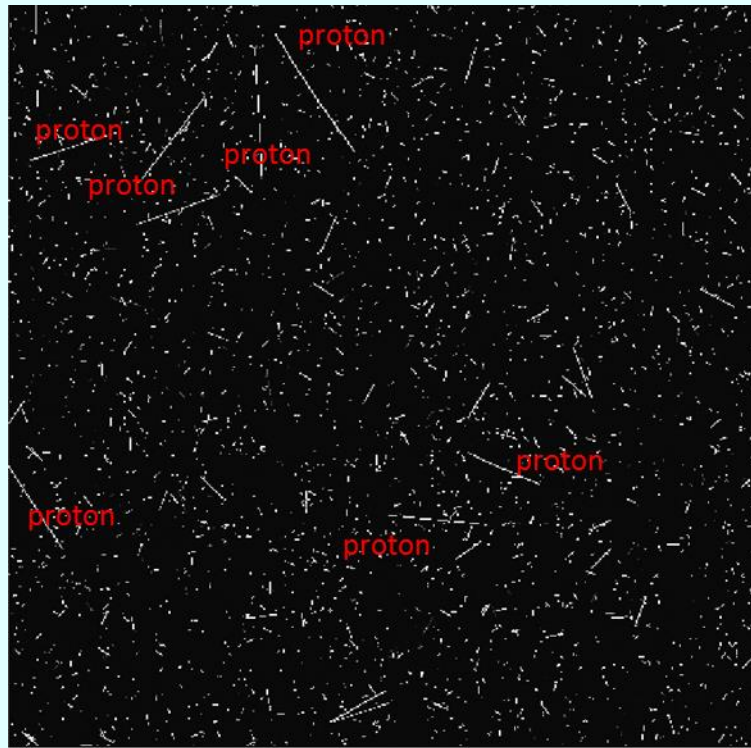


实现了不同能量中子诱发单粒子瞬态的模拟计算

- **器件材料:** 根据射线与物质的相互作用机制，模拟计算了粒子或射线在硅材料中的反应截面、次级电子能量角度分布等；
- **像素单元:** 根据CIS像素单元的几何结构、区域材料和掺杂浓度，构建三维模型，计算粒子或射线在其灵敏体积内的能量沉积；
- **像素阵列:** 构建了面阵三维模型，模拟计算了粒子或射线在面阵CIS中的辐照损伤。

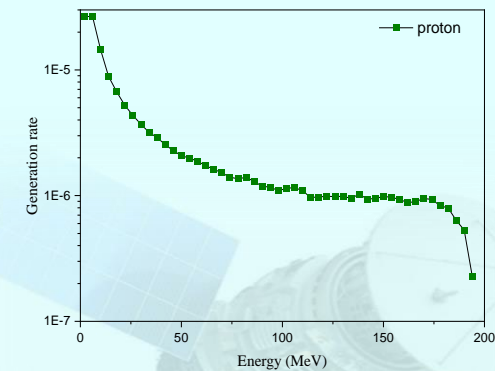
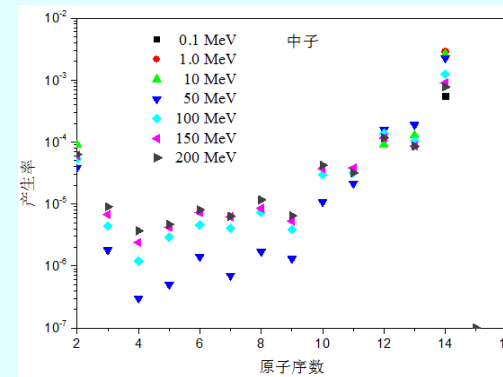
3. 中子位移损伤效应研究

➤ 基于模拟计算结果，分析了产生单粒子瞬态的次级粒子种类。

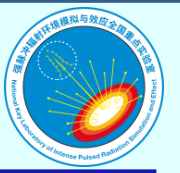


200 MeV neutron

PKA	Generation rate	Average energy (MeV)	Energy range (MeV)
proton	0.000149	39.554	1.6~195.6
gamma	0.000245	2.519	10^{-5} ~70.669
^{28}Si	0.000369	0.0726	3.8×10^{-6} ~12.0
^{24}Mg	0.00000970	2.7234	0.4×10^{-5} ~27.9
^{26}Al	0.000012858	2.3293	3.9×10^{-3} ~21.5
^{27}Al	0.000026322	1.3047	10^{-5} ~19.8



- 单粒子瞬态亮线主要是由高能次级质子造成；
- 单粒子瞬态亮斑主要是由次级重离子造成。

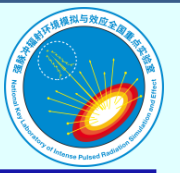


3.中子位移损伤效应研究

➤ 小结

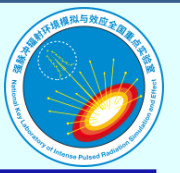
- 硅基晶体管反应堆中子与散裂中子辐照的位移损伤效应结果是一致的，符合NIEL理论。
- 散裂中子具有极低的伴生电离总剂量，更适合开展纯净的中子效应研究。
- 中子单粒子效应能够在图像传感器中产生瞬态的暗信号尖峰和亮线。
- 光电器件某些参数不能够实现位移损伤等效的原因在于次级粒子能谱的差异。





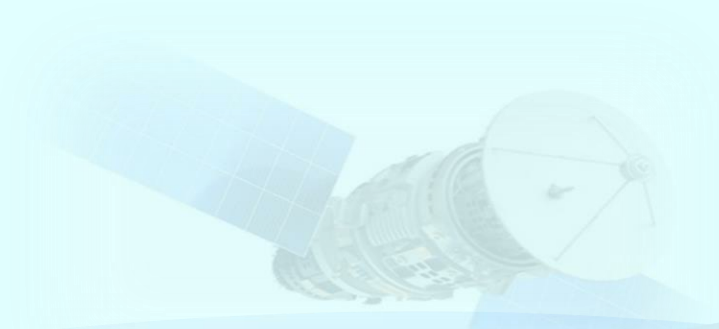
4. 总结与展望

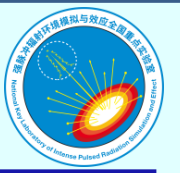
- CSNS反角白光中子具有束斑小、注量率低、 n/γ 比高、能谱宽等优点，在电子器件中子辐射效应研究中已经发挥了重要的作用。
- 建议加强合作，围绕纳米器件中子单粒子效应、COTS器件抗辐射性能评测、系统级抗辐射加固策略有效性验证等热点问题持续开展研究。
- 建议：
 - 提供中子注量在线监测数据，使效应数据分析更加便捷、直观。
 - 目前项目组参考的中子能谱数据来自于2019年的公开报导，经过多年运行，加速器、束线状态是否发生变化，是否有必要更新能谱数据？



致谢

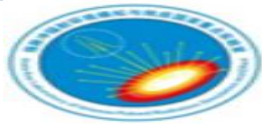
感谢项目组同事刘岩、丁李利、齐超、薛院院、王祖军、张凤祁、金晓明、李俊霖，感谢他们提供试验数据并协助整理报告。





专业组组长单位 指定的抗辐射性能考核试验单位

中国核学会辐射物理分会



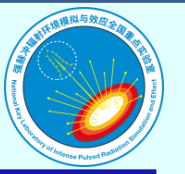
强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室



辐射易损性试验与评估中心
Radiation Vulnerability Test and Evaluation Center

抗辐射加固技术研究创新团队

抗辐照应用技术创新中心



辐射模拟装置

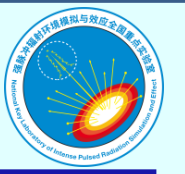
XiPAF 200MeV质子加速器

国内第一台的空间质子辐射环境专用中高能质子模拟装置。可产生**最高能量为200MeV质子**稳态辐射场。

- 注量率范围 10^5 至 $10^8 \text{p}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
- 辐照面积范围1至 100cm^2
- 束斑均匀性好于 $\pm 10\%$ (最大辐照面积)



符合GJB 《空间质子单粒子效应试验方法》要求



辐射模拟装置

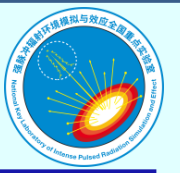
XiPAF 200MeV质子加速器

国内第一台的空间质子辐射环境专用中高能质子模拟装置。可产生**最高能量为200MeV质子**稳态辐射场。

- 注量率范围 10^5 至 $10^8 \text{p}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
- 辐照面积范围1至 100cm^2
- 束斑均匀性好于 $\pm 10\%$ （最大辐照面积）



符合GJB《空间质子单粒子效应试验方法》要求



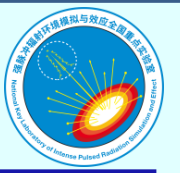
辐射模拟装置

“强光一号”加速器



我国唯一的多功能高功率脉冲电子束加速器，承担了我国所有瞬时剂量率效应试验。

- 元器件级至子系统级试验能力
- 靶面光斑直径100mm
- 符合GJB 7350-2011、GJB548B要求

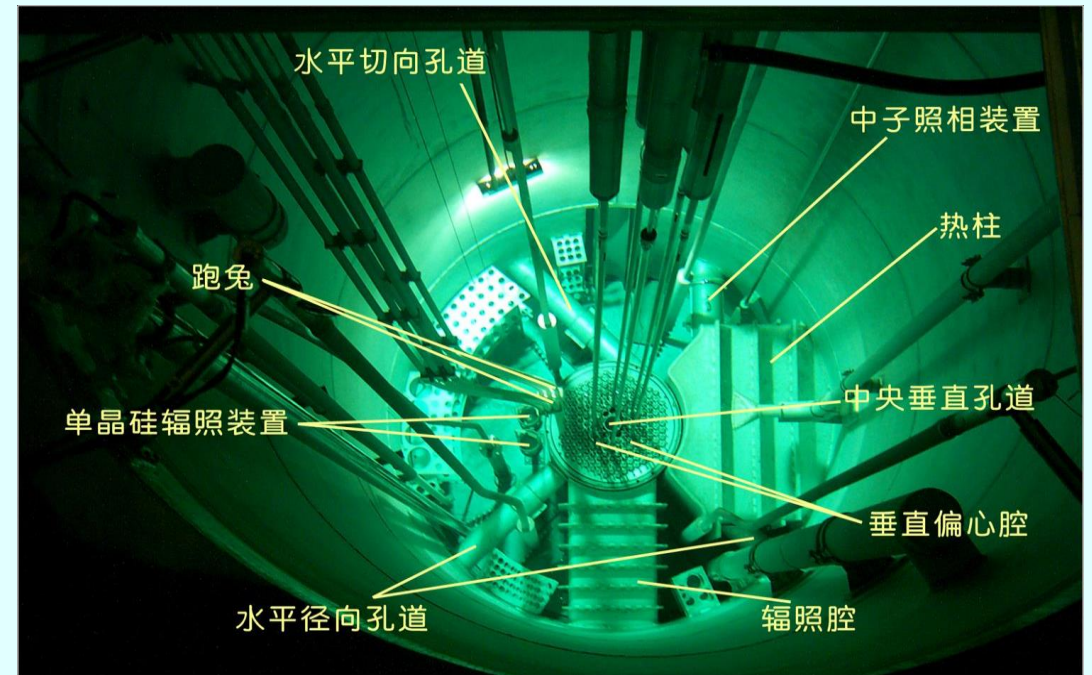


辐射模拟装置

西安脉冲反应堆

国内**唯一**的实用化铀氢锆多功能脉冲反应堆。可产生**稳态**与**脉冲中子**辐射场，用于位移损伤效应、中子单粒子效应试验。

- 专用于空间位移损伤效应试验的径向低注量率中子试验孔道
- 六套不同中子/ γ 比辐照装置
- 元器件级至分系统级试验能力



符合GJB 《元器件位移损伤试验方法》要求

辐射模拟装置

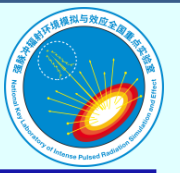
系列化钴源辐照装置

可提供不同剂量率范围的伽马射线辐射环境，用于模拟**空间质子、电子形成的低剂量率环境**。

- 居里级至30万居里Co-60放射源
- 剂量率范围最低小于0.01rad(Si)/s
- 元器件级至**整系统级**试验能力



辐射环境符合GJB5422-2005、《电子元器件低剂量率增强效应加速试验方法》要求



辐射模拟装置

激光微束单粒子效应模拟装置

利用脉冲激光通过光致电离模拟空间单粒子效应的模拟装置。可产生直径约为 $1\mu\text{m}$ 激光光斑，用于快速甄别失效敏感模块。

- 激光波长包括532nm和1064nm
- 激光脉冲宽度21.8ps



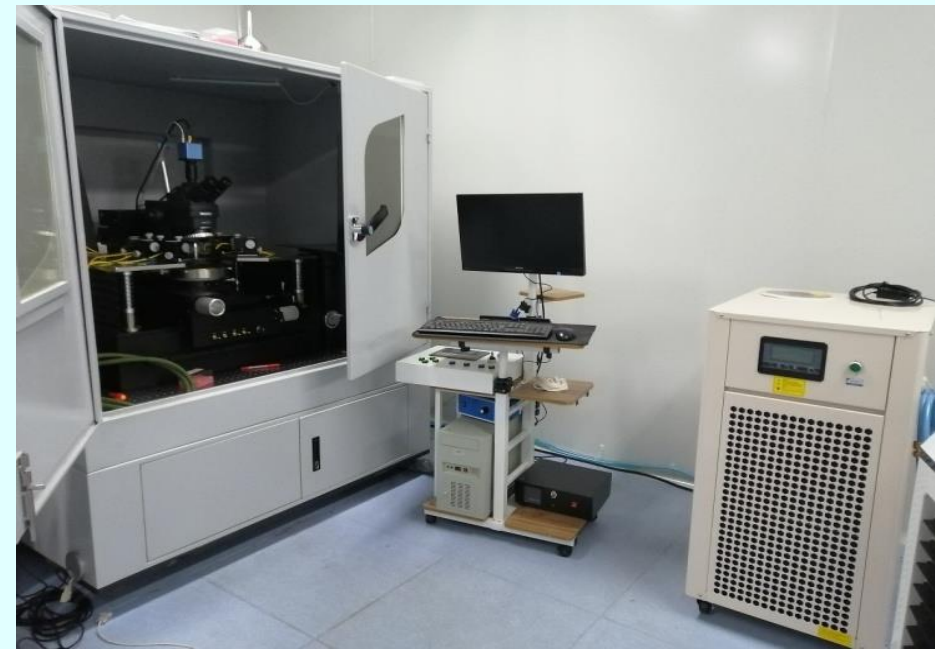
符合GJB 《脉冲激光单粒子效应试验方法》要求

辐射模拟装置

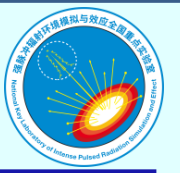
10keV X射线试验平台

利用X射线模拟空间质子、电子引发总剂量效应的模拟装置。可产生**能量在10keV附近的X射线稳态辐射场**。

- 剂量率最高可达2700rad(Si)/s
- 辐照光斑直径可达10cm
- 束斑均匀性好于 $\pm 10\%$



符合GJB7678-2012《半导体器件10keV X射线辐照加固试验方法》要求



效应测试能力

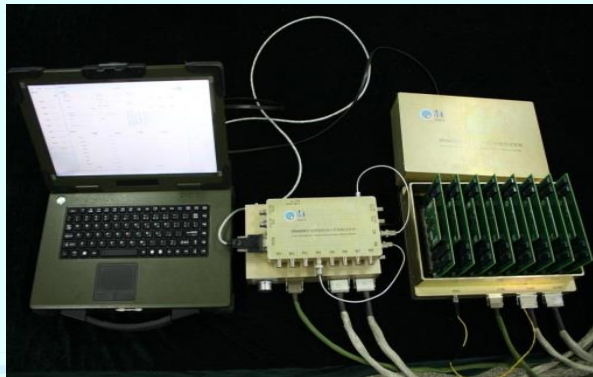
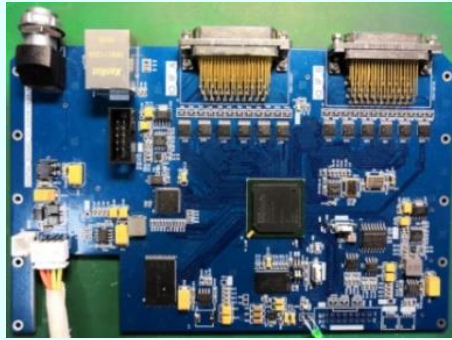
拥有目前国际最先进的系列集成电路测试设备，具备对所有数字电路、模拟电路、数模混合电路、单元电路、光电成像器件的全参数测试能力。可在辐照后最短时间内对辐照样开展失效诊断分析。



典型设备	测试范围
半导体器件分析仪 Agilent B1500A	二极管、双极型晶体管、场效应晶体管等
数字集成电路测试系统 Teradyne J750Ex	数字集成电路
模拟集成电路测试系统 Teradyne ETS-88	模拟集成电路、混合集成电路
超大规模高频集成电路测试系统 Ultra Flex HD	SOC、FPGA、DSP、高速AD/DA等

效应测试能力

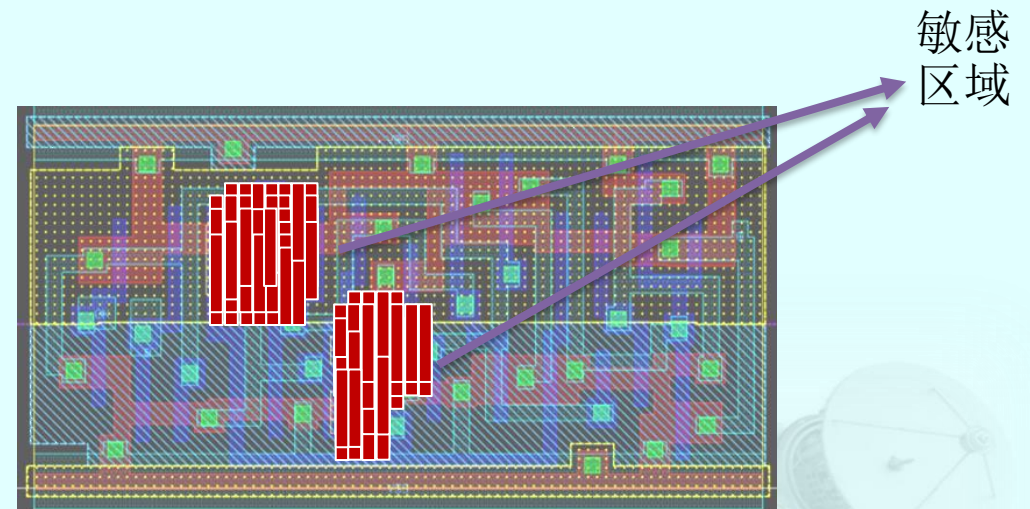
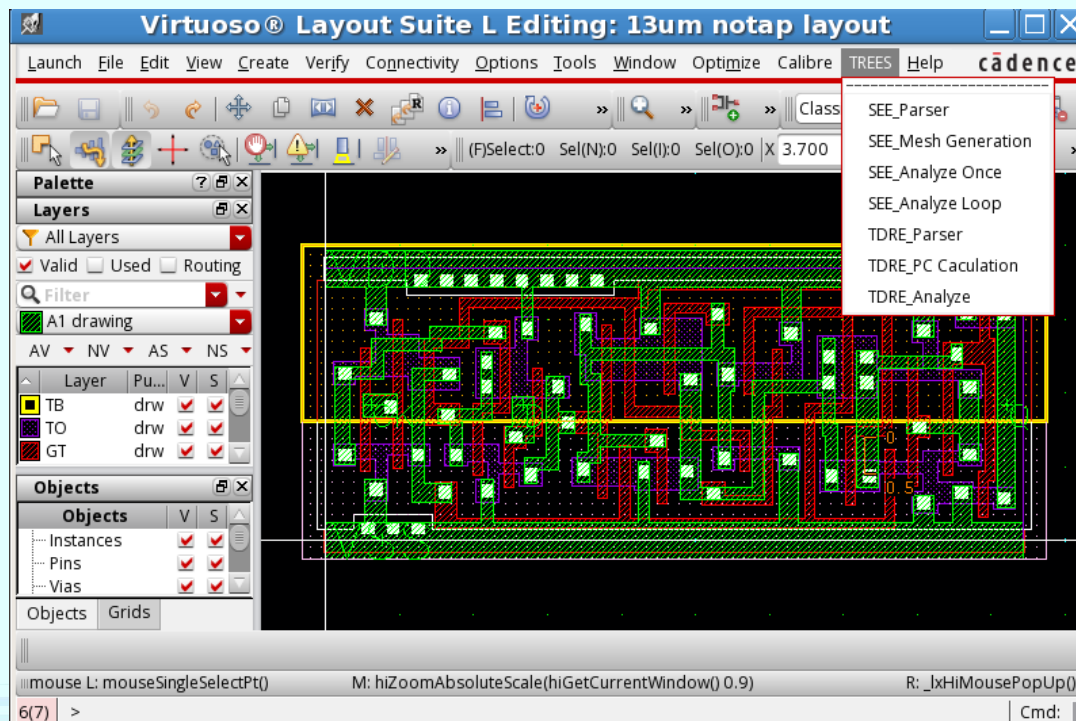
针对各类存储器、FPGA、ADC、DSP等器件研制了系列化的空间辐射效应在线测试系统，已在国家重大项目、国产器件实验中得到应用。



仿真及预估能力

瞬时辐射效应仿真软件TREES

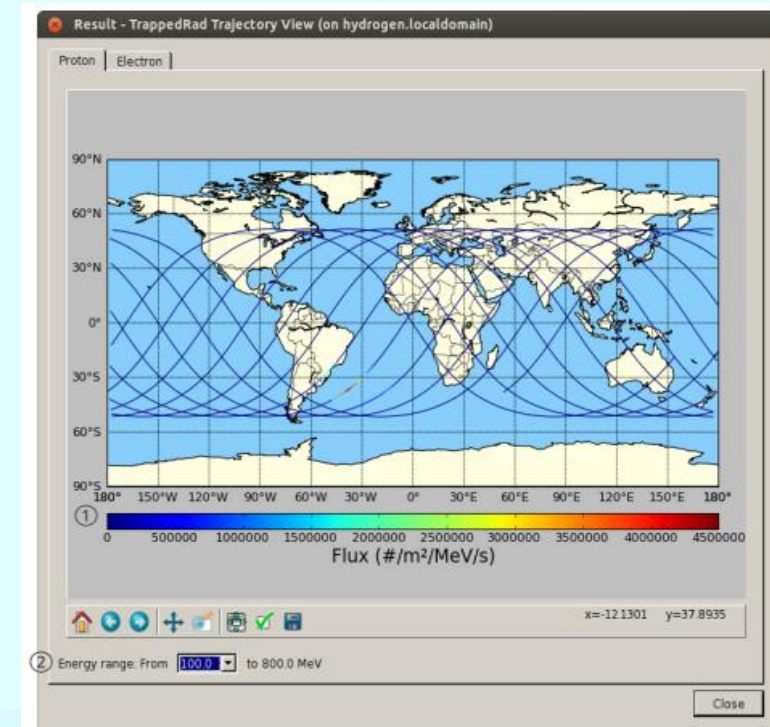
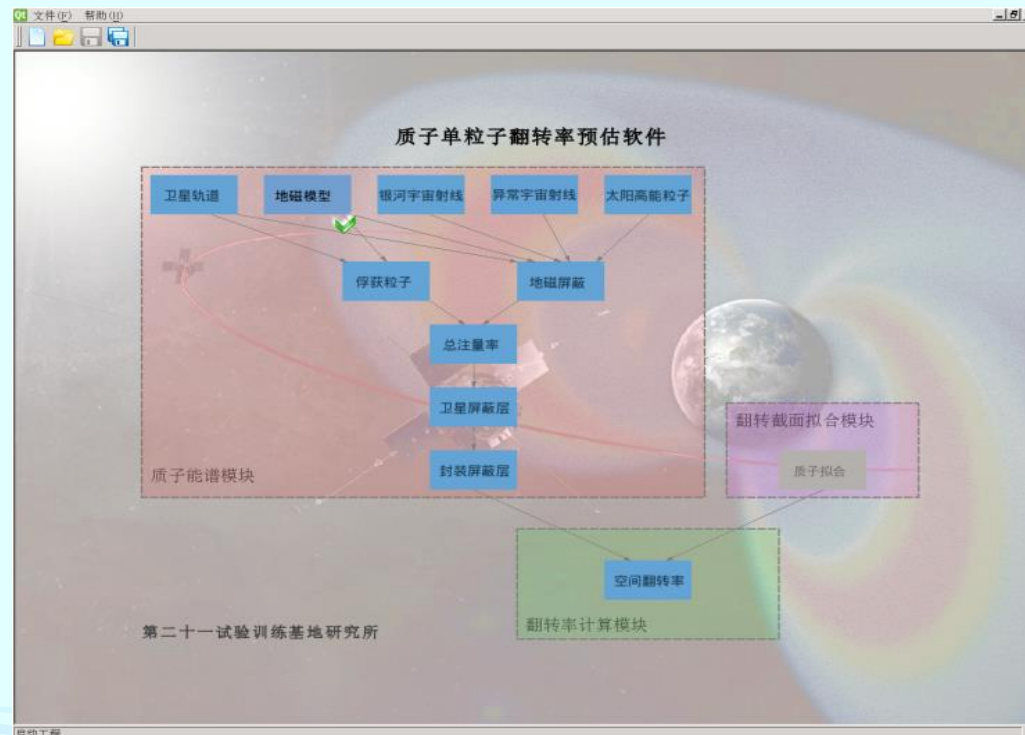
自主开发了国内第一款具备单元电路单粒子效应实时分析功能的应用软件，与实测数据之间的偏差不超过50%。



仿真及预估能力

空间质子单粒子效应预估软件

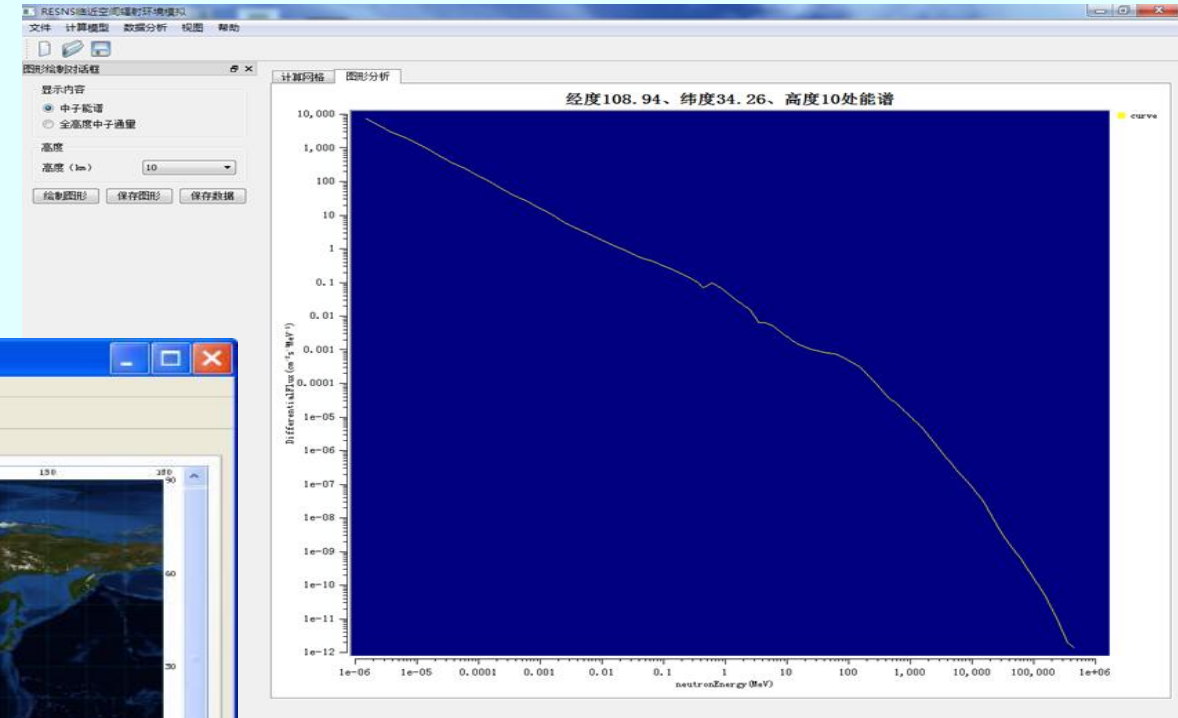
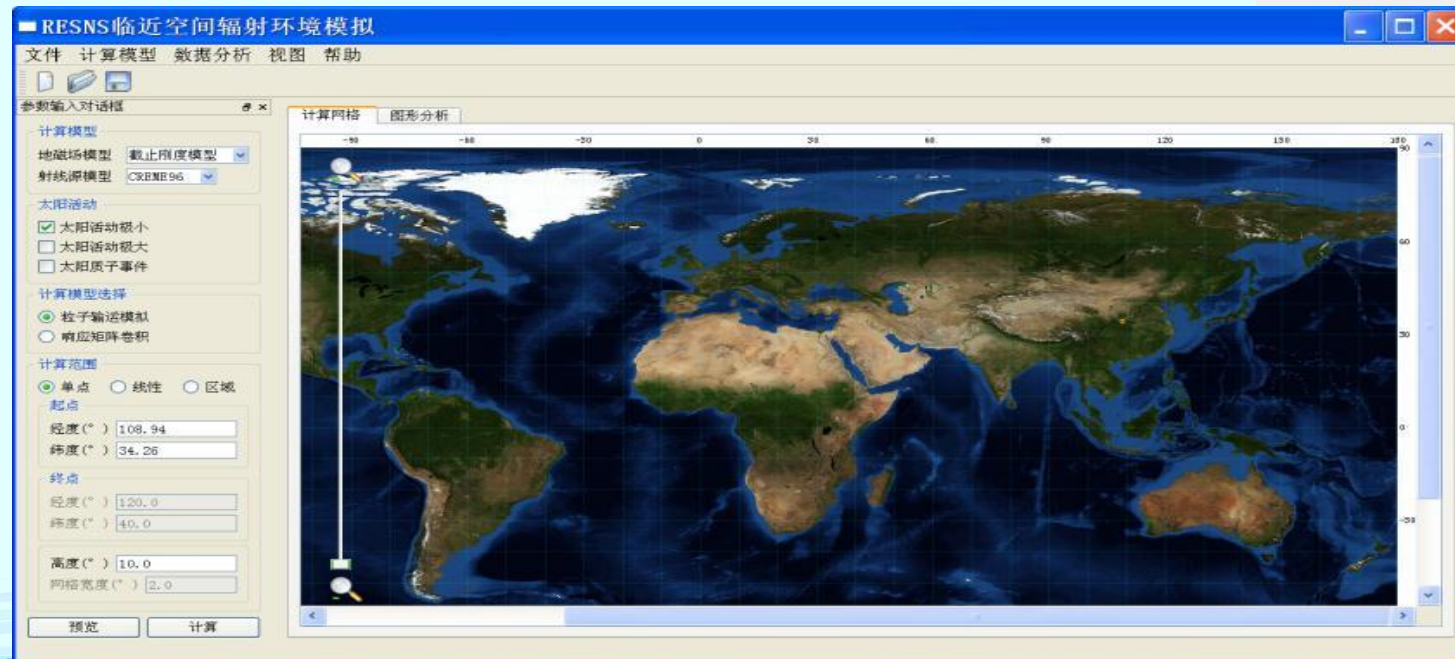
自主开发了空间质子单粒子效应预估软件，与国外同类软件（SpaceRadiation5.0）的预估结果偏差不超过10%。



仿真及预估能力

大气中子辐射环境模拟软件RESNS2.0

- 任意点的环境计算
- 任意航线的环境计算
- 良好的人机交互界面
- 基于并行计算和数据库的快速算法



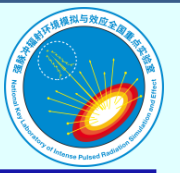
RESNS软件图形化界面及大气中子能谱计算结果

标准规范体系

建立了我国抗辐射性能试验标准规范体系，
为辐射效应试验提供了规范的方法和程序。

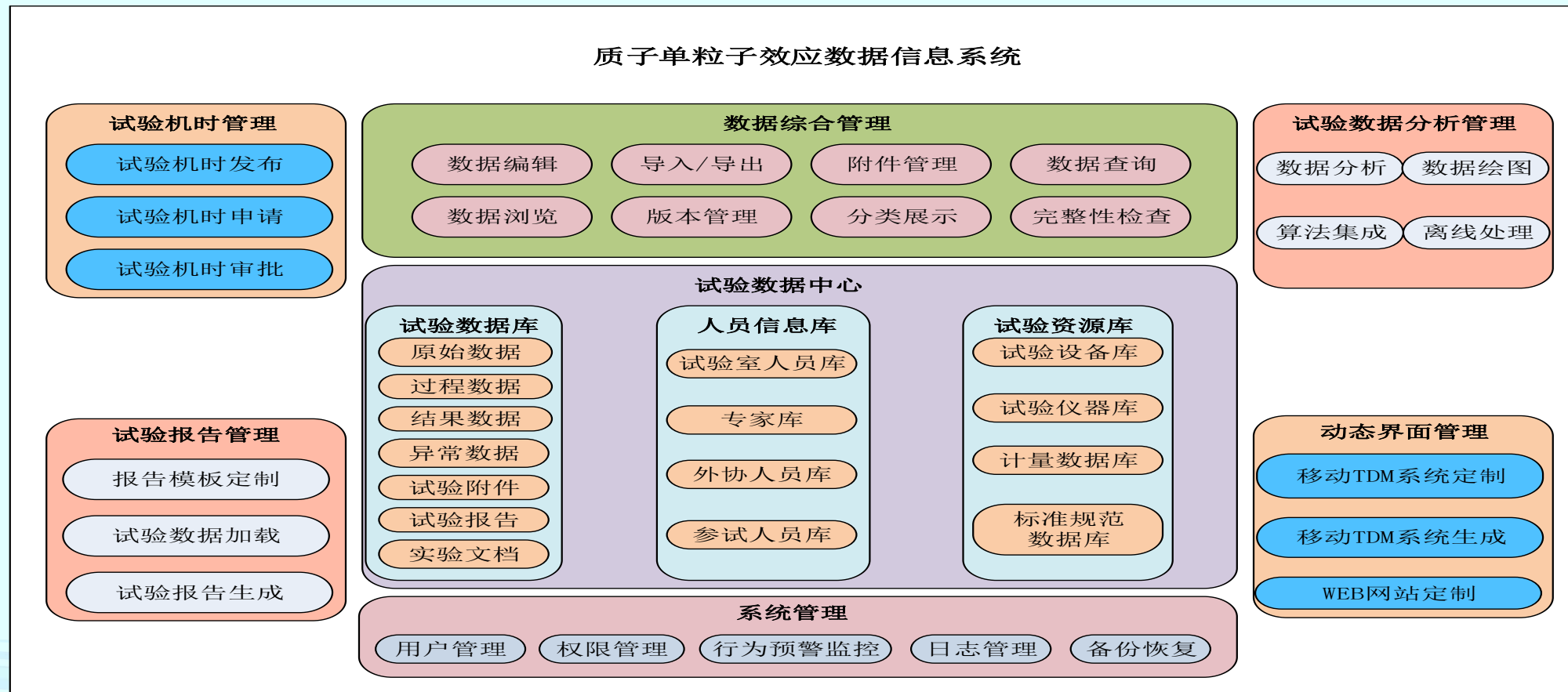
- 单粒子、总剂量、空间位移、中子、剂量率等电子器件辐射效应试验**国家标准**
- 辐射效应试验规范、测试规程、操作规程、安全规程等试验规范性技术文件
- 电子器件抗核辐射性能评估方法

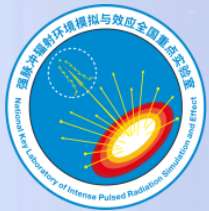




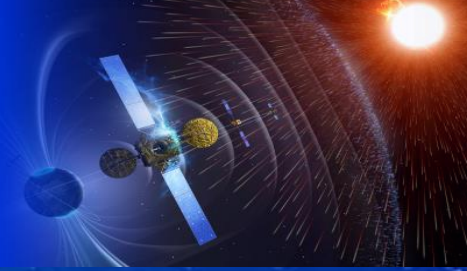
辐射效应数据共享平台

信息系统具备综合信息管理、试验标准及规范管理、辐射效应数据管理、试验机时的网上申请等功能，数据信息格式与上级数据库保持兼容。





强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室
National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect



谢谢各位专家
敬请批评指正

