

中国散裂中子源在大气中子单粒子效应研究中的应用评估

王勋 张凤祁 陈伟 郭晓强 丁李利 罗尹虹

Application and evaluation of Chinese spallation neutron source in single-event effects testing

Wang Xun Zhang Feng-Qi Chen Wei Guo Xiao-Qiang Ding Li-Li Luo Yin-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 052901 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181843

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181843>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报. 2018, 67(7): 72901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

ST401塑料闪烁体的脉冲中子相对光产额评估方法

A method of evaluating the relative light yield of ST401 irradiated by pulsed neutron

物理学报. 2017, 66(6): 62401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.062401>

利用气泡探测器测量激光快中子

Laser fast neutron measured by bubble detector

物理学报. 2018, 67(22): 222101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181035>

基于裂变 γ 标识技术的瞬发裂变中子谱测量新方法

A novel method to measure prompt fission neutron spectrum based on fission γ tagging technique

物理学报. 2018, 67(21): 212501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180563>

多峰场负氢离子源磁体布局对等离子体特性影响的数值模拟研究

Numerical simulation research of plasma characteristics in a multi-cusp proton source based on magnets layout

物理学报. 2015, 64(8): 85203 <https://doi.org/10.7498/aps.64.085203>

质子与中子辐照对电荷耦合器件暗信号参数的影响及其效应分析

Effects of proton and neutron irradiation on dark signal of CCD

物理学报. 2015, 64(19): 194208 <https://doi.org/10.7498/aps.64.194208>

中国散裂中子源在大气中子单粒子效应研究中的应用评估*

王勋[†] 张凤祁 陈伟 郭晓强 丁李利 罗尹虹

(西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2018年10月12日收到; 2018年11月21日收到修改稿)

由于缺少可用的散裂中子源, 多年来我国在大气中子单粒子效应方面主要依靠模拟仿真和单能中子试验的方式开展研究. 随着中国散裂中子源 (CSNS) 通过国家验收, 基于 CSNS 开展大气中子单粒子效应研究成为可能. 本文利用 CSNS 反角白光中子源开展多款静态随机存取存储器器件的中子单粒子效应试验, 并与早期开展的高原大气试验结果进行对比, 对 CSNS 在大气中子单粒子效应研究中的应用进行评估. 结果表明, 相同器件在 CSNS 反角白光中子源测得的单粒子翻转截面小于大气试验的结果, 且不同器件的翻转截面与特征尺寸没有明显的单调关系. 分析得到前者由于 CSNS 反角白光中子谱偏软; 后者由于特征尺寸降低导致的临界电荷变小和灵敏体积变小对截面的贡献是竞争关系. 针对截面偏小的问题, 根据能谱差异分析了中子能量阈值对器件翻转截面的影响, 发现能量阈值取 12 MeV 进行计算时, 器件在 CSNS 反角白光中子源和高原大气中子环境中能够得到较一致的截面. 研究结果表明 CSNS 反角白光中子源能够用于加速大气中子单粒子效应试验. 考虑到 CSNS 的运行功率正在逐步提高, 且多条规划中的白光中子束线与大气中子能谱更为接近, 预期未来 CSNS 将能更好地应用于大气中子单粒子效应研究.

关键词: 大气中子, 单粒子效应, 中国散裂中子源, 反角白光中子源

PACS: 29.25.Dz, 29.30.Hs, 61.80.Hg, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.68.20181843

1 引言

近年来, 大气中子对航空电子系统的辐照效应越来越受到关注. 随着微电子技术的快速发展, 电子器件的特征尺寸和工作电压不断减小, 工作频率不断增加, 单位芯片面积上集成的器件数量随之增加, 这些趋势使得中子单粒子效应导致航空电子设备发生错误的风险不断增大^[1]. 事实上, 大气中子单粒子效应不仅威胁航空电子设备的可靠性^[2,3], 地面上越来越多的电子设备如心脏起搏器、超级计算机、高铁控制系统、高速网络系统、大容量数据存储服务器等对可靠性要求高的电子系统也将面临大气中子单粒子效应的威胁^[4,5]. 大气中子单粒

子效应可能导致这些系统状态发生翻转、数据错误, 严重时会导致系统通讯中断、控制异常, 对系统的可靠性与安全性构成威胁, 甚至危及人的生命^[6]. 因此, 研究大气中子单粒子效应, 预估其产生的危害, 对于提升关键应用系统的可靠性和安全性具有重要意义.

美国早在 20 世纪 90 年代初就通过航空飞行实验证明了大气中子能够诱发器件发生单粒子效应^[7], 引起了欧美一些航空大国的关注. 随后开展了一系列飞行试验对大气中子单粒子效应进行研究^[2,8-10]. 由于飞行试验高昂的成本和风险, 人们转而在地面开展试验研究大气中子的单粒子效应^[4,11-17]. 在地面上可使用以下 3 种中子辐射源:

1) 地面 (高山) 大气环境^[14], 提供无误差大气

* 国家自然科学基金 (批准号: 11690040, 11690043, 61634008) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangxun@nint.ac.cn

中子辐射环境, 但注量率太低, 能够用于开展中子单粒子效应试验, 但时间成本非常大;

2) 散裂中子源^[15], 提供全能谱中子, 其能谱与大气中子辐射环境比较相似, 非常适合开展中子单粒子效应试验;

3) 单能中子源^[16,17], 提供单一能量中子, 比较适合开展中子单粒子效应试验, 若需获得器件抗中子单粒子能力的连续谱, 需要在不同的中子辐射源上开展试验.

表 1 给出 3 种中子源与航空高度大气环境的

对比. 综合各方面因素, 因散裂中子源能谱与大气中子能谱较接近, 可以用作仿真大气中子束流, 且中子注量率是大气中子场的数百万倍, 是研究存储芯片和大规模集成电路单粒子效应的较为理想的模拟源^[15]. 此前, 国际上已经用于开展大气中子单粒子效应试验的散裂中子源主要有美国洛斯·阿拉莫斯中子科学中心的散裂中子源、俄罗斯圣彼得堡核物理研究所的散裂中子源、加拿大的散裂中子源、瑞典斯维德贝格实验室的散裂中子源和英国鲁涉福德阿普顿实验室的散裂中子源^[18].

表 1 大气中子单粒子效应试验中子源
Table 1. Neutron sources for atmospheric neutron SEE experiment.

中子源	中子谱	优点	缺点	相关文献报道	
				国外	国内
航空高度环境	完全相同	无误差环境	成本高	√	×
地面大气环境	谱形状相同	无误差环境	注量率低耗时长	√	×
散裂中子源	谱形状相似能量范围不同	能谱范围大注量率高	模拟源少	√	×
单能中子源	单能	模拟源多成本低	需要多个能量点	√	√

随着国内航空工业的发展, 国内学者对大气中子单粒子效应的关注也越来越多^[19-22], 但受限于缺少可用于模拟大气中子的散裂中子源, 国内相关研究只能基于模拟仿真^[23-25]或单能中子源^[26,27]展开. 随着中国散裂中子源 (CSNS) 于 2018 年 8 月 23 日通过国家验收, 基于 CSNS 开展大气中子单粒子效应研究成为可能^[28]. CSNS 项目中规划了 4 条可以用于大气中子研究的束线, 分别是第 1 靶站质子入射反方向和 41° 方向引出的两条白光中子束线, 第 2 靶站在引出方向与质子入射方向夹角为 30° 和 15° 的两条白光中子束线. 目前仅第 1 靶站的反角白光中子源建成可用, 其余 3 条束线尚在规划建设过程中.

本文利用 CSNS 反角白光中子源开展多款静态随机存取存储器 (SRAM) 器件的中子单粒子效应试验, 给出试验开展的方法流程及试验结果, 并将结果与前期在西藏羊八井宇宙射线观测站开展的 SRAM 高原大气中子辐照试验结果进行对比.

对 CSNS 在大气中子单粒子效应研究中的应用进行评估.

2 CSNS 反角白光中子源辐照试验

2.1 试验对象

存储器是多数高可靠电子系统中的不可缺少且对大气中子单粒子效应敏感的微电子器件, 本文以 SRAM 存储器为对象, 开展大气中子单粒子效应试验. 考虑到 SRAM 器件工艺及设计上的差异会对器件的中子单粒子效应的敏感性产生影响, 为增强实验数据的可比性, 对实验器件的选择遵循相同厂家、相同系列、相同工艺和相同单元结构的原则. 根据上述原则, 在 HITACHI/RENESAS 公司生产的 HM62 系列互补金属氧化物半导体工艺商业级 SRAM 器件中选择 3 款, 它们具有相同的单元结构, 特征工艺尺寸分别为 0.18, 0.35, 和 0.5 μm . 器件详细参数如表 2 所列.

表 2 待测 SRAM 器件参数
Table 2. Parameters of the SRAM devices for test.

型号	制造商	容量/bits	特征尺寸/ μm	工作电压/V
HM62V8100	RENESAS	8 M (1 M \times 8 bit)	0.18	3
HM628512B	HITACHI	4 M (512 K \times 8 bit)	0.35	5
HM628512A	HITACHI	4 M (512 K \times 8 bit)	0.50	5

2.2 试验源及条件

CSNS 是一个可开展多学科研究的国家大科学装置. 它利用 1.6 GeV 入射质子轰击钨靶产生大量中子, 中子能谱很宽, 设计最高能量达 1 GeV 以上, 即使是反角方向能量也可达 200 MeV, 可用于开展核数据测量和中子辐照试验. 反角白光中子源实验终端的布局如图 1 所示, 高能质子沿质子通道

到达钨靶. 入射质子束流将被距钨靶 20 m 处的偏转磁铁偏转 15°; 在环到靶的运输线上钨靶到偏转磁铁之间质子束流与中子束流将共用一部分真空束流管; 在偏转磁铁处中子束流和质子束流自然分离. 基于 CSNS 质子运输线的此特点, 在偏转磁铁后建有专用的中子通道, 在中子通道约 56, 76 m 处建有两个试验厅: 终端 1 和终端 2^[28].

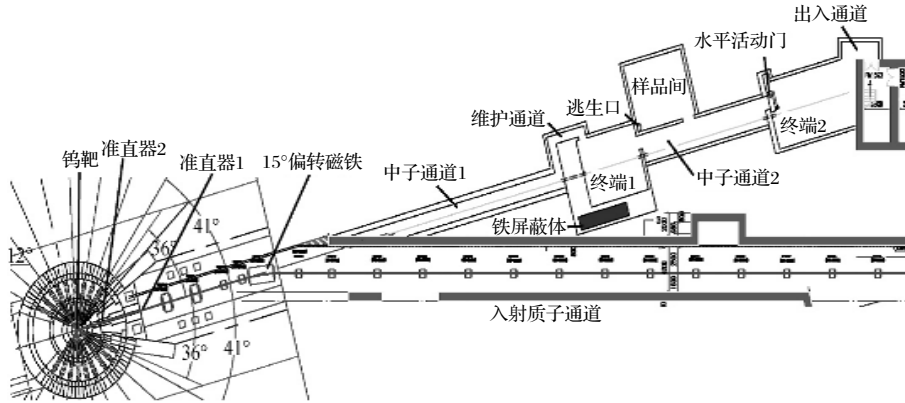


图 1 CSNS 反角白光中子源实验终端布局^[28]

Fig. 1. Layout of back-n at CSNS^[28].

本文在终端 2 中开展 SRAM 中子单粒子效应辐照试验, 终端 2 的束流能量范围是 0.1 eV—200 MeV. 试验过程中 CSNS 运行在 20 kW 附近, 注量率约为 1.6×10^6 n/(cm²·s). 图 2 给出了 20 kW 附近运行时终端 2 处的中子微分能谱与羊八井大气中子微分能谱的对比. 可以看出, CSNS 反角白光中子源与真实的大气中子能谱比较相近.

地上的控制间, 两个区域垂直距离约 25 m, 以保障人员的安全. 由于试验厅内本底较低, 试验过程中直接将测试板置于试验厅内, 另一方面为了减小人员受到的辐照剂量, 测试人员在控制间通过远程计算机控制整个试验流程, 试验厅和控制间通过以太网进行连接, 如图 3 所示.

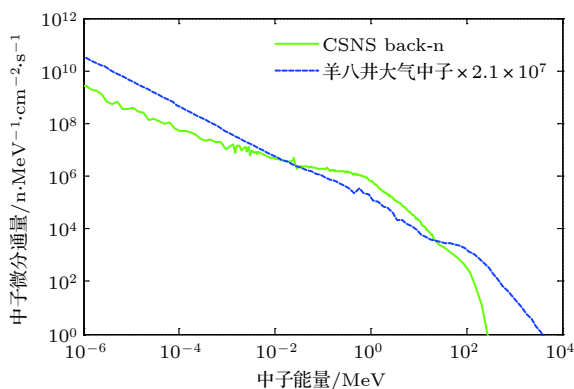


图 2 CSNS 反角白光中子源终端 2 与羊八井大气中子微分能谱对比

Fig. 2. Comparison between the differential neutron energy spectra of CSNS back-n and Yangbajing.

2.3 试验方法

试验现场包括位于地下的试验厅 (终端 2) 和

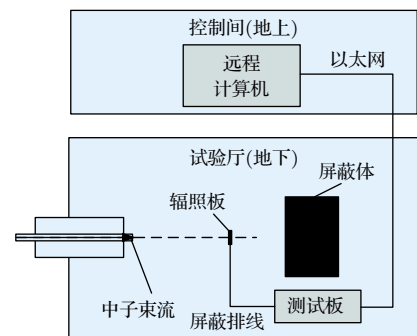


图 3 CSNS 反角白光中子源辐照试验布局示意图

Fig. 3. Layout of the irradiation experiment at CSNS back-n.

CSNS 反角白光中子源的试验终端 2 可以提供 $\Phi 3$ cm, $\Phi 6$ cm 和 9 cm \times 9 cm 的中子束流, 本文选择 $\Phi 6$ cm 的束流开展单粒子效应辐照试验. 为保证试验数据的可靠性, 每种型号器件选择 3 片器件同时进行辐照, 如图 4 所示.

每款器件进行 4 轮测试, 每轮测试写入不同的

数据, 4 轮测试分别写入 0x00H, 0x55H, 0xAAH 和 0xFFH. 监测方法是通过对比中子辐照前后被测 SRAM 器件中的数据变化来统计单粒子翻转数. 单粒子翻转监测有动态和静态两种方法, 为实时掌握测试过程的情况, 采用动态监测方法, 即辐照前向存储单元写入数据, 每隔固定时间间隔回读数据, 并与写入数据进行逐位比对统计错误的比特位数. 试验过程中实时监测辐照板电流, 当超过一定阈值时认为发生单粒子门锁效应, 然后给辐照板重新上电, 重新写入数据进行测试.

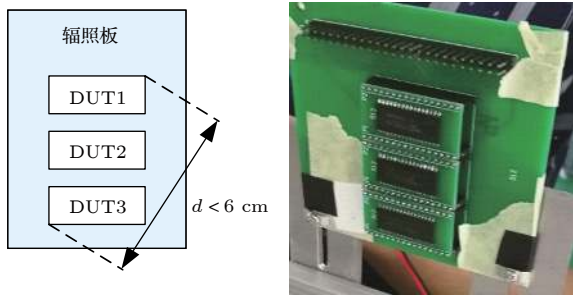


图 4 辐照过程中的器件布局
Fig. 4. Layout of the devices under test.

2.4 试验结果

试验过程中, 所有器件均观测到单粒子翻转效应; 此外 HM628512B 还观测到单粒子门锁效应. HM628512B 测试 0x55H 图形时, DUT2 的翻转数明显高于 DUT1 和 DUT3 予以剔除, 其余测试中每款 SRAM 的 3 片器件的翻转数量相差不大, 均认定为有效数据. 得到翻转位置的物理地址均匀分

布, 可以认为观测到的翻转全部是中子导致的单粒子翻转.

SRAM 器件的中子单粒子效应翻转截面计算公式如下:

$$\sigma_{\text{SEU}} = \frac{N_{\text{SEU}}}{C\Phi}, \quad (1)$$

式中 σ_{SEU} 为中子单粒子翻转截面, 单位为 cm^2/bit ; N_{SEU} 为实验测得的单粒子翻转数, 单位为次; C 为被测 SRAM 器件的总容量, 单位为 bit; Φ 为有效注量, 区别于单能中子辐照试验中的总注量, 这里 Φ 应该取总注量中大于能量阈值的部分, 单位为 n/cm^2 . 如果 Φ 取总注量则会低估被测器件的单粒子翻转 (SEU) 截面. 一般认为, 对 SRAM 敏感的能区主要是能量大于 1 MeV 的中子^[18,28], 因此首先假设三种器件的能量阈值均为 1 MeV. 定义大于能量阈值的部分注量为有效注量, 则根据图 2 给出的微分能谱可以计算出有效注量为总注量的 45.73%. 利用 (1) 式可得到不同器件不同测试图形下的翻转截面, 由表 3 给出. 可以看出, 不同测试图形下获得的每种器件翻转截面相差不大.

此外, 在 HM628512B 的辐照过程中, 3 个器件共观测到 12 次门锁, 总注量为 $1.36 \times 10^{10} \text{ n}/\text{cm}^2$. 若仍考虑 45.73% 的有效注量, 则由 (2) 式计算单粒子门锁 (SEL) 截面为 $2.94 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{device}$.

$$\sigma_{\text{SEL}} = \frac{N_{\text{SEL}}}{N_{\text{device}}\Phi}, \quad (2)$$

式中 σ_{SEL} 为中子单粒子门锁截面, 单位为 $\text{cm}^2/\text{device}$; N_{SEL} 为实验测得的单粒子门锁次数, 单位为次;

表 3 在 CSNS 反角白光中子源的 SEU 测试结果
Table 3. Test result of the SEUs in CSNS back-n.

型号	测试图形	总容量/bit	总注量/ $\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}$	有效注量占比/%	翻转数(#)	翻转截面/ $\text{cm}^2\cdot\text{bit}^{-1}$	置信水平/%
HM62V8100	0x00H	24M	2.90×10^9	45.73	343	1.02×10^{-14}	94.6
	0x55H	24M	2.89×10^9	45.73	367	1.10×10^{-14}	94.8
	0xAAH	24M	2.89×10^9	45.73	387	1.16×10^{-14}	94.9
	0xFFH	24M	2.93×10^9	45.73	342	1.01×10^{-14}	94.6
HM628512B	0x00H	12M	3.12×10^9	45.73	207	1.15×10^{-14}	93.0
	0x55H	8M	3.84×10^9	45.73	197	1.34×10^{-14}	92.9
	0xAAH	12M	4.90×10^9	45.73	303	1.07×10^{-14}	94.3
	0xFFH	12M	1.78×10^9	45.73	114	1.11×10^{-14}	90.6
HM628512A	0x00H	12M	3.03×10^9	45.73	176	1.01×10^{-14}	92.5
	0x55H	12M	3.94×10^9	45.73	262	1.16×10^{-14}	93.8
	0xAAH	12M	2.94×10^9	45.73	215	1.27×10^{-14}	93.2
	0xFFH	12M	2.93×10^9	45.73	205	1.22×10^{-14}	93.0

N_{device} 为被测器件的个数; ϕ 有效注量, 单位为 n/cm^2 .

3 试验结果评估

为评估利用 CSNS 反角白光中子源模拟大气中子开展微电子器件大气中子单粒子效应的效果, 将上述的测量结果与前期开展的高原大气中子单粒子效应试验结果进行对比.

3.1 与大气中子辐照试验对比

早期利用上述的 3 款器件在西藏羊八井宇宙射线观测站开展了 SRAM 大气中子单粒子效应 (SEE) 辐照试验. 羊八井宇宙射线观测站位于东经 90.5° , 北纬 30.1° , 海拔 4300 m, 现场如图 5(a) 所示. 仿真获得羊八井的大气中子微分能谱, 如图 2 所示, 可以得到每小时中子通量为 $277.5 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, 其中大于 1 MeV 占比 46.12%, 即 $128 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$.

为缩短试验时间, 采用大规模存储矩阵的方式构建测试系统, 如图 5(b) 所示, 测试过程中所有器件写入数据 0x55H, 经过数千小时的辐照试验 3 种器件分别获得 195, 181 和 76 次翻转. 根据 (1) 式计算得到羊八井大气中子辐照的单粒子翻转截面, 利用文献 [29] 中的方法可以计算结果的置信水平, 三种器件的置信水平均不低于 97%, 测试及计算结果列于表 4.



图 5 羊八井大气中子单粒子效应试验 (a) 测试场景; (b) 测试系统
Fig. 5. SEE test in Yangbajing: (a) Test environment; (b) test system.

表 4 在羊八井测得的 SEU 翻转结果
Table 4. Test result of the SEU in Yangbajing.

型号	总容量/bit	测试时长/h	翻转数(#)	翻转率/ $\# \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	翻转截面/ $\text{cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$	置信水平/%
HM62V8100	$8\text{M} \times 573$	6085	195	6.67×10^{-12}	5.21×10^{-14}	98.6
HM628512B	$4\text{M} \times 1221$	5198	181	6.80×10^{-12}	5.31×10^{-14}	98.3
HM628512A	$4\text{M} \times 635$	5198	76	5.49×10^{-12}	4.29×10^{-14}	97.4

在 20 kW 附近运行时, CSNS 反角白光中子源大于 1 MeV 的中子通量为 $7.32 \times 10^5 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 而羊八井能量大于 1 MeV 的大气中子为 $3.56 \times 10^2 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. 在当前功率下, CSNS 反角白光中子源大于 1 MeV 的中子通量为羊八井大于 1 MeV 的大气中子的 2.1×10^7 倍. 可见 CSNS 反角白光中子源可用于加速大气中子单粒子效应试验, 考虑 1 MeV 能量阈值时 20 kW 工作加速因子就达到了 2.1×10^7 .

图 6 给出了写入 0x55H 时 CSNS 反角白光中子源与大气中子辐照单粒子翻转截面对比. 可以看出位翻转截面与器件的特征尺寸没有明显的单调关系, 其原因分析如下: 一方面, 器件特征尺寸减小使得器件的临界电荷降低, 导致相同的中子入射后翻转截面增大; 另一方面, 器件特征尺寸减小使得敏感体积减小, 即被中子击中的概率减小, 导致翻转截面减小; 两个方面的影响是竞争关系, 因此, 位翻转截面与器件的特征尺寸没有必然的单调关系.

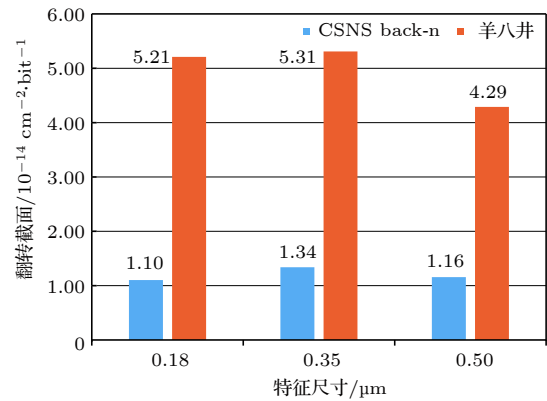


图 6 CSNS 反角白光中子源与羊八井大气中子 SEU 截面对比
Fig. 6. Comparison of the SEU cross section between the tests in CSNS back-n and Yangbajing.

从图 6 中还可以看出, CSNS 反角白光中子源获得的翻转截面均小于在羊八井获得的翻转截面, 对于上述三种器件, CSNS 反角白光中子源测得的翻转截面分别是羊八井的 21%, 25% 和 27%. 即考虑能量阈值为 1 MeV 时, 大气中子导致的翻转截

面约是 CSNS 反角白光中子源的 3—5 倍.

为分析导致两种环境截面不同的原因, 对比 CSNS 反角白光中子源和羊八井大气中子的能谱. 图 7 给出了两种中子源大于 1 MeV 部分的微分能谱对比, 可以计算不同能区中子的占比, 表 5 给出了 1 MeV 以上中子中不同能区中子的占比.

可以看出, CSNS 反角白光中子源中大于 1 MeV 的中子主要集中在 1—10 MeV, 占比达到 81.7%, 10—100 MeV 的中子占 16.8%, 大于 100 MeV 的中子仅占 1.5%. 而羊八井大气中子谱中上述 3 个能区占比相当, 分别为 35.6%, 32.1% 和 32.3%. 表 5 同时给出了 JEDEC^[29] 地面标准大气中子能谱和 IEC^[30] 航空 12 km 标准大气中子能谱. 可以看出羊八井大气中子能谱与两种标准能谱中大于 1 MeV 的中子各能区占比相近, 而 CSNS 反角白光中子源中子谱偏软, 能量主要集中在低能区. 根据单能中子单粒子效应的模拟仿真^[23] 和试验^[16]

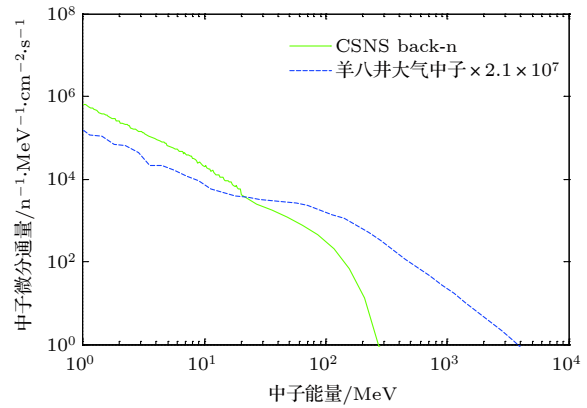


图 7 CSNS 反角白光中子源与羊八井大气中子微分能谱对比 (大于 1 MeV 部分)

Fig. 7. Comparison between the differential neutron energy spectra of CSNS back-n and Yangbajing (above 1 MeV).

结果, 能量越大的中子导致的中子单粒子效应截面越大, 因此羊八井测得的大气中子单粒子效应截面比 CSNS 反角白光中子源测得的截面大.

表 5 不同中子环境中不同能区的中子占比

Table 5. Proportion of different energy bands in different neutron environments.

中子源	中子数占比/%			通量/cm ² ·s ⁻¹ (> 1 MeV)
	1—10 MeV	10—100 MeV	>100 MeV	
JEDEC(地面)	35	35	30	5.56 × 10 ⁻³
IEC(12 km)	36.5	37.2	26.3	2.43 × 10 ⁰
羊八井	35.6	32.1	32.3	3.56 × 10 ⁻²
CSNS-back-n @76	81.7	16.8	1.5	7.32 × 10 ⁵ (20 kW)
CSNS-TS1-41° @20 m	50	28	22	—
CSNS-TS2-30°	44	28.5	27.5	—
CSNS-TS2-15°	22.6	25	52.4	—

3.2 CSNS 反角白光中子源试验结果的修正

考虑能量阈值为 1 MeV 时, 实际使用的大气环境中 SRAM 器件的翻转截面约为 CSNS 白光中子源辐照试验获得截面的 3—5 倍. 即直接用 CSNS 白光中子源评价电子器件的抗大气中子单粒子效应水平可能会低估大气中子导致的翻转截面. 为此, 可以引入修正因子的概念, 对于一款器件定义大气中子条件下测得的翻转截面与 CSNS 白光中子源获得的翻转截面比值为该器件的修正因子. 即在 CSNS 白光中子源测得中子单粒子翻转截面后乘以修正因子即可估计该器件在大气中子单粒子效应的翻转截面, 对于上面的器件能量阈值取 1 MeV 时, 修正因子分别为 4.76, 4 和 3.70.

上面假设了三种器件的能量阈值相等均为 1 MeV, 但实际上 SRAM 器件的翻转能量阈值很难精确获得且与器件的特征尺寸有关^[31]. 因为器件的特征尺寸越大敏感体积越大, 从而临界电荷也越大, 因此电位翻转所需要的最低能量越大. 即能量阈值随着特征尺寸的增大而增大. 文献^[31] 仿真得到特征尺寸为 0.18, 0.35 和 0.5 μm 的 SRAM 器件的能量阈值分别为 0.6, 2.5 和 6.0 MeV. 为说明能量阈值估计不准确带来截面估算的差异, 本文不考虑上述仿真结果的准确程度, 假设 HM62V8100, HM628512B 和 HM628512A 的实际能量阈值分别为 0.6, 2.5 和 6.0 MeV, 分析与上面能量阈值取 1 MeV 时的差异. 首先根据微分能谱可以重新计算 CSNS 反角白光中子源和羊八井大气中子对在这三种能

量阈值下的有效注量占比, 进一步计算三种器件考虑不同能量阈值时的翻转截面列于表 6. 对于能量阈值降低到 0.6 MeV 的 HM62V8100 在两种中子源的翻转截面比值由 1 MeV 的 21% 降低为 18%; 对于能量阈值升高到 2.5 MeV 的 HM628512B 在两种中子源的翻转截面比值由 25% 升高为 36%; 对于能量阈值升高到 6 MeV 的 HM628512A 翻转截面比值由 27% 升高为 64%. 此时, 三种器件的修正因子分别变为 5.56, 2.78 和 1.56.

可见能量阈值对翻转截面的计算和修正因子都有很大的影响. 这是因为一般器件的翻转能量阈值介于 0.3—6 MeV 之间^[31], 而 CSNS 反角白光中

子源的峰值能量在 1 MeV 附近, 其中 0.3—6 MeV 能量区间的中子占比达到 60.78%, 该能量区间在羊八井大气中子中的占比为 24.26%. 一般器件的中子能量阈值很难精确获得, 在存在能量阈值误差时, 相同的阈值误差在 CSNS 反角白光中子源试验中引入更大的截面误差, 从而影响修正因子. 对于一款器件, 试验结束后, 测得的翻转数不变, 能量阈值变化导致有效中子注量变化, 从而影响截面的大小和修正因子的估算. 图 8 给出了计算得到的不同能量阈值相对 1 MeV 时修正因子的变化关系. 值得指出的是, 取不同能量阈值时加速因子也随着修正因子等比例变化.

表 6 考虑不同能量阈值时有效注量占比及 SRAM 器件的翻转截面

Table 6. SEU cross section of SRAMs and percentage of effective neutrons considering different energy threshold.

型号	能量阈值/MeV	有效注量占比/%		翻转截面/cm ² .bit ⁻¹	
		CSNS back-n	羊八井	CSNS back-n	羊八井
HM62V8100	0.6	59.23	51.13	8.50×10^{-15}	4.70×10^{-14}
HM628512B	2.5	26.61	38.02	2.30×10^{-14}	6.43×10^{-14}
HM628512A	6.0	13.48	32.16	3.94×10^{-14}	6.15×10^{-14}

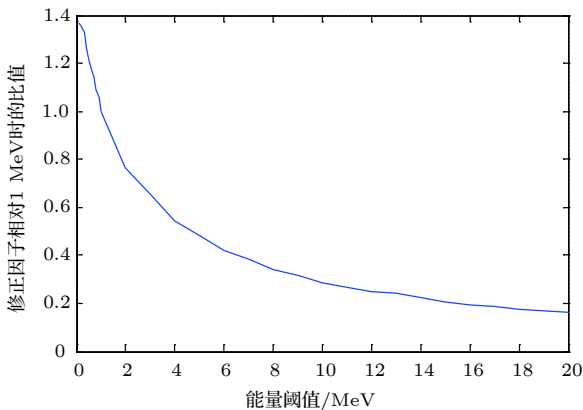


图 8 不同能量阈值相对 1 MeV 时修正因子的变化关系
Fig. 8. Correction factor with different energy threshold compare to 1 MeV.

从图 8 可以看出, 随着能量阈值的增大器件修正因子逐渐减小, 减小的幅度也越来越平缓. 当取能量阈值为 10, 12 和 14 MeV 时, 修正因子分别是 1 MeV 的 0.28, 0.25 和 0.22 倍, 对应上述 3 款器件的修正因子如表 7 所列.

从表 7 可以看出, 能量阈值取 10, 12 和 14 MeV 时, 3 款器件的修正因子均在 1 附近, 其中, 能量阈值取 12 MeV 时修正因子最接近 1, 即在 CSNS 反角白光中子源获得的截面与在羊八井大气中子环境中测得的截面结果最为一致. 从表 7 还可以看

表 7 能量阈值取 10, 12 和 14 MeV 时器件对应的修正因子

Table 7. Correction factor for the DUTs with different energy threshold.

型号	不同能量阈值取值时的修正因子		
	10 MeV	12 MeV	14 MeV
HM62V8100	1.33	1.19	1.05
HM628512B	1.12	1.00	0.88
HM628512A	1.04	0.93	0.81

出, 相对于 1 MeV 附近, 能量阈值在此范围的变化对修正因子的影响不大, 此结果与图 7 中给出的修正因子随能量阈值变化的趋势吻合.

根据单能中子单粒子效应的相关研究^[16,23,31], 一般器件在中子能量刚超过阈值附近的单粒子效应截面比饱和截面小很多 (一般 2 个数量级左右), 中子能量由 2.5 MeV 增大到 14 MeV 时测得的单粒子效应截面增大达 1 个数量级以上^[32]. 可见, 大气中子单粒子翻转截面主要决定于 10 MeV 以上的中子通量. 尽管 CSNS 反角白光中子源 10 MeV 以下中子占比达到 81.7%, 其对总翻转数的贡献仍比 10 MeV 以上的中子小很多. 这也是本文中用 12 MeV 的能量阈值进行计算时在 CSNS 反角白光中子源和羊八井大气中子环境中获得相似截面

的原因. 因此尽管目前微电子器件单粒子翻转的中子能量阈值一般较小, 但在利用 CSNS 反角白光中子源的试验结果评估大气中子的威胁时, 可以只考虑 12 MeV 以上的中子进行计算. 此时, 用 CSNS 开展大气中子单粒子效应试验的加速因子是能量阈值取 1 MeV 时的约 0.25 倍, 为 5.2×10^6 .

3.3 CSNS 在大气中子单粒子效应研究中的应用展望

根据上述试验结果的分析可知, CSNS 反角白光中子源可以应用于加速大气中子单粒子效应试验. 在 20 kW 附近运行时, CSNS 反角白光中子源大于 1 MeV 的中子通量已是羊八井大气中子的 2.1×10^7 倍, 是 JEDEC 地面标准大气的 1.3×10^8 倍, 是 IEC 航空 12 km 高度大气的 3.1×10^5 倍. 可见 CSNS 反角白光中子源可用于开展加速大气中子单粒子效应试验, 且随着 CSNS 的运行功率逐步提高, 其中子通量也会同步提高, 加速因子将等比例提高.

另一方面, 由于 CSNS 反角白光中子源的中子能谱偏软, 直接利用大于 1 MeV 的中子进行计算将导致 SRAM 中子单粒子效应翻转截面与大气中子辐照试验相比偏小, 从而导致用 CSNS 白光中子源评价电子器件的抗大气中子单粒子效应水平时低估大气中子导致的翻转截面. 因此, 在预估大气中子单粒子效应截面时, 可以根据器件的中子能量阈值对试验结果进行修正. 一般情况下, 器件的翻转阈值很难精确获取, 而且相对于高能中子, 器件在能量阈值附近的翻转数可以忽略, 因此可以直接取 12 MeV 的能量阈值进行计算, 此时在 CSNS 反角白光中子源测得的单粒子翻转截面可以近似估计器件在大气中子环境中单粒子效应截面水平. 此时, 用 CSNS 开展大气中子单粒子效应试验的加速因子是能量阈值取 1 MeV 时的约 0.25 倍.

除了反角白光中子源, CSNS 还规划了其他 3 条可用于模拟大气中子的白光中子束线. 根据上述束线中子能谱的仿真分析^[18,28], 在这 4 条白光中子束线中, 已建成可用的反方向白光中子源能谱最软, 中子高能成分最低, 与大气中子能谱相差最大. 根据表 5 中给出的其他 3 条白光中子束线大于 1 MeV 中子中不同能区中子占比^[18,28], 可以看出规划中的 3 条束线可以更好地模拟大气中子能谱, 其中第 2 靶站引出方向与质子入射方向夹角为 30° 的

白光中子束线与大气中子能谱最为接近. 未来可更好地服务于大气中子单粒子效应研究.

4 结 论

本文利用 CSNS 反角白光中子源开展了 SRAM 器件大气中子单粒子效应试验, 被辐照器件均观测到单粒子翻转效应, 不同测试图形的翻转截面差别不大. 单粒子翻转截面与器件的特征尺寸没有明显的单调关系, 其原因是特征尺寸降低导致临界电荷和敏感体积的变化对翻转截面的贡献为竞争关系. 其次, 本文利用前期在西藏羊八井开展的高原大气中子辐照试验结果对 CSNS 反角白光中子源进行评估, 结果表明考虑 1 MeV 的能量阈值时, 在羊八井获得的单粒子翻转截面是在 CSNS 反角白光中子源获得数据的约 3—5 倍. 其原因在于两种辐射环境中子能谱的差异, CSNS 反角白光中子源相对于大气中子低能区中子占比多, 高能区中子占比少. 因此直接用 CSNS 白光中子源评价电子器件的抗大气中子单粒子效应水平可能会低估大气中子导致的翻转截面. 本文根据试验结果, 引入修正因子的概念, 即基于 CSNS 反角白光中子源获得的翻转截面乘以修正因子即为估计的大气中子单粒子翻转截面. 此外, 根据 CSNS 反角白光中子源与大气中子能谱的差异分析了能量阈值的差异对翻转截面估计的影响, 并给出了修正因子随能量阈值的变化关系, 发现用 12 MeV 的能量阈值进行计算时, 在 CSNS 反角白光中子源测得的单粒子翻转截面可以很好地估计器件在大气中子环境中的单粒子效应水平, 此结果为后续利用 CSNS 反角白光中子源开展中子单粒子效应试验提供了参考.

同时本文的研究结果还表明, CSNS 反角白光中子源可以应用于加速大气中子单粒子效应试验. 在 20 kW 附近工作时, CSNS 反角白光中子源大于 1 MeV 的中子通量相对于 JEDEC 地面标准大气中子、羊八井大气中子和 IEC 航空高度大气中子的加速因子分别是 1.3×10^8 , 2.1×10^7 和 3.1×10^5 倍. 能量阈值采用 12 MeV 进行计算时, 加速因子降为取 1 MeV 的约 0.25 倍. 随着 CSNS 运行功率的逐步提高, 加速因子也会同步提高. 除论文中使用的 CSNS 反角白光中子束线外, CSNS 还在规划另外 3 条白光中子束线, 且与大气中子能谱更为接近. 预期 CSNS 未来可更好地服务于大气中子

单粒子效应研究, 助力我国抗辐射加固事业及航空工业的发展.

感谢中国散裂中子源提供束流机时, 感谢反角白光中子源的同志的支持和帮助.

参考文献

- [1] Abe S, Watanabe Y 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 3519
- [2] Normand E 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 461
- [3] Hubert G, Bezerra F, Nicot J M, Artola L, Cheminet A, Valdivia J N, Mouret J M, Meyer J R, Cocquerez P 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 1703
- [4] Normand E 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 2742
- [5] Quinn H, Graham P, Manuzzato A, Fairbanks T, Dallmann N, DesGeorges R 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3547
- [6] Dyer C, Hands A, Ryden K, Lei F 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 432
- [7] Taber A, Normand E 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 120
- [8] Olsen J, Becher P E, Fynbo P B, Raaby P, Schultz J 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 74
- [9] Normand E, Baker T J 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1484
- [10] Normand E 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 1996
- [11] Flament O, Baggio J, D'hose C, Gasiot G, Leray J L 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2908
- [12] Lambert D, Baggio J, Hubert G 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 1890
- [13] Hands A, Morris P, Dyer C, Ryden K, Truscott P 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 952
- [14] Autran J L, Roche P, Borel J, Sudre C, Karine C, Munteanu D, Parrassin T, Gasiot G, Schoellkopf J P 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1002
- [15] Takashi N, Mamoru B, Eishi I (translated by Chen W, Shi S Z, Song Z H, Wang C H) 2015 *Terrestrial Neutron-Induced Soft Errors in Advanced Memory Devices* (Beijing: National Defense Industry Press) pp 94–119 (in Chinese) [中村刚史, 马场守, 伊部英治 著 (陈伟, 石绍柱, 宋朝晖, 王晨辉 译) 2015 大气中子在先进存储器件中引起的软错误 (北京: 国防工业出版社) 第94—119页]
- [16] Dyer C S, Clucas S N, Sanderson C, Frydland A D, Green R T 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2817
- [17] Weulersse C, Guibbaud N, Beltrando A L, Galinat J, Beltrando C, Miller F, Trochet P, Alexandrescu D 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2268
- [18] Zhang L Y, Ni W J, Jing H T, Wang X Q 2018 *Mod. Appl. Phys.* **9** 010201 (in Chinese) [张利英, 倪伟俊, 敬罕涛, 王相霖 2018 现代应用物理 **9** 010201]
- [19] Qi L, Zhou Y P 2018 *Aero. Sci. Tech.* **29** 07 (in Chinese) [蔡蕾, 周燕佩 2018 航空科学技术 **29** 07]
- [20] Wang Q Y, Liu Y F, Chen Y, Bai H, Yang H 2011 *Aero. Sci. Tech.* **4** 34 (in Chinese) [王群勇, 刘燕芳, 陈宇, 白桦, 阳辉 2011 航空科学技术 **4** 34]
- [21] Xue H H, Wang Q Y, Chen D M, Chen Y, Yang H, Li H J 2015 *J. Beijing. Univ. Aero. Astron.* **41** 1894 (in Chinese) [薛海红, 王群勇, 陈冬梅, 陈宇, 阳辉, 李红军 2015 北京航空航天大学学报 **41** 1894]
- [22] Zhou X 2018 *Infor. Comm.* **4** 79 (in Chinese) [周啸 2018 信息通信 **4** 79]
- [23] Zhang H, Wang S G, Chen W, Yang S C 2015 *Nucl. Tech.* **38** 120501 (in Chinese) [张欢, 王思广, 陈伟, 杨善潮 2015 核技术 **38** 120501]
- [24] Guo X Q, Guo H X, Wang G Z, Lin D S, Chen W, Bai X Y, Yang S C, Liu Y 2010 *Atom. Ener. Sci. Tech.* **44** 362 (in Chinese) [郭晓强, 郭红霞, 王桂珍, 林东生, 陈伟, 白小燕, 杨善潮, 刘岩 2010 原子能科学技术 **44** 362]
- [25] Yu Q Z, Hu Z L, Yin W, Liang T J 2014 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **44** 479 (in Chinese) [于全芝, 胡志良, 殷雯, 梁天骄 2014 中国科学: 物理学 力学 天文学 **44** 479]
- [26] Chen D M, Sun X P, Zhong Z Y, Feng G Q, Bai H, Yang H, Di T 2018 *Aero. Sci. Tech.* **29** 67 (in Chinese) [陈冬梅, 孙旭朋, 钟征宇, 封国强, 白桦, 阳辉, 底桐 2018 航空科学技术 **29** 67]
- [27] Fan H, Guo G, Shen D J, Liu J C, Chen H T, Zhao F, Chen Q, He A L, Shi S T, Hui N, Cai L, Wang G L 2015 *Atom. Ener. Sci. Tech.* **49** 171 (in Chinese) [范辉, 郭刚, 沈东军, 刘建成, 陈红涛, 赵芳, 陈泉, 何安林, 史淑廷, 惠宁, 蔡莉, 王贵良 2015 原子能科学技术 **49** 171]
- [28] Ni W, Jing H, Zhang L, Ou L 2018 *Radiat. Phys. Chem.* **152** 43
- [29] Jedec 2001 *JESD89-measurement and Reporting of alpha particles and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices*
- [30] IEC 2006 *Process management for avionics-atmospheric radiation effects, part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionic electronic equipment: IEC 62396-1*
- [31] Guo X Q 2009 *M.S. Thesis* (Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology) (in Chinese) [郭晓强 2009 硕士学位论文 (西安: 西北核技术研究所)]
- [32] Yang S C, Qi C, Bai X Y, Li R B, Wang C H, Li J L, Jin X M, Liu Y 2018 *The 3th Chinese Conference on Radiation Physics* p77 (in Chinese) [杨善超, 齐超, 白晓燕, 李瑞斌, 王晨辉, 李俊霖, 金晓明, 刘岩 2018 第三届全国辐射物理学术交流会 第77页]

Application and evaluation of Chinese spallation neutron source in single-event effects testing*

Wang Xun[†] Zhang Feng-Qi Chen Wei Guo Xiao-Qiang
Ding Li-Li Luo Yin-Hong

(*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 12 October 2018; revised manuscript received 21 November 2018)

Abstract

Due to the lack of available spallation neutron source, the atmospheric neutron single event effect (SEE) in China were studied mainly by means of simulation and single energy neutron test. Since the Chinese spallation neutron source (CSNS) passed the national acceptance, it has become possible to carry out the research on atmospheric neutron SEE by using the CSNS. In this paper, the neutron SEE experiments of 3 kinds of SRAMs with different feature sizes are carried out for the first time by using the CSNS back-n. The application of CSNS back-n in the study of atmospheric neutron SEE is evaluated by comparing with the results of the earlier plateau experiment. The results show that the cross section of the single event upset is smaller than that of the plateau test, and the cross sections of different devices have no obvious monotonic relationship with feature size. The reason for the former result is that the energy spectrum of CSNS back-n is slightly softer than that of the atmospheric neutron. The reason for the second result is that small feature size means small critical charge and small sensitive volume, and these two factors compete with each other when they make the contribution to the cross section. According to the difference in energy spectrum and cross section among the SRAM devices, a correction factor is proposed to correct the test results based on CSNS back-n. For the difference in energy spectrum, different energy thresholds will produce different ratios between the cross sections by using CSNS back-n and atmospheric neutron. The neutrons of CSNS back-n are mainly concentrated around 1 MeV, which is close to the energy threshold of general SRAM devices. Thus, inaccurate energy threshold estimation will introduce a large error into the cross section of SEU. Thus, the relation between the correction factor and the energy threshold is analyzed. If 12 MeV is selected as the energy threshold to calculate the cross section, more consistent results could be obtained for our DUT in CSNS back-n and atmospheric neutron environment. In a word, the results show that the CSNS back-n can be used to speed up the atmospheric neutron SEE test, but the result should be corrected to evaluate the threat from atmospheric neutron. Fortunately, with the continuous increase of CSNS operating power, the neutron flux and the accelerated factor of CSNS will increase synchronously. Besides, other 3 white light neutron beams are planned in the CSNS project, the planned energy spectra are closer to those of atmospheric neutron. It is expected that the CSNS will be better applied to the study of atmospheric neutron SEE.

Keywords: atmospheric neutron, single event effect, Chinese spallation neutron source, CSNS back-n

PACS: 29.25.Dz, 29.30.Hs, 61.80.Hg, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.68.20181843

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11690040, 11690043, 61634008).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxun@nint.ac.cn