



·前沿技术与交叉科学·

# 国内典型地区地面大气中子能谱测量与仿真\*

彭 超, 雷志锋, 张战刚, 杨少华, 来 萍, 路国光

(工业和信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广州 511370)

**摘 要:** 基于多球能谱仪开展了广州、兰州和拉萨等地区的大气中子能谱和通量测量, 获取了大气中子能谱的典型特征。测量结果表明: 不同地区的大气中子通量受海拔高度的影响明显, 地面大气中子通量随着海拔的增加而增加。此外, 基于蒙特卡罗仿真工具也可以模拟初级宇宙射线粒子在地球大气层中的核反应过程, 从而计算获取大气中子能谱。大气中子能谱测量数据与仿真数据吻合良好。

**关键词:** 大气中子; 单粒子效应; 地面辐射环境; 能谱测量

中图分类号: TL99

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220353

## Measurement and simulation of terrestrial atmospheric neutron spectrum in typical regions of China

Peng Chao, Lei Zhifeng, Zhang Zhangan, Yang Shaohua, Lai Ping, Lu Guoguang

(*Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 511370, China*)

**Abstract:** Atmospheric neutrons can cause the single event effect (SEE) of integrated circuits, resulting in data loss or functional interrupt. The SEE failure rate caused by atmospheric neutrons depends on its flux, thus obtaining the atmospheric neutron flux is the premise of SEE failure rate assessment. In this paper, the atmospheric neutron energy spectra and fluxes in Guangzhou, Lanzhou and Lhasa are measured using the Bonner sphere spectrometers (BSS). Typical characteristics of atmospheric neutron spectrum are obtained. The measured results show that the atmospheric neutron flux in different areas is affected by the altitude, and the terrestrial atmospheric neutron flux increases with the altitude. In addition, the nuclear reaction process of primary cosmic ray particles in the earth's atmosphere can also be simulated based on the Monte Carlo simulation tools, so as to calculate the atmospheric neutron spectrum. It shows that the measured data of atmospheric neutron spectra are in good agreement with the simulation data. These data can be used in quantitative evaluation of atmospheric neutron-induced SEE of integrated circuits.

**Key words:** atmospheric neutron, single event effect, terrestrial radiation environment, energy spectrum measurement

在空间应用中, 辐射环境对航天器的影响已得到了广泛的关注。但在海拔 100 km 以下与人类活动联系更加紧密的大气环境区域, 同样会受到各种来自银河宇宙线以及太阳宇宙线直接或间接的影响。当银河和太阳宇宙射线粒子穿过地磁场达到地球大气层时, 宇宙射线中的高能质子会与大气层中的 N、O 原子作用发生核级联反应, 产生次级的大气中子<sup>[1]</sup>。

大气中子会导致地面和航空用的集成电路的单粒子效应。中子由于不带电, 无法与物质原子直接通过库仑作用产生电离效应, 故中子在物质中传输过程中损失的能量较低, 其穿透能力也较强。集成电路采用的封装和屏蔽材料均无法有效地阻止中子入射。中子虽然不能直接引发靶材原子的直接电离, 但是可以通过间接作用产生反冲核或者发生核反应, 这些反冲核或核反应碎片往往是携带电荷的粒子, 其进一步通过电离作用产生单粒子效应, 最

\* 收稿日期: 2022-10-25; 修订日期: 2023-02-10

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2021B1515120043); 广州市科技计划项目 (202102021201)

联系方式: 彭 超, pengchaoceprei@qq.com。

终导致器件出现存储信息错误、丢失、功能中断等故障<sup>[2-3]</sup>。随着纳米级超大规模集成电路的广泛应用,大气中子单粒子效应将变得更为严酷。

大气中子导致单粒子效应的概率取决于大气中子通量,但不同地区的大气中子通量受海拔高度、经纬度、太阳活动周期、局部环境等多种因素的影响。鉴于此,对不同地区的大气中子环境进行精确测量是评估集成电路大气中子单粒子效应风险的关键。美国、日本等国家的研究机构已开展了大量大气中子辐射环境的测量工作<sup>[4-5]</sup>。国内在西藏<sup>[6]</sup>、北京<sup>[7]</sup>等少数地区也开展了大气中子能谱测量,但相关数据非常有限。本文通过对国内典型地区的大气中子能谱进行测量,获取了大气中子能谱数据,并与蒙特卡罗仿真数据以及国外已有大气中子环境计算模型的结果进行了对比验证。

## 1 实验描述

本文采用 Bonner 多球能谱仪进行大气中子能谱测量。Bonner 多球能谱仪由<sup>3</sup>He 管热中子探测器、10 个不同直径的聚乙烯慢化球、1 个铜慢化球和 1 个铅慢化球组成。不同材质慢化球的功能是将中子慢化为热中子,使其能被<sup>3</sup>He 管探测。测试时,将体积较小的<sup>3</sup>He 管放置在球壳的中心,即构成一个探测球,如图 1 所示。整个多球中子谱仪包括 13 个直径和材质不同的探测球,分别为:<sup>3</sup>He 裸管(无任何球壳的裸管视为一个探测球)、直径分别为 7.62、8.89、10.16、11.43、12.7、15.24、17.78、20.32、25.4、30.48 cm 聚乙烯探测球、直径为 20.32 cm 铜探测球和 20.32 cm 铅探测球。不同直径的探测球只对特定能量段的中子响应,随着聚乙烯球壳直径的增大,谱仪的中子响应峰会向高能一侧移动。两个金属球对高能中子的慢化作用更强,可增加探测器对 20 MeV 以上高能中子段的响应。

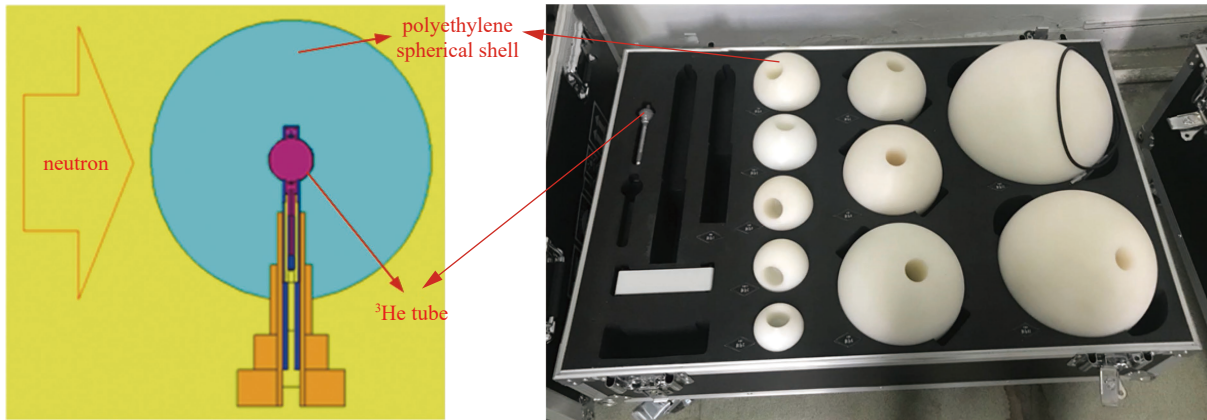


Fig. 1 Schematic diagram of Bonner sphere spectrometer

图 1 Bonner 多球谱仪示意图

多球中子能谱仪在进行能谱测量时,得到的是每个球在中子场中的计数率  $M$ ,而每个球的计数率与待测的中子能谱满足下述关系

$$M_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) R_i(E) dE \quad i = 1, 2, \dots, N_d \quad (1)$$

式中:  $R_i(E)$  为第  $i$  个球对能量为  $E$  的中子的响应函数,  $\Phi(E)$  为待测中子能谱;  $E_{\min}$  与  $E_{\max}$  是待测中子的最低和最高能量;  $N_d$  为探测球总个数。利用中子解谱技术,通过单球计数率可以反推出待测大气中子能谱。自然大气中子的能量范围很宽,能量区间的个数比较多,一般在几十到几百个,而多球中子能谱仪所含探测球的个数只有 13 个,即未知数的个数大于方程的个数,因此多球中子能谱仪的解谱问题属于少道解谱。本文选用的 Bonner 多球谱仪解谱得到的中子能谱范围为  $10^{-8} \sim 10^3$  MeV。

本文选取了 4 个不同地点测量了自然大气中子能谱。测量地点的具体信息如表 1 所示。图 2 显示了大气中子能谱测试现场布置情况。测试过程中,选取一固定测试点,将慢化球放置在对对应固定架上。固定架可使得慢化球球心探测器处于同一位置。从第一个球依次开展测试,获取对应的计数率。在测试点 1,由于中子通量很低,每个探测球的测试时间均为 3 h;其他测试点每个探测球的测

表 1 大气中子能谱测量点信息

Table 1 Location information of atmospheric neutron spectrum measurement

| measurement location | longitude   | latitude   | altitude/m |
|----------------------|-------------|------------|------------|
| Guangzhou            | 113°40'55"E | 23°16'38"N | 42         |
| Lanzhou              | 103°15'36"E | 35°50'40"N | 1780       |
| Lhasa                | 91°7'23"E   | 29°39'39"N | 3634       |
| Yangbajing           | 90°31'32"E  | 30°5'56"N  | 4277       |

试时间均为 30 min。

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 自然大气中子能谱实测结果

图 3(a) 为 4 个不同测量点的大气中子能谱测量结果。不同地区的中子能谱形状近似, 均包含 3 个峰值区: 一个能量在 100 MeV 附近的高能峰, 一个能量在 1~2 MeV 附近的“核蒸发”峰, 以及一个热峰(中子因散射而减速, 直到与周围材料中的原子达到热平衡)。

由于导致集成电路单粒子效应的主要为能量在 1 MeV 以上的中子, 因此重点关注该能量段内的中子分布。图 3(b) 显示了不同测量点处能量在 1 MeV 以上的大气中子差分通量对比。由图可见, 在能量大于 1 MeV 范围内, 拉萨羊八井地区的中子通量最高, 其次为拉萨市区, 广州的中子通量最低。在测试可得的 1 MeV~1 GeV 范围内, 羊八井、拉萨、兰州和广州三地的大气中子通量分别为 90.6、67.4、20.3  $\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和 5.54  $\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。大气中子通量表现出与测试地点海拔高度的正相关关系, 即海拔越高, 大气中子通量越大。这与以前的报道一致<sup>[8-9]</sup>。初级宇宙射线在发生核级联反应生成大气中子的过程中存在中子产生和中子吸收衰变两个相反过程, 这使得大气中子通量在大约海拔 20 km 处会达到最大值。即在海平面到大约 20 km 的空域内, 大气中子通量随着海拔的增加而增加; 在海拔 20 km 以上, 大气中子通量随着海拔的增加而降低。同时, 地球磁场对从各个方向入射到大气层中的初级宇宙射线粒子存在屏蔽作用, 这使得大气层中子通量受地磁位置的影响。不同地磁位置处地磁场对宇宙射线的屏蔽作用都不相同, 因此导致不同位置(不同经纬度处)核反应生成的中子通量的差异。通常纬度越高的地区中子通量越大<sup>[10]</sup>。兰州地区的纬度虽然要高于拉萨, 但其大气中子通量低于拉萨市区的 1/2。这证实了海拔高度是影响大气中子通量的最主要因素。

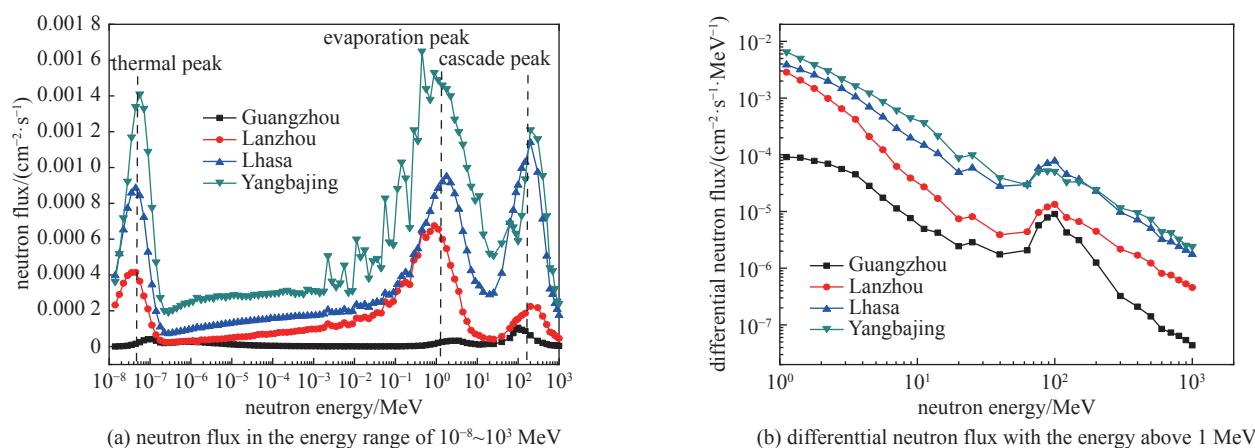


Fig. 3 Measured atmospheric neutron spectra at different locations

图 3 不同地区大气中子能谱测量结果

除了能量在 1 MeV 以上的高能中子外, 大气中子能谱热峰附近的热中子(平均能量约为 26 meV)也能导致富含  $^{10}\text{B}$  同位素的集成电路发生单粒子效应<sup>[11-12]</sup>。热中子的一个重要来源是高能中子与材料散射后发生慢化, 因此其通量与测试点处的局部环境有关。由于四个测试点均选择在露天空旷地面处, 其测试条件一致, 因此热中子通量也表现出与高能中子相似的随海拔的变化关系, 如图 3(a) 所示。

本文同时基于已有的 EXPACS 模型<sup>[13]</sup> 计算了实测地点的大气中子能谱, 用于与测量结果对比。通过输入海拔、经纬度、太阳活动周期、局部环境等信息, 该模型可以实现海拔从 0~62 km 范围内任意经纬度处的大气中子能谱的计算。图 4 显示了基于 EXPACS 模型计算得到的不同测量点处能量在 1 MeV 以上的大气中子差分通量对比。EXPACS 计算过程中, 海拔和地理坐标根据实测地的实际信息输入; 周围环境设置为地面, 其中地面水的占比固定设置为 0.2; 太阳活动周期因子  $W$  设置为 200。可以看到, 能量在 1 MeV 以上的大气中子通量依次为羊八井 > 拉萨 > 兰州 > 广州, 表现出和各地海拔高度的正相关关系。这与测试结果一致。

图 5 给出了基于 EXPACS 模型计算得到的拉萨和羊八井实测地点的大气中子能谱与实测数据对比。可以看



Fig. 2 Field measurement of atmospheric neutron spectrum

图 2 大气中子能谱现场测试图



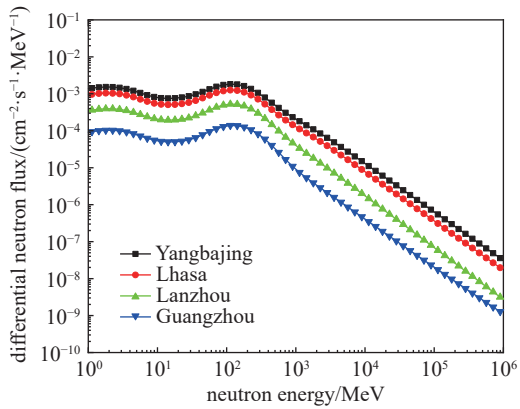


Fig. 4 Atmospheric neutron differential flux as a function of energy at different measurement sites calculated by EXPACS model

图 4 基于 EXPACS 模型计算得到的实测地区的大气中子差分通量随能量的变化

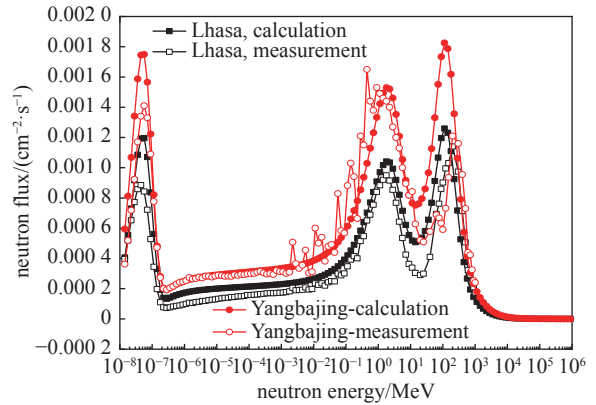


Fig. 5 Comparison between calculated results and measured data of atmospheric neutron spectrum

图 5 大气中子能谱计算结果与测量数据对比

到,模型计算得到的大气中子能谱形状与测试数据吻合较好,全能谱中三个峰值对应的能量区间完全一致。在能量为  $10^{-7} \sim 10$  MeV 和  $> 300$  MeV 的能量区间内,测量得到的大气中子通量与计算数据吻合度很好,两者几乎完全一致。在  $2 \sim 300$  MeV 能量范围内,测量结果要略低于仿真结果。在羊八井地区,测量能谱中的高能峰对应的中子通量与计算能谱差异最大,但两者间的误差仍然在 33.3% 以内。在能量低于  $10^{-7}$  MeV 的热峰位置,测量能谱和计算能谱的中子通量也存在差异。这可能是因为热中子通量与局部环境有很大关系,计算中设置的局部环境参数无法完全复现实际测量点的局部环境条件。

### 2.2 环境测量结果与蒙卡仿真对比

考虑到大气中子为初级宇宙射线中的高能粒子与大气层原子的核反应产物,利用蒙特卡罗仿真工具模拟银河宇宙射线粒子和太阳粒子事件释放的高能粒子与大气层原子的核反应过程以及生成的次级粒子在大气层中的传输过程,记录次级中子在不同海拔大气层内的分布,从而可以得到大气中子的能谱。

本文基于 FLUKA 蒙特卡罗仿真软件<sup>[14-15]</sup>实现大气中子能谱的计算。图 6 显示了用于蒙特卡罗仿真的地球三

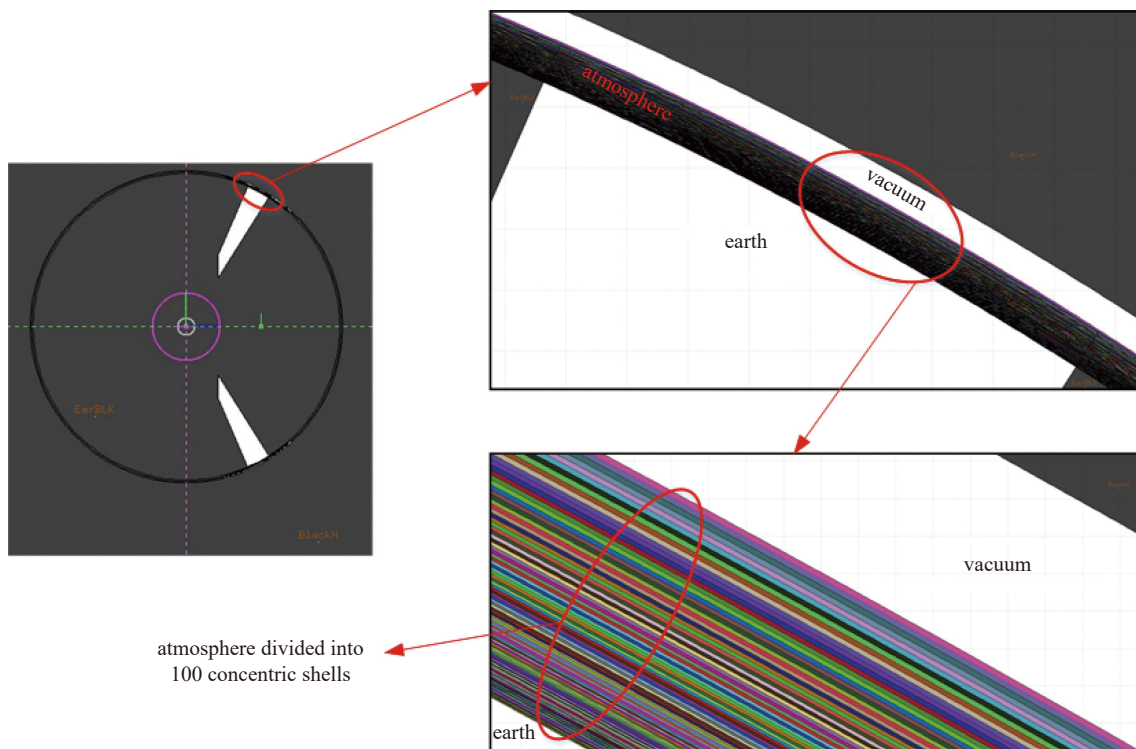


Fig. 6 Atmospheric environment modeling in Monte Carlo transport simulations

图 6 蒙特卡罗运输仿真中的大气层环境建模

维结构模型。用一个半径为 6378.14 km 的球代表地球，地球以上距离地面 0~71.6 km 的大气层区域被划分为 100 个同心球壳区域，不同的颜色表示不同的大气层密度，不同大气层位置的密度及原子组成(N、O、Ar 三种原子的混合)根据美国标准大气模型<sup>[16]</sup>定义。由于该仿真为了计算广州地区(23°N, 113°E)的中子通量，为了节省仿真时间，只定义了 23°N113°E 局部区域的大气层组成。

仿真定义大气层初始入射粒子为太阳极小年下的银河宇宙射线粒子谱，包含原子量在 1~28 之间的所有带电离子( $Z=1\sim 28$ )。入射粒子谱如图 7 所示。射线粒子通量均匀且各向同性，能量范围为 0.3~30000 GeV/c，在海拔 70 km 附近进入大气层。初始入射粒子进入大气层中后考虑地球磁场对入射粒子以及次级粒子轨迹的影响。同时考虑地球不同位置地磁截止刚度对大气层初始入射粒子的影响<sup>[17]</sup>。地磁截止刚度在赤道地区最大，在两极地区最小，该仿真中广州地区的地磁截止刚度设为 15.9 GV。仿真过程中考虑所有轻重离子的全传输，激活了入射粒子与大气层原子核反应的残核蒸发(来源于 1996 年美国国家核数据中心 NNDC 的数据)、退激  $\gamma$  产生、蒸发后残余重离子传输、高能裂变、费米分裂等过程。蒙特卡罗仿真中总入射粒子数为  $4\times 10^6$ 。

表 2 显示了初级宇宙射线离子进入地球大气层后，核级联反应过程中不同粒子与大气层原子发生非弹性相互作用的概率。FLUKA 软件可以记录高于某一能量阈值(对于质子和中子为 20 MeV，其他强子为 50 MeV)强子发生的非弹性核相互作用。可以看到参与核级联反应的粒子主要为中子、质子和氦核。表 3 显示了非弹性相互作用中生成各种次级粒子的概率，级联反应的产物主要覆盖了中子、质子、氦核、光子、 $\pi$  介子、氘核、氚核等。

表 2 级联反应过程中不同粒子与大气层原子发生非弹性相互作用的概率

Table 2 Probability of inelastic interaction between different particles and atmospheric atoms in cascade reaction process

| particle types                        | probability/% |
|---------------------------------------|---------------|
| neutron                               | 61.0          |
| proton                                | 18.6          |
| 4-helium                              | 18.3          |
| heavy ion                             | 1.4           |
| muon <sup>-</sup>                     | 0.2           |
| pion <sup>+</sup> , pion <sup>-</sup> | 0.2           |

表 3 非弹性相互作用中生成次级粒子的概率

Table 3 Generation probability of secondary particles in inelastic interactions

| particle types                        | probability/% |
|---------------------------------------|---------------|
| neutron                               | 31.6          |
| proton                                | 25.2          |
| 4-helium                              | 19.2          |
| photon                                | 7.8           |
| pion <sup>+</sup> , pion <sup>-</sup> | 6.0           |
| deuteron, triton                      | 4.6           |

最终计算得到的广州地区海平面，10 km、20 km 和 30 km 处的大气中子能谱如图 8 所示。根据仿真结果，大气层中子通量在海平面最低；对应 10 km 的飞机飞行高度，中子通量比海平面增加了两个数量级。在海拔 20 km 附近中子通量达到最高，超过该海拔中子通量略微下降，这与前人的结论一致。将仿真中子通量与实地测量结果以及 EXPACS 模型计算结果对比，如图 9 所示。蒙特卡罗仿真结果与 EXPACS 模型计算结果完全吻合。广州地区的测量中子通量略低于仿真和计算结果。在 1 MeV~1 GeV 能量范围内，测量和仿真得到的中子总通量相差 1.2 倍左右。误差可能来自于两方面：一方面，仿真得到的是太阳活动极小年下的中子能谱，而太阳极小年的中子通量会高于其他年份的中子通量<sup>[18]</sup>；另一方面，广州地区的中子通量较低，而 Bonner 多球能谱仪测试时间不够长，导致测量结果存在偏差。

### 3 结论

本文基于多球能谱仪开展了国内不同地区的地面自然大气中子能谱测量，获取了大气中子能谱的典型数据。测量结果表明，不同地区的大气中子能谱形状近似，为包含一个高能峰、一个核蒸发峰以及一个热峰的连续能谱。但不同地区的大气中子通量受海拔高度的影响较明显。地面大气中子通量随着海拔的增加而增加。相比于

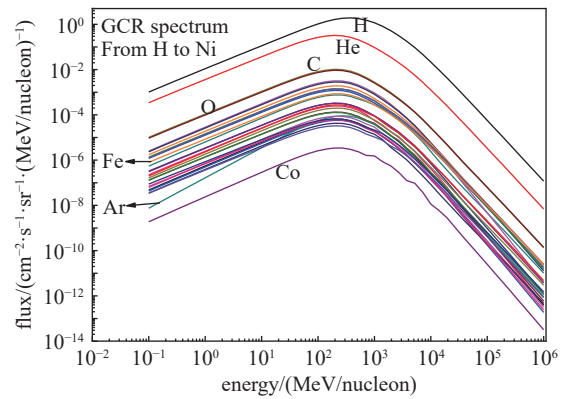


Fig. 7 Primary galaxy cosmic ray particle spectra used in Monte Carlo simulations

图 7 蒙特卡罗仿真中入射的初级银河宇宙射线粒子谱

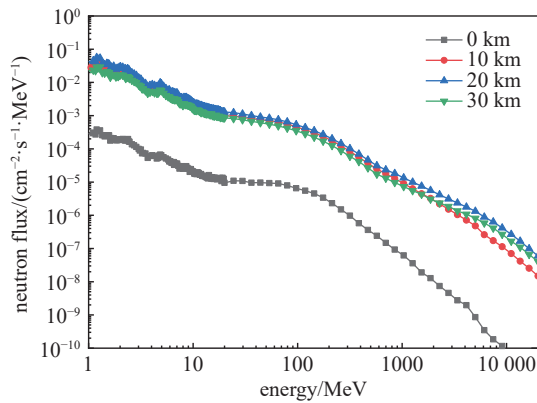


Fig. 8 Atmospheric neutron spectra at different altitudes obtained by Monte Carlo simulations  
图 8 蒙特卡罗仿真得到不同海拔处的大气中子能谱

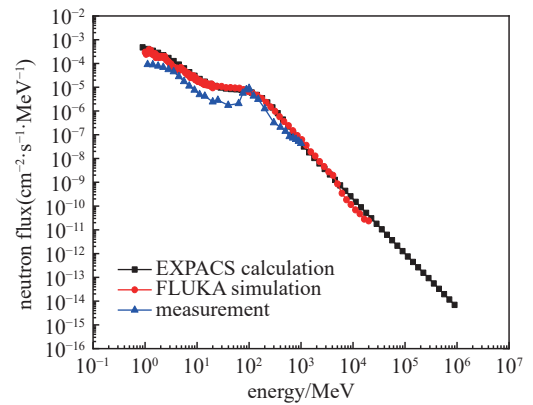


Fig. 9 Comparison of atmospheric neutron spectra obtained from field measurement, EXPACS model calculation and Monte Carlo simulation in Guangzhou  
图 9 实地测量、EXPACS 模型计算以及蒙特卡罗仿真得到的广州地区大气中子能谱对比

广州地区, 拉萨地区的大气中子通量增加了一个数量级。基于蒙特卡罗仿真得到的大气中子能谱同样证实了上述结论。仿真结果表明, 在 10 km 的飞机飞行高度大气中子通量比海平面增加了 2 个数量级。将大气中子能谱的测量和仿真数据与国际通用的 EXPACS 模型的计算结果对比, 发现三者的结果比较一致, 从而验证了文中给出的大气中子数据的准确性。这些数据可以用于大气中子导致的集成电路失效风险的分析。

#### 参考文献:

- [1] Ziegler J F. Terrestrial cosmic rays[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1996, 40(1): 19-39.
- [2] Ziegler J F, Lanford W A. Effect of cosmic rays on computer memories[J]. *Science*, 1979, 206(4420): 776-788.
- [3] Nakamura T, Baba M, Ibe E, et al. Terrestrial neutron-induced soft errors in advanced memory devices[M]. Hackensack: World Scientific, 2008.
- [4] Cheminet A, Lacoste V, Hubert G, et al. Experimental measurements of the cosmic-ray induced neutron spectra at various mountain altitudes with HERMEIS[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(4): 1722-1730.
- [5] Gordon M S, Goldhagen P, Rodbell K P, et al. Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(6): 3427-3434.
- [6] 吴建华, 徐勇军, 刘森林, 等. 西藏地区天然中子能谱测量[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(2): 219-222. (Wu Jianhua, Xu Yongjun, Liu Senlin, et al. Spectrum measurement of natural neutron in Tibet[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(2): 219-222)
- [7] Hu Z M, Ge L J, Sun J Q, et al. Measurements of cosmic ray induced background neutrons near the ground using a Bonner sphere spectrometer[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 940: 78-82.
- [8] Kole M, Pearce M, Salinas M M. A model of the cosmic ray induced atmospheric neutron environment[J]. *Astroparticle Physics*, 2015, 62: 230-240.
- [9] Barth J L, Dyer C S, Stassinopoulos E G. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, 50(3): 466-482.
- [10] Normand E, Baker T J. Altitude and latitude variations in avionics SEU and atmospheric neutron flux[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1993, 40(6): 1484-1490.
- [11] Fang Yipin, Oates A S. Thermal neutron-induced soft errors in advanced memory and logic devices[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2014, 14(1): 583-586.
- [12] Wen Shijie, Wong R, Romain M, et al. Thermal neutron soft error rate for SRAMS in the 90nm-45nm technology range[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium. 2010: 1036-1039.
- [13] Sato T. Analytical model for estimating the zenith angle dependence of terrestrial cosmic ray fluxes[J]. *PLoS One*, 2016, 11: e0160390.
- [14] Fasso A, Ferrari A, Ranft J, et al. FLUKA: present status and future developments[C]//Proceedings 4th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics. 1993: 493-502.
- [15] Infantino A, Blackmore E W, Brugger M, et al. FLUKA Monte Carlo assessment of the terrestrial muon flux at low energies and comparison against experimental measurements[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 838: 109-116.
- [16] Sato T, Niita K. Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere[J]. *Radiation Research*, 2006, 166(3): 544-555.
- [17] JESD89B, Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray induced soft errors in semiconductor devices[S].
- [18] Ziegler J F. Terrestrial cosmic ray intensities[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1998, 42(1): 117-140.