

基于单球中子谱仪的不同飞行高度处 大气中子能谱测量*

彭超^{1)†} 蔡志岩²⁾ 张战刚¹⁾ 庄凯²⁾ 黄先超²⁾ 马腾¹⁾ 童腾²⁾
何玉娟¹⁾ 丰宝桐²⁾ 张鸿¹⁾ 朱美玲²⁾ 李道武²⁾ 雷志锋¹⁾

1) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性技术全国重点实验室, 广州 511370)

2) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2025年8月22日收到; 2026年2月2日收到修改稿)

本文利用高性能飞机搭载单球中子谱仪, 测量了不同飞行高度下的宇宙射线大气中子能谱. 单球中子谱仪采用⁶Li-⁷Li玻璃闪烁体作为探测器, 利用两种锂同位素玻璃闪烁体的信号差分实现混合辐射场中子甄别. 通过在单球中子谱仪的聚乙烯慢化球内嵌入铅层, 将探测器的中子能量响应扩展至1 GeV, 使测量中子能谱能量范围覆盖从热中子到GeV能区. 飞行搭载试验在遂宁-洛阳和遂宁-长沙两条航线上开展, 获取了我国4.2—7.6 km空域的大气中子能谱实测数据. 随着海拔高度由4.2 km增至7.6 km, 能量大于10 MeV的高能中子通量由 $117 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 增至 $358 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. 高能中子通量随高度的变化可用指数函数拟合. 此外, 不同海拔处热中子(能量 $< 0.4 \text{ eV}$)与高能中子通量的比值约为0.76. 所得大气中子通量及能谱数据可为航空电子器件单粒子效应评估提供关键输入.

关键词: 大气中子, 单球中子谱仪, 飞行搭载, 单粒子效应

DOI: 10.7498/aps.75.20251133

CSTR: 32037.14.aps.75.20251133

1 引言

当空间中的银河宇宙射线和太阳粒子穿过地球磁场到达地球大气层时, 其中的高能质子会与大气中的N, O原子发生核反应, 生成中子、质子、电子、 π 介子、 μ 介子等次级辐射粒子^[1,2]. 其中具有强相互作用的粒子(如 π 介子、质子、中子等)能够继续与大气原子发生核级联反应, 生成第三代、第四代...的次级粒子. 这些次级粒子构成了大气辐射环境. 中子由于不带电而具有极强的穿透性, 广泛分布于地面和整个大气空间. 大量研究表明, 大气中子是地面和航空电子系统单粒子效应的主要来源^[3-6]. 当大气中子入射到半导体器件中时, 会与靶

材原子发生核反应, 产生反冲核或者核反应碎片. 这些带电的反冲核或核反应碎片, 通过电离作用诱发单粒子效应, 导致存储器件出现存储信息错误等软错误以及功率器件的单粒子烧毁.

大气中子导致的半导体器件失效率正比于环境中子通量. 因此, 对大气中子环境进行精确测量是评估半导体器件大气中子单粒子效应风险的关键. 大气中子的能量覆盖meV到GeV的范围, 目前仅有Bonner球谱仪(Bonner sphere spectrometer, BSS)能够满足如此宽的中子能谱的测量^[7-9]. 常规Bonner球谱仪使用聚乙烯球将中子慢化为热中子, 从而实现中子探测, 其可探测的中子能量上限约为20 MeV. 为了满足20 MeV以上能量中子的测量需求, 需要额外配备多个嵌有

* 国家自然科学基金(批准号: 12375268, U25A20501)、广州市科技计划项目(批准号: 2025A04J2781)和电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室专项基金(批准号: 24D01)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pengchaoceprei@qq.com

铅、铜或钨插入件的球体,以增强 Bonner 球谱仪对高能中子的响应^[10]. Hu 等^[11-14]基于 Bonner 球谱仪均开展了地面不同海拔处的大气中子能谱测量工作. 由于大气中子通量受海拔影响较大,飞机飞行高度处的中子通量比海平面高两个数量级以上,这意味着航空用半导体器件面临着更高的失效风险^[15]. 但目前针对航空空域的大气中子能谱的测量工作还较少^[16,17],大气中子环境数据缺失. Bonner 球谱仪系统的质量和体积过大,无法满足航空搭载的测试需求. 此外,采用 Bonner 球谱仪进行宽能谱中子探测存在一个显著缺点:需要依次在中子场中暴露多个球体,导致测量耗时较长.

基于此,本文开发了单球中子谱仪,通过一次中子暴露即可获得大气中子能谱,极大地提高了中子探测效率. 通过飞机搭载单球中子谱仪,开展了不同飞行高度处的大气中子能谱测量. 针对全能谱中对单粒子效应产生主要贡献的热中子(能量 < 0.4 eV)和高能中子(能量 > 10 MeV)成分,分别获取了其通量数据. 最后,研究了大气中子通量随海拔高度的变化关系.

2 单球中子谱仪设计

2.1 单球中子谱仪结构设计

单球中子谱仪主要由聚乙烯慢化体球(含铅层)、探测器和前端/后端电子学系统组成,如图 1 所示. 聚乙烯慢化体球直径为 29.5 cm. 富氢的聚乙烯材料主要与快中子发生弹性散射,使其慢化为

热中子后被探测器检测. 聚乙烯球体内部距离球心 3.5—4.5 cm 处有一层 1 cm 厚的铅层,其主要与高能中子产生 (n, xn) 反应,增加探测器对高能中子的探测效率^[18]. 沿着聚乙烯球体 x , y 和 z 轴方向,距离球心 0 cm, 6 cm, 9 cm, 10.5 cm, 12 cm, 13.5 cm 处分布着 36 个探测器,以获取中子经不同程度慢化后的热中子计数率. 将 36 个探测器划分成 6 组,相同半径处的 6 个探测器构成 1 组,分别记为 det_0 — det_5 . 探测器采用 ${}^6\text{Li}$ - ${}^7\text{Li}$ 玻璃闪烁体. 含 ${}^6\text{Li}$ 的锂玻璃闪烁体能同时响应中子和伽马信号,含 ${}^7\text{Li}$ 的锂玻璃闪烁体用于测量伽马本底. 将含 ${}^6\text{Li}$ 的锂玻璃闪烁体的中子-伽马混合能谱扣除伽马本底后,即可得到中子计数. 锂玻璃闪烁晶体在粒子入射时会发出闪烁光子,采用硅光电倍增管(silicon photomultipliers, SiPM)将晶体的光信号转换为易于探测的电信号. 前端/后端电子学系统用于对探测器进行电源供应和信号采集. 探测器输出电信号经放大后,由信号采集与处理模块进行模数转换和数字信号处理,处理后的中子计数等信息通过网口传输至上位机. 单球中子谱仪采用 220 V 交流电供电,正常工作温度范围为 -10 — 60 $^{\circ}\text{C}$,中子能量测量范围为 10^{-8} — 10^3 MeV.

2.2 单球中子谱仪响应函数与解谱

利用蒙特卡罗粒子输运程序 FLUKA^[19] 仿真获取单球中子谱仪探测器的中子响应函数. FLUKA 仿真结构如图 2(a) 所示. 采用均匀通量的平行入射中子面源进行仿真,中子沿 x 轴方向入射. 中子

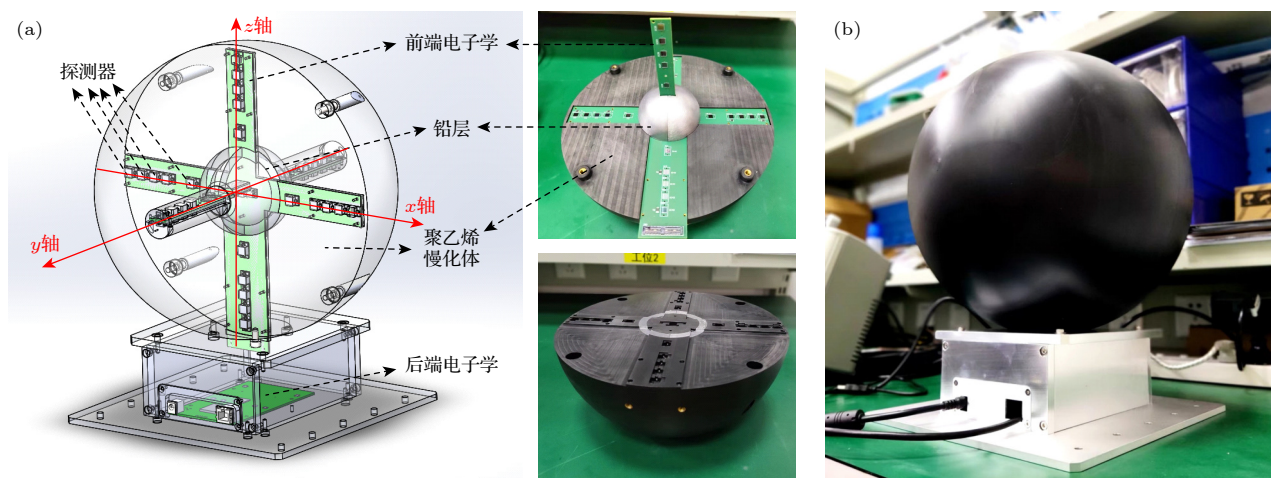


图 1 (a) 单球中子谱仪三维结构图; (b) 单球中子谱仪实物图

Fig. 1. (a) Three-dimensional schematic of the single-sphere neutron spectrometer; (b) photograph of the single-sphere neutron spectrometer.

能量设置为 10^{-8} — 10^4 MeV 范围内以 $\Delta \lg(E) = 0.1$ 为间隔的 130 个能量点. 图 2(b) 显示了单球中子谱仪 6 组探测器的响应函数仿真结果. 不同深度的探测器对于相同能量的入射中子响应不同, 位于球心附近的 det_0 探测器对高能中子的响应最强. 越靠近球体外层, 探测器对高能中子的响应减弱, 对低能中子的响应增强.

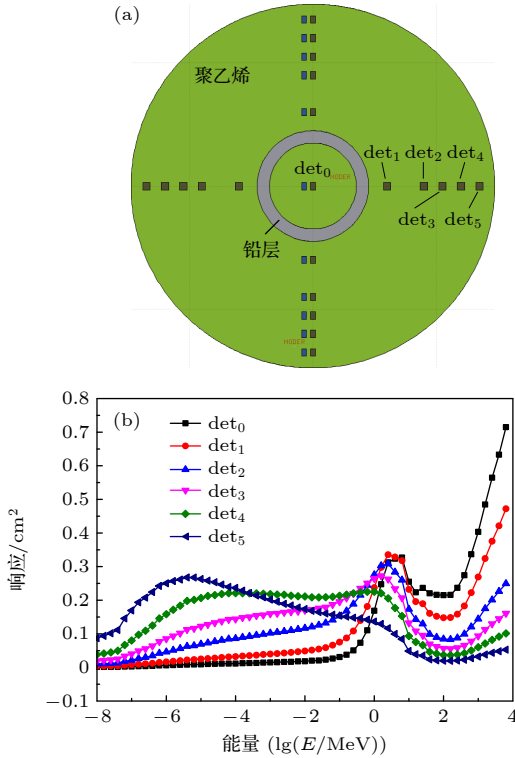


图 2 (a) FLUKA 仿真结构; (b) 单球中子谱仪响应函数仿真结果

Fig. 2. (a) FLUKA simulation structure; (b) simulated response functions of the single-sphere spectrometer.

当单球中子谱仪暴露于中子场时, 会得到 6 组探测器中子计数率. 每组探测器的计数率是相同深度处的 6 只探测器计数率的平均值. 探测器的中子响应函数 $R(E)$ 与其中子计数率满足如下关系^[20]:

$$N_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_i(E) \Phi(E) dE, \quad (1)$$

其中, N_i 为第 i 组探测器 det_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) 的中子计数率; $R_i(E)$ 为第 i 组探测器的中子响应函数; $\Phi(E)$ 为待测中子能谱. 根据图 2(b) 给出的探测器的中子响应函数 $R_i(E)$, 通过求解方程组 (1), 由探测器的中子计数率即可反推出待测中子能谱. 为了便于计算, 连续能谱被离散化为若干能量区间. 单球中子谱仪可测试的大气中子能量范围

为 10^{-8} — 10^3 MeV, 以 $\Delta \lg(E) = 0.1$ 为一个能量区间, 离散化后的能量区间个数为 110, 需要求解的是大气中子在不同能量区间内的注量率. 但是, 单球中子能谱仪的探测中子计数率只有 6 个, 即方程组 (1) 中的独立方程个数远少于未知数的个数. 因此, 单球中子谱仪的解谱属于少道解谱问题. 这意味着存在无穷多个数学函数 $\Phi(E)$ 都能满足方程组 (1), 但其中仅有少数解在物理上是可接受的.

方程组 (1) 不存在唯一解, 因此需要先验信息来寻找最优解. 本文采用基于最大熵原理的最大熵解卷积 (maximum entropy deconvolution, MAXED) 算法^[21] 实现解谱. 最大熵原理认为在给定的信息限制条件下, 熵值最大的概率分布是最合理的分布. MAXED 解谱算法根据最大熵原理法提出了解谱思路: 在方程组的无穷多种解中, 找到符合限制条件且熵值最大的一组, 该组解是最合理的. 熵的分布为预置谱 (先验信息) 和待解中子谱的函数, 限制条件为单球谱仪方程组和误差公式. 在限制条件下求解熵最大值的单球中子能谱即为 MAXED 算法的解谱结果.

2.3 单球中子谱仪的校准

采用已知能谱的 ^{241}Am -Be 中子源和 Cf-252 中子源对单球中子谱仪进行验证和校准. 图 3(a) 为单球中子能谱仪在 ^{241}Am -Be 中子源上进行能谱测量的现场图. ^{241}Am -Be 中子源的强度为 $5.3 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 中子谱平均能量为 4.5 MeV. 中子源位于石蜡屏蔽桶中心. 屏蔽桶直径为 700 mm、高 702 mm、重 220 kg, 准直孔用聚乙烯棒嵌塞防护. 石蜡外侧用不锈钢封装. 单球中子能谱仪 x 轴正对放射源出射孔, 谱仪中心距离中子源 1.2 m. 辐照过程中, 统计单球中子谱仪探测器计数率. 根据中子计数率解谱得到的实测能谱如图 3(b) 所示. 与已知的 ^{241}Am -Be 中子源预置谱对比, 实测能谱在 4.5 MeV 的主峰附近与预置谱一致, 但是在低能部分有额外的中子峰. 图 4(a) 为单球中子能谱仪在 Cf-252 中子源上进行能谱测量的现场图. Cf-252 中子源的活度为 $2 \times 10^7 \text{ Bq}$, 中子发射率为 $2.87 \times 10^6 \text{ n/s}$. 中子屏蔽桶的结构从里到外依次为 5 cm 铅、30 cm 石蜡和 5 cm 硼砂, 中子孔道直径为 10 cm. 辐照过程中, 单球谱仪 x 轴正对放射源出射孔, 谱仪中心距离中子源 1.5 m. 根据单球中子谱仪的中子计数率解谱得到的实测能谱如图 4(b) 所示. 相比于已知

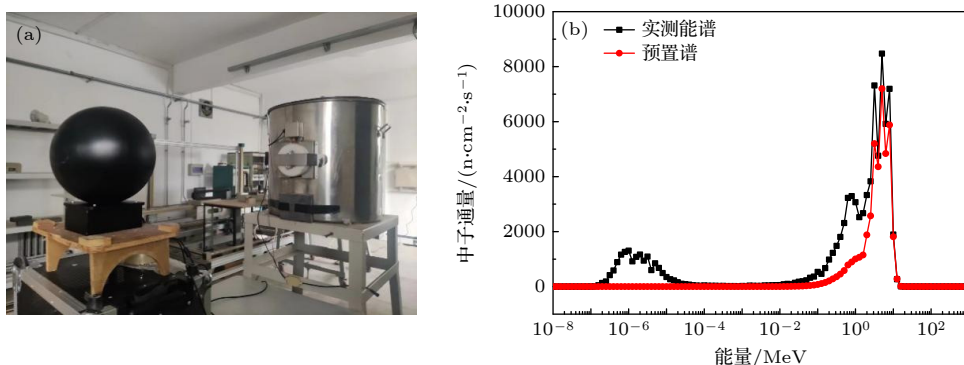


图 3 (a) 单球中子能谱仪测试 Am-Be 中子源现场图; (b) 单球中子能谱仪测试 Am-Be 中子源的解谱结果
 Fig. 3. (a) Experimental setup of a single-sphere neutron spectrometer measuring an Am-Be neutron source; (b) unfolded spectrum obtained with the single-sphere spectrometer for the Am-Be source.

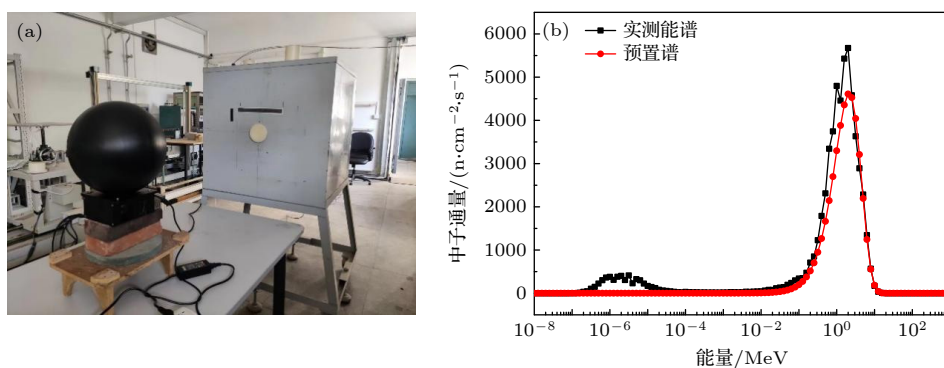


图 4 (a) 单球中子能谱仪测试 Cf-252 中子源现场图; (b) 单球中子能谱仪测试 Cf-252 中子源的解谱结果
 Fig. 4. (a) Experimental setup of a single-sphere neutron spectrometer measuring a Cf-252 neutron source; (b) unfolded spectrum obtained with the single-sphere spectrometer for the Cf-252 source.

的 Cf-252 中子源预置谱, 实测能谱的主峰与预置谱吻合, 只是在低能部分有多出的峰. 单球中子谱仪实测能谱存在额外的低能峰可能是因为测试现场环境复杂, 部分中子被慢化散射. 单球谱仪的中子计数率没有扣减本底散射中子的影响, 导致被屏蔽桶慢化的中子或者环境中的散射中子被探测到.

3 实验描述

利用中国民用航空飞行学院的 CE525 飞机搭载单球中子谱仪, 开展大气层中子环境探测, 如图 5 所示. 大气中子环境随着海拔和纬度的不同而变化^[4]. 本文主要探讨大气中子环境随海拔的变化关系, 因此需要在纬度相近的航线上开展不同海拔高度处的测量. 本文选取遂宁 (30.36°N, 105.46°E)—洛阳 (34.74°N, 112.39°E)、遂宁 (30.36°N, 105.46°E)—长沙 (28.19°N, 113.22°E) 两条航线开展了飞行搭载测量, 每条航线的纬度差在 4°以内, 以排除纬度对大气中子通量的影响. 测量海拔高度覆盖 4207—

7626 m. 通过使飞机处于不同巡航高度, 实现不同海拔下的中子环境探测. 飞机在上升和下降过程

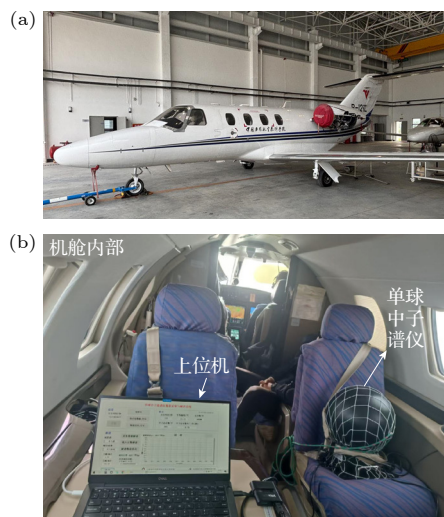


图 5 (a) 用于飞行搭载的 CE525 型飞机; (b) 飞机舱内的单球中子谱仪安装
 Fig. 5. (a) CE525 aircraft employed for airborne deployment; (b) installation of the single-sphere neutron spectrometer inside the aircraft cabin.

中, 不进行测量. 当飞机进入特定巡航高度时, 开始进行中子探测. 测量过程中, 单球中子谱仪固定在飞机客舱内部的座椅上, 如图 5(b) 所示. 客舱内部温度维持在室温, 保障单球中子谱仪可正常运行. 电子学系统自动记录探测器 det_0 — det_5 的计数率并反馈至上位机. det_0 — det_5 的计数率为 x, y, z 三条轴上距离球心相同位置处 6 个探测器的平均值. 根据不同海拔处的中子计数率, 解谱可得到对应高度处机舱内部的大气中子能谱.

4 测量结果及讨论

4.1 不同飞行海拔下的大气中子能谱

图 6 显示了遂宁-长沙航线不同海拔处单球中子谱仪的总中子计数随时间变化. 可以看到, 不同海拔处的总中子计数均随着时间呈线性增加, 这表明中子计数率基本保持恒定. 海拔越高, 总中子计数率越大. 对应海拔 5167 m, 6406 m, 7016 m 和 7626 m 处的总中子计数率分别为 0.46 cps, 0.73 cps, 1.18 cps 和 1.25 cps. 结合单球中子谱仪的响应函数, 采用 MAXED 算法对单球中子谱仪计数率进行解谱. 图 7 显示了遂宁到长沙航线不同海拔处的大气中子能谱解谱结果. 不同海拔处的中子能谱形状近似, 由 4 个能量区间组成: 一个能量小于 0.4 eV 的热中子峰, 一个能量在 0.5 eV—0.1 MeV 区间的超热中子平台区, 一个能量在 0.1—20 MeV 区间的“核蒸发”峰, 以及一个能量在 20 MeV 以上的级联峰. 随着海拔高度的增加, 不同能量段的中子通量均增大.

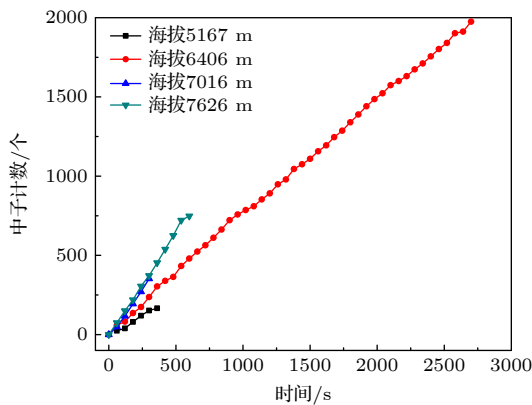


图 6 遂宁-长沙航线不同海拔处单球中子谱仪的总中子计数随时间变化

Fig. 6. Total neutron counts as a function of time at various altitudes along the Suining-Changsha flight route.

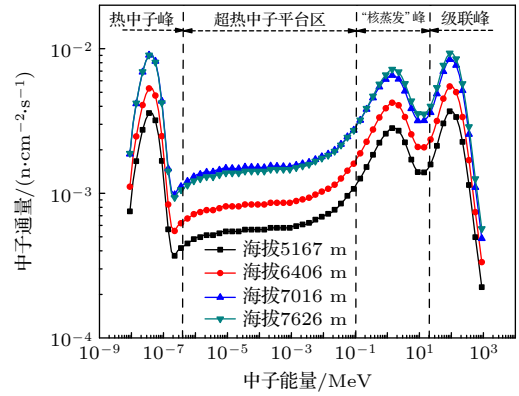


图 7 遂宁-长沙航线不同海拔处的大气中子能谱解谱结果
Fig. 7. Unfolded atmospheric neutron energy spectra at different altitudes along the Suining-Changsha flight route.

通过输入海拔高度、经纬度、太阳活动周期、局部环境等信息, 基于 Excel 的大气宇宙射线谱计算程序 (Excel-based program for calculating atmospheric cosmic-ray spectrum, EXPACS) 模型^[22], 可计算海拔 0—62 km 范围内地面及飞机机舱内的大气中子能谱. 上述模型利用蒙特卡罗程序 PHITS 对初级宇宙射线在大气中的传播进行模拟, 并通过解析函数对不同条件下的模拟结果进行拟合, 从而实现中子能谱的计算. 利用 EXPACS 模型计算了实测航线处飞机客舱内的大气中子能谱, 如图 8 中虚线所示. EXPACS 计算过程中, 海拔和地理坐标根据航线处的实际信息输入; 周围环境设置为飞机客舱, 环境因子设置为 0.25 (根据 CE525 飞机的质量核算); 太阳活动周期因子设置为 0, 对应太阳活动极小年. 图 8 给出了洛阳-遂宁

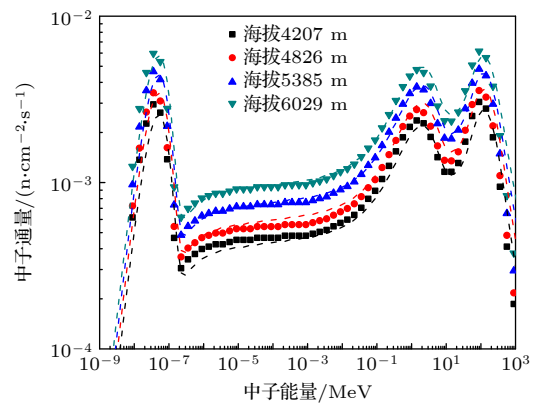


图 8 洛阳-遂宁航线不同海拔处的大气中子能谱解谱结果与模型计算结果对比

Fig. 8. Comparison between the unfolded neutron energy spectra obtained at different altitudes along the Luoyang-Suining flight route and the corresponding model calculations.

航线不同海拔处的大气中子能谱解谱结果与模型计算结果的对比. 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 3 个峰值对应的能量区间完全一致, 侧面验证了实测大气中子能谱的准确性.

4.2 中子通量随海拔的变化

对于全能谱的大气中子, 其中能量在 10 MeV 以上的中子入射到集成电路中会与靶核发生非弹性相互作用, 触发核内级联反应, 产生反冲核碎片, 最终诱发半导体器件的单粒子效应 [23]. 由于能量较低, 能量在 0.4 eV 以下的热中子与原子核发生弹性或非弹性相互作用的截面非常低, 但易被器件中存在的硼同位素 ^{10}B 的原子核俘获, 释放一个 1.5 MeV 的 α 粒子、一个大约 0.9 MeV 的锂原子核和伽马射线. 其中 α 粒子和锂原子核都是带电粒子, 其在集成电路中的电离能量沉积足以导致单粒子效应, 诱发软错误 [24]. 对于 130 nm 以上的工艺制造的集成电路, 由于采用了硼磷硅玻璃 (Borophospho-silicate glass, BPSG) 工艺, 含有大量的 ^{10}B 同位素, 因此对热中子非常敏感. 对于 130 nm 以下的工艺, 由于避免了 BPSG 工艺, 因此对热中子不再敏感. 但是, 随着半导体工艺节点进入 65 nm 以下, 部分代工厂会在钨塞衬垫层 (liner layer) 中引入乙硼烷 (B_2H_6) 基材料. 该材料最初被引入是为了使原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 的钨成核层与金属有机化学气相沉积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 的 TiN 层实现优异的集成性能, 从而消除了进一步的高温炉退火或快速热退火的需要. 但 B_2H_6 基材料的使用也导致了 ^{10}B 同位素的引入. 因此, ^{10}B 同位素大量集中在 M1 层向 ILD 层过渡的区域 [25], 正好位于靠近器件有源区的上方, 对软错误率会产生较大影响.

由于导致半导体器件单粒子效应的主要为能量在 10 MeV 以上的高能中子和大气中子能谱热峰附近的热中子 (能量 < 0.4 eV), 因此重点关注上述两个能量段内的中子通量分布. 根据测试大气中子能谱 $\Phi(E)$ 计算高能中子通量 n_h :

$$n_h = \int_{10 \text{ MeV}}^{E_{\max}} \Phi(E) dE. \quad (2)$$

根据测试大气中子能谱 $\Phi(E)$ 计算热中子通量 n_t :

$$n_t = \int_{E_{\min}}^{0.4 \text{ eV}} \Phi(E) dE. \quad (3)$$

表 1 列出了洛阳-遂宁航线不同海拔处中子通量探测数据和 EXPACS 模型计算数据的对比. 可见, 对于热中子和高能中子, 中子通量均表现出与测试地点海拔高度的正相关关系, 即海拔越高, 对应的中子通量也越大. 在测量可得的 10 MeV—1 GeV 范围内, 海拔 6029, 5385, 4826 和 4207 m 处的高能中子通量分别为 236, 185, 137 和 117 $\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. 测量数据与计算数据的最大误差为 13.8%. 在测量可得的 0.01—0.4 eV 范围内, 海拔 6029, 5385, 4826 和 4207 m 处的热中子通量分别为 179, 140, 104 和 89 $\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. 测量数据与计算数据的最大误差为 11.3%. 根据表 1, 热中子与高能中子通量的比值介于 75.7%—76.1% 之间.

表 1 洛阳-遂宁航线不同海拔处中子通量探测数据和计算数据对比

Table 1. Comparison of measured and calculated neutron flux along the Luoyang-Suining flight route at different altitudes.

| 海拔高度/m | 高能中子通量 / ($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) | | | 热中子通量 / ($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) | | |
|--------|--|------|--------|---|------|-------|
| | 探测数据 | 计算数据 | 误差 | 探测数据 | 计算数据 | 误差 |
| 6029 | 236 | 259 | -8.9% | 179 | 182 | -1.6% |
| 5385 | 185 | 202 | -8.4% | 140 | 140 | 0% |
| 4826 | 137 | 159 | -13.8% | 104 | 109 | -4.6% |
| 4207 | 117 | 116 | 0.86% | 89 | 80 | 11.3% |

飞行搭载测试得到的 16 个不同海拔处的高能中子通量随海拔的变化关系, 如图 9 所示. 根据下述指数函数可以对中子通量随海拔的变化关系进

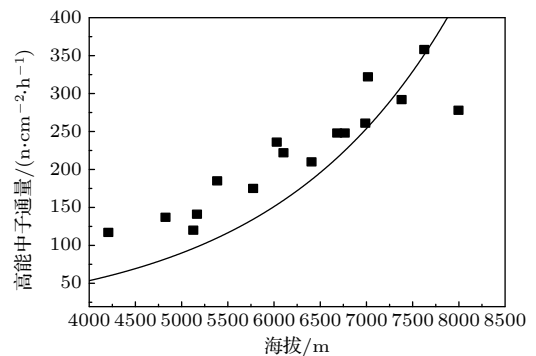


图 9 高能中子通量随海拔的变化关系, 其中点线为测量数据, 实线为拟合数据

Fig. 9. Variation of high-energy neutron flux with altitude, dotted line represents measured data, solid line denotes fitted curve.

行拟合^[13]:

$$\Phi(t) = \Phi_0 e^{\alpha t}, \quad (4)$$

其中, 拟合参数 $\Phi_0 = 6.706 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 对应海平面处的中子通量; $\alpha = 5.191 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. 通常, 大气中子通量在海拔 20 km 附近达到极大值^[2]. 在上述极大海拔以下, 可以根据 (4) 式外推不同海拔高度处的高能中子通量.

5 结 论

本文通过飞机搭载单球中子谱仪, 实现了 4.2—7.6 km 空域内不同高度处的大气中子能谱测量. 该单球中子谱仪采用直径为 29.5 cm 的聚乙烯球作为慢化体, 将不同能量中子慢化为热中子. 利用分布在聚乙烯慢化球不同厚度处的 36 个 ^6Li - ^7Li 玻璃闪烁体实现中子探测. ^6Li 玻璃闪烁体能同时响应中子和伽马信号, ^7Li 玻璃闪烁体用于测量伽马本底信号. 将 ^6Li 玻璃闪烁体探测到的中子-伽马混合信号扣除伽马本底后, 即可得到中子计数. 在聚乙烯慢化球中嵌入 1 cm 厚的铅球壳, 增大探测器对高能中子的探测效率. 相比于 Bonner 多球谱仪, 单球中子谱仪的体积和重量大幅减小, 可以满足飞行搭载的测量需求. 利用 FLUKA 仿真获取了单球中子谱仪探测器的中子响应函数, 基于解谱算法可以根据探测器中子计数得到大气中子能谱. 通过将实测大气中子能谱与 EXPACS 模型计算值对比, 验证了测量结果的准确性. 根据实测的大气中子能谱, 可以获取对半导体器件单粒子效应产生主要贡献的热中子和高能中子通量, 两者的比值约为 0.76. 同时, 随着海拔高度的增大, 大气中子通量近似呈指数增长. 上述结果可为半导体器件的大气中子失效风险分析提供关键数据支撑.

参考文献

- [1] Ziegler J F 1996 *IBM J. Res. Dev.* **40** 19
 [2] Barth J L, Dyer C S, Stassinopoulos E G 2003 *IEEE Trans.*

- Nucl. Sci.* **50** 466
 [3] Zhang Z G, Yang S H, Lin Q, Lei Z F, Peng C, He Y J 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 146101 (in Chinese) [张战刚, 杨少华, 林倩, 雷志锋, 彭超, 何玉娟 2023 *物理学报* **72** 146101]
 [4] Aufran J L, Munteanu D, Roche P, Gasiot G 2014 *Microelectron. Rel.* **54** 1455
 [5] Aufran J L, Roche P, Borel J, Christophe S, Karine C C, Daniela M, Thierry P, Gilles G, Jean-Pierre S 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1002
 [6] Normand E 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 461
 [7] Gómez-ros J M, Bedogni R, Moraleda M, Delgado A, Romero A, Esposito A 2010 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **613** 127
 [8] Serre S, Castellani-coulie K, Paul D, Lacoste V 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3582
 [9] Burgett E A, Hertel N E, Howell R M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1325
 [10] Masuda A, Matsumoto T, Harano H, Nishiyama J, Iwamoto Y, Hagiwara M, Satoh D, Iwase H, Yashima H, Nakamura T, Sato T, Itoga T, Nakane Y, Nakashima H, Sakamoto Y, Theis C, Feldbaumer E, Jaegerhofer L, Pioch C, Mares V, Tamii A, Hatanaka K 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 161
 [11] Hu Z M, Ge L J, Sun J Q, Zhang Y M, Cui Z Q, Gorini G, Zhang H, Chen J, Chen J X, Li X Q, Fan T S 2019 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **940** 78
 [12] Hubert G, Cheminet A, Nuns T, Lacoste V 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4660
 [13] Cheminet A, Lacoste V, Hubert G, Boscher D, Boyer D, Poupene J 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 1722
 [14] Peng C, Lei Z F, Zhang Z G, Yang S H, Lai P, Lu G G 2023 *High Power Laser Part. Beams* **35** 059001 (in Chinese) [彭超, 雷志锋, 张战刚, 杨少华, 来萍, 路国光 2023 *强激光与粒子束* **35** 059001]
 [15] Leray J L 2007 *Microelectron. Rel.* **47** 1827
 [16] Dyer C S, Truscott P R 1999 *Microprocess. Microsyst.* **22** 477
 [17] Normand E, Baker T J 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1484
 [18] Gómez-ros J M, Bedogni R, Moraleda M, Esposito A, Pola A, Introini M V, Mazzitelli G, Quintieri L, Buonomo B 2012 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **677** 4
 [19] Böhlen T T, Cerutti F, Chin M P W, Fassò A, Ferrari A, Ortega P G, Mairani A, Sala P R, Smirnov G, Vlachoudis V 2014 *Nuclear Data Sheets* **120** 211
 [20] Liu B, Yang H R, Lv H W, Li L, Liu J J, Jing F T, Yan M F, Wei S P 2019 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **925** 217
 [21] Reginatto M, Goldhagen P, Neumann S 2002 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **476** 242
 [22] Sato T 2015 *PLoS One* **10** e0144679
 [23] Ibe E, Taniguchi H, Yahagi Y, Shimbo K, Toba T 2010 *IEEE Trans. Electron Dev.* **57** 1527
 [24] Weulersse C, Houssany S, Guibbaud N, Segura-Ruiz J, Beaucour J, Miller F 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1851
 [25] Wen S J, Pai S Y, Wong R, et al. 2010 *IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report (IIRW)*, South Lake Tahoe, CA, USA, October 17–21, 2010

Measurements of atmospheric neutron spectra at various flight altitudes using single-sphere neutron spectrometer*

PENG Chao^{1)†} CAI Zhiyan²⁾ ZHANG Zhangang¹⁾ ZHUANG Kai²⁾
 HUANG Xianchao²⁾ MA Teng¹⁾ TONG Teng²⁾ HE Yujuan¹⁾
 FENG Baotong²⁾ ZHANG Hong¹⁾ ZHU Meiling²⁾
 LI Daowu²⁾ LEI Zhifeng¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Reliability Technology for Electronic Components, the Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China*)

2) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 22 August 2025; revised manuscript received 2 February 2026)

Abstract

This paper utilizes a high-performance aircraft to carry a single-sphere neutron spectrometer to measure the cosmic-ray atmospheric neutron energy spectra at different flight altitudes. The single-sphere neutron spectrometer employs a polyethylene sphere with a diameter of 29.5 cm as the moderator to thermalize neutrons of different energies. Neutron detection is achieved using 36 ⁶Li-⁷Li glass scintillators distributed at various depths within the polyethylene moderating sphere. The ⁶Li glass scintillator responds to both neutron and gamma signals, while the ⁷Li glass scintillator is used to measure the gamma background signal. By subtracting the gamma background from the mixed neutron-gamma signal detected by the ⁶Li glass scintillator, the neutron counts can be obtained. A 1 cm thick lead shell embedded within the polyethylene moderating sphere extends the neutron energy response of the detector up to 1 GeV, enabling the measured neutron energy spectrum to cover the range from thermal neutrons to the GeV region. The neutron response function of the single-sphere neutron spectrometer detector was obtained using FLUKA simulations, and the atmospheric neutron energy spectrum can be derived from the detector neutron counts based on the unfolding algorithm. Flight-based experiments were conducted on the Suining-Luoyang and Suining-Changsha routes, obtaining measured data of the atmospheric neutron energy spectrum in China's airspace at altitudes of 4.2–7.6 km. The neutron energy spectra at different altitudes exhibit similar shapes, consisting of four energy regions: a thermal neutron peak below 0.4 eV, an epithermal neutron plateau region between 0.5 eV and 0.1 MeV, an “evaporation” peak between 0.1 MeV and 20 MeV, and a cascade peak above 20 MeV. The accuracy of the measurement results was verified by comparing the measured atmospheric neutron energy spectra with the calculated values from the Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum (EXPACS) model. Based on the measured atmospheric neutron energy spectra, the fluxes of thermal neutrons and high-energy neutrons, which contribute primarily to single-event effects in semiconductor devices, can be obtained, with a ratio of approximately 0.76 between the two. As the flight altitude increases from 4.2 km to 7.6 km, the high-energy neutron flux above 10 MeV increases from 117 n·cm⁻²·h⁻¹ to 358 n·cm⁻²·h⁻¹. With increasing altitude, the high-energy neutron flux approximately follows an exponential growth trend.

Keywords: atmospheric neutrons, single-sphere neutron spectrometer, airborne deployment, single event effect

DOI: [10.7498/aps.75.20251133](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251133)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251133](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251133)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12375268, U25A20501), the Science and Technology Program of Guangzhou, China (Grant No. 2025A04J2781), and the Special Fund of the Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory (Grant No. 24D01).

† Corresponding author. E-mail: pengchaoceprei@qq.com

基于单球中子谱仪的不同飞行高度处大气中子能谱测量

彭超 蔡志岩 张战刚 庄凯 黄先超 马腾 童腾 何玉娟 丰宝桐 张鸿 朱美玲 李道武 雷志锋

Measurements of atmospheric neutron spectra at various flight altitudes using single-sphere neutron spectrometer

PENG Chao CAI Zhiyan ZHANG Zhangang ZHUANG Kai HUANG Xianchao MA Teng TONG Teng
HE Yujuan FENG Baotong ZHANG Hong ZHU Meiling LI Daowu LEI Zhifeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100801 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251133

CSTR: 32037.14.aps.75.20251133

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251133>

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

中国散裂中子源大气中子辐照谱仪的大气中子能谱及单粒子效应评估

Evaluation of neutron energy spectrum, fluence and single event effects of atmospheric neutron irradiation spectrometer at China spallation neutron source

物理学报. 2025, 74(19): 192901 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250975>

近存计算架构AI芯片中子单粒子效应

Neutron induced single event effects on near-memory computing architecture AI chips

物理学报. 2024, 73(13): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240430>

大气中子在电荷俘获型3D NAND闪存中引起的单粒子翻转特性及机理研究

Characteristics and mechanisms of single event upset induced by atmospheric neutrons in charge trap 3D NAND flash memory

物理学报. 2026, 75(3): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251123>

低空飞行器的子单粒子效应风险评估

Risk assessment of muon single-event effects for low-altitude aircraft

物理学报. 2026, 75(5): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251448>

非弹性中子散射谱仪及其应用

Inelastic neutron scattering spectrometer and its applications

物理学报. 2025, 74(1): 012501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241412>

N阱电阻的单粒子效应仿真

Simulation research on single event effect of N-well resistor

物理学报. 2023, 72(2): 026102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20220125>