

软错误防护技术在车规 MCU 中应用

在大气层内，宇宙射线粒子与大气分子发生核反应生成大气中子。大气中子入射微电子器件或电路将会诱发单粒子效应（SEE），效应类型主要有单粒子翻转（SEU）、单粒子瞬态（SET）、单粒子锁定（SEL）、单粒子功能中止（SEFI）等。随着半导体工艺的发展，微电子器件的特征尺寸不断缩小、工作电压不断降低、工作频率不断增加，使得发生 SEE 所需要的临界电荷显著降低，更容易引起大气中子 SEE，导致自动驾驶汽车电子系统的安全隐患增加。

美国 Actel 公司分析了 0.22μm 工艺 SRAM FPGA 器件，未经抗辐射加固的 FPGA 器件在海拔 5000 英尺高度大气中子 SEE 引起的软错误率为 4375 FIT（FIT 为故障率度量单位，在 109 个工作小时内出现一次故障定义为 1 FIT）。日立公司的 Takumi Uezono 等人分析了汽车 90nm—130nm 工艺电子系统微控制单元（MCU）的大气中子辐射特性，实验发现四款 MCU 未经 ECC 修正的软错误率为 0.1—0.2 FIT。工业和信息化部电子第五研究所对国产的三款车载信息娱乐系统和智能车辆仪表系统开展了大气中子辐照试验，试验发现 28nm 工艺 MPU 的 SEFI 截面和软错误率超过 ISO 26262-5 标准中 B 类随机硬件故障要求的 100 FIT。

按照 512KB SRAM 车规芯片为例，该器件为车规级器件，单粒子翻转次数为：

$$N = \delta SEU \times C \times t \times \Phi \quad (1)$$

式中，N 代表 SEU 数，单位为次； δSEU 代表中子 SEU 截面，单位为 $cm^2 \cdot bit^{-1}$ ；C 代表被测 SRAM 存储器的总容量，单位为 bit；t 代表时间，单位为 h； Φ 代表该地区大气中子通量，单位为 $cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 。 δSEU —中子 SEU 截面，对于某 MCU 芯片 SRAM 存储器，设定其特征尺寸为 65nm，根据中国科学院国家空间科学中心建立的数据库，可知典型 65nm SRAM 存储器的翻转截面数据约为 $8.1 \times 10^{-14} cm^2 \cdot bit^{-1}$ 。

C — SRAM 存储器总容量，对于某 MCU 芯片的 SRAM 存储器，内存大小 512 KB，即 $(512 \times 1024 \times 8)bit$ 。

t — 时间，时间为 1 年，即 8760h。

Φ — 大气中子通量，结合器件的应用场景，以华南地区和西南地区为例，华南地区（广州）大气中子通量为 $5.54 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，西南地区（羊八井）大气中子通量为 $90.6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

上述数据代入公式 (1)，预估其在华南地区一年内发生单粒子翻转的次数约为 0.016 次（1882FIT），在西南地区一年内发生单粒子翻转的次数约为 0.26 次（30780FIT）。

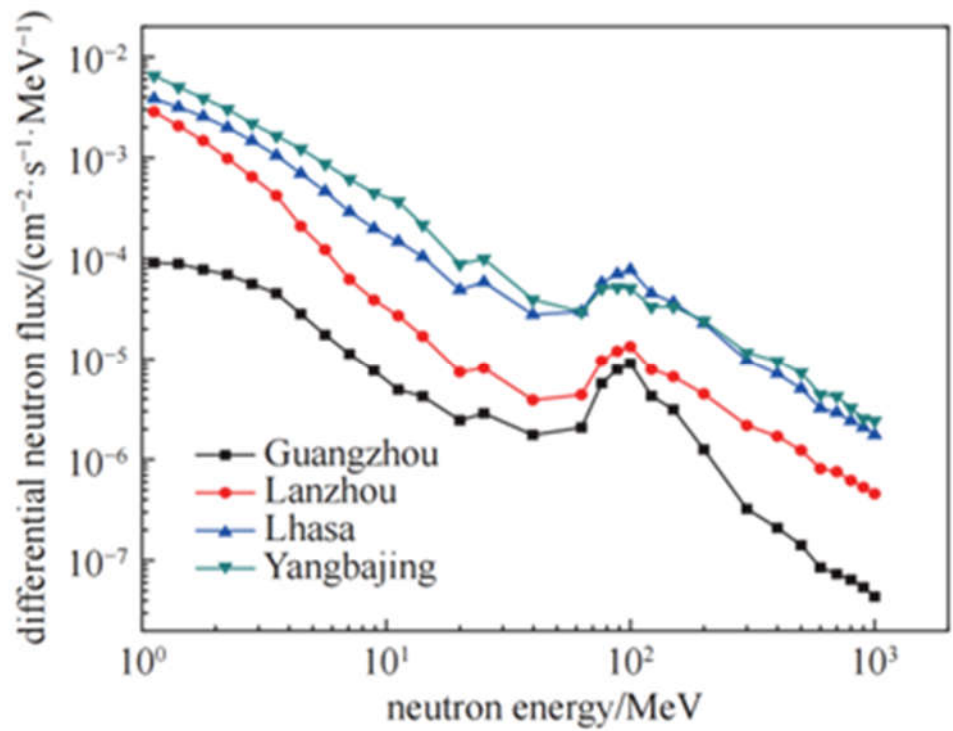


图 1 不同地区大气中子能谱图

上述数据表明，512KB SRAM 车规芯片存储介质（一般高功能安全等级车规芯片 SRAM 大于 512KB）在华南地区 SER 指标为 1882FIT，远大于车规芯片要求，ASIL-D 等级车规 MCU 要求小于 10 FIT，为了满足 ISO26262 要求，需要解决软错误问题。对于软错误汽车 MCU 问题进行研究和探索，采用新技术解决软错误等车规 MCU 痛点标志着国产替代的技术创新升级。