

抗辐照加固技术文集

计 算 机 专 集

第 一 分 册

航天工业部七七一研究所

随着微电子技术突飞猛进的发展，计算机已广泛用于航天事业和各种类型的武器系统。尤其，弹载计算机的应用与发展不仅面临着苛刻的使用条件，而且对在核爆炸环境等特殊条件下具有的突防生存能力更是计算机的一个重要难关。这也正是计算机加固的问题所在。

电子系统加固是比电子元器件加固更加复杂、更加困难的问题；但电子系统加固也无疑地要以电子元器件加固为基础。多年来，美国和一些国家在空间计算机系统中已采用加固措施来保证系统的一定突防环境要求。说明采取一些加固手段是可行的办法。

开展弹上计算机抗辐射加固研究工作不仅是新一代武器系统发展的需要，而且也是发展航天事业不可缺少的技术。为了配合此项工作，我们今年拟编辑出版有关国外计算机系统抗辐射加固技术文集一套四册。第一至第三册是有关国外，特别是美国一些军用计算机整机抗辐射加固的文集；第四册是在调研的基础上编辑整理出来的有关国内外计算机整机系统抗辐射加固技术发展的情况分析、今后的方向前景等方面的论文。

从收集计算机整机抗辐射资料的过程来看，这方面的资料很少。因为抗辐射技术本身主要服务于军事应用，因而计算机整机系统抗辐射加固就更具有敏感性。我们将广泛收集资料，渴望对开展这方

面工作的同志们能有所帮助。

此项工作得到国防科工委抗暴照相专业组的大力支持。国防科工委情报所李德孚同志提供大量有益的资料。

我所领导对编译出版这套文集十分重视。白丁付所长亲自部署。邵全法、金鹏、王巧玉、蒋轩祥等同志积极组织安排。但由于时间仓促，难免有误，望谅解。

TC-5/27.1

抗辐照加固技术文集

计算机专集

第一分册

目 录

1. 计算机抗核耐久性综述
2. SCP-STAR 一种符合军标 1750A 的抗辐照 CMOS/SOS 计算机
3. 高性能军用微处理器—M700/40
4. 444 R² 空间处理机
5. 空间处理机阵列
6. 用于空间系统的抗辐照加固 CMOS 工艺
7. CMOS/SOS SCP-STAR ALU 闪光 X 射线试验
8. 重离子对空间微电路的影响
9. 根据核效应屏蔽电子部件—把保护器件装入电子接口电路，可以阻止核 EMP 穿透关键的子系统
10. 现代军用计算机系统的特殊要求
11. 向 32 位军用小型计算机发展

计算机抗核耐久性综述

F. ROSEN and

J. L. ANDREWS

摘 要

抗辐照电子设备的设计需要懂得有关辐照环境、辐照效应以及设计和测试方法等方面的知识。而且,还需要熟悉新词汇和缩写词。

本文就电子计算机的抗辐照问题作以综述作为后面几篇文章的引言。

表 1 抗核耐久性方面的术语

术 语	定 义
通量 (FLUX)	辐照入射率, 例如, 中子/cm/sec
流量 (FLUENCE)	通量对时间的积分
电离 (IONIZATION)	由于吸收电磁能或核能而形成离子对的过程 (在硅中, 每 3.7eV 产生一个离子对)
拉德 (RAD) (MT'L)	在特定材料中, 每一克物质吸收 100 尔格电离能, = 100 尔格/G m
剂量率 (DOSE RATE)	电离速率, 即拉德 (SI) / Sec
剂量 (DOSE)	剂量率对时间的积分, 通常, 要考虑到飞行期间所有的辐照源。

体损伤 (BULK DAMAGE)	半导体中的位错 (加上蜕变) 损伤, 通常对单能粒子也就是中子进行测量, 对于光谱效应要加权。
耐久性 (SURVIVABILITY)	暴露在辐照环境的设备的持续工作能力。
“树状效应” (TREE)	电子学中的瞬态辐照效应。由核爆炸引起的所有的永久效应和瞬态效应。
加固 (HARDENING)	使辐照易损性减轻的设计过程。
设计余量 (DESIGN MARGIN) (DM)	考虑到生产设备的可变性, 适当规定的设计安全系数。

引

言

现代航天计算机需要经受得住各种核环境的考验。在地球轨道上或在星际飞行中的长寿命宇宙飞船需要经受得住自然放射性辐照, 例如: Van Allen 带域。军用系统必须经受住核爆炸和自然辐照环境。

抗辐照和 EMP 加固电子设备的设计需要有关环境、效应、设计效果、设计途径和验证方法等方面的知识。作为后面文章的引言, 本文对航天计算机 (用于宇宙飞船和飞机) 的抗核耐久性作了综述。表 1 列出了抗核耐久性方面的常用词汇和缩写词。

核 环 境

太空中的环境和核爆炸周围环境是相当复杂的。在表 2 中概述并定义了这些环境。对于宇宙飞船和飞机将进一步讨论这些环境。我们重点强调对一般计算机影响很大的那些环境（正如在后面所讨论的那样）。

捕获辐照

带电粒子在地球的磁性区域被截获。这些带电粒子总起来说被叫做 Van Allen 带。这些带是由高能电子、质子和轻离子组成。这些带电粒子在地球磁场中盘旋。电子的能量可以达到甚至超过 5 MeV，质子的能量可能超过 500 MeV。Van Allen 带给宇宙飞船造成了很宽阔的自然辐照环境，这个环境与宇宙飞船的轨道和飞行周期有关。例如，在地球同步轨道中，电子的通量可能是 10^5 电子/cm²/sec，（能量超过 1 MeV 的电子）。捕获辐照穿不透足够远的大气层去影响飞机。

宇宙射线和日辉

宇宙射线是高能光线和重离子流，它们起源于太阳系之外。所关心的宇宙射线的通量在太空中大约为 60 粒子/M²/sec。

日辉是等离子体。X-射线、高能质子、 α 粒子和重粒子的源泉，特别是质子和重离子可以穿透宇宙飞船计算机。日辉质子能在高空飞机中产生相当可观的辐照环境。由于地磁场的聚焦效应和高能质子的穿透能力，在极面航线上，这是一个特别关心的问题。每十年可能发生一两次具有强质子流级别的日辉环境。

表 2 核环境概述

环 境	定 义
宇宙射线	发源于太阳系之外的宇宙天体的光线或重离子，具有很宽的能量范围。
Van Allen 带	在地球的磁场范围中截获的高能电子、质子、轻离子（可能有）。
日 辉	太阳风暴，高能质子、 α 粒子和离子的短期偶发源，对于敏感的设备它会造成危险。
核爆炸	
中 子	具有很大动能的中性粒子，其质量约等于质子质量。
核裂变产物	通过中子反应分裂后裂变元素的两个部分。
γ 射线	裂变产物发射出来的能量在 100 Kev, 以上的光子。
X 射线	能量在 100 eV 与 100 Kev 之间的光子，核爆炸时，它带走巨大的能量。
EMP	核爆炸之后在地球大气中或大气层附近产生的瞬态电场和磁场，类似于照明光源附近的场，但是在地球表面几百平方英里面积的区域都可能有巨大强度。
电磁脉冲	

裂变 β

在核爆炸中直接产生的和由中子衰变或裂变产物产生的电子以及在磁场范围（象具有持续时间为几天到几年的人造Van Allen带）内捕获的电子。

核爆炸

核爆炸有两种基本类型：裂变型和聚变型。诸如铀那样的元素被分裂时就发生裂变型核爆炸。重氢同位素被聚变时就产生聚变型核爆炸。在两种情况下，产生的可感觉的产物有： γ -射线。X-射线。中子流以及放射性离子流。

核爆炸产物在太空中飞行不受任何阻碍，它可能击中宇宙飞船，也可能穿透宇宙飞船。一次核爆炸能产生 $M(10^6)$ 吨级的能量（TNT的等效能量级别），在几千公里的距离内造成极恶劣的环境。在太空中的核爆炸，可能导致形成人造Van Allen（捕获的）电子带，这个人造Van Allen带将延续几天到几年。

对于太空环境来说，大气层中的核爆炸产生的影响是缓和的。X-射线很快被大气吸收。但是，中子流和 γ 射线有更强的穿透能力，它们在大气层中的最大穿透范围为10英里。电磁脉冲和猛烈传播的无线电波都是由核爆炸产生的离开爆炸地向外优先传播的电荷产生的。对于100 km以外发生的核爆炸来说，能产生最强烈的EMP。这种EMP在几百平方英里的范围内其大小为50 kv/M。

各种效应

上一节详细叙述了各种核环境。一种核环境产生的后果强烈地受着系统高度的影响。说得具体点，受核爆炸的距离的影响。各种核效应被归纳概述在表 3，在本文中只考虑在半导体中的效应。

核效应有两大类：瞬时衰减或长期衰减。由 X-射线、宇宙射线和中子流（也可能）引起的效应是瞬时衰减效应。瞬时衰减效应持续时间一般为几个毫微秒到几十个毫微秒，这与所采用的半导体工艺有很大关系。长期衰减效应一般持续几秒钟到几年的时间。这种衰减效应是持久性的。这些效应与表 4 中所列的它们在宇宙飞船和飞机中的重要性有关。

表 3 核效应概述表

效 应	定 义
瞬态效应光电流	光照时在偏置半导体结中产生电荷所形成的电流。对于相同的暴露时间来说，光电流的大小随结电压的不同而变化。对于单个电离粒子，其光电流大小随离子的电荷和能量的不同而变化。该电流能使半导体器件导通。
翻 转	存储单元或逻辑状态因核爆炸剂量率而引起的触发。
单粒子效应 (SEU)	由于单个高能粒子（一般指重离子）通过而产生的光电流效应引起的翻转，对于由同样的根源引起的闩锁效应，常常使用这个术语。

闩 锁

离子化辐射脉冲使正常情况下应截止的寄生结电路导通。然后，正反馈状态通导高电流。从而可能导致器件毁坏。

系统生成电磁脉冲
(SGEMP)

诸如在电缆线或设备结构中系统生成的EMP (电磁脉冲) 场和电流。由于X-射线脉冲作用，在设备 (或系统) 中生成这种SGEMP。

烧 毁

器件中，由于离子化、光电流以及SGEMP补充电流的积分效应而引起的半导体器件损坏。

长期效应

通常，在半导体器件的电介质中，由于离子化的结果造成的损伤，例如CMOS管中的阈值电压漂移。这种效应是持久性效应。

离子化损伤

体损伤

主要表现为少数载流子寿命缩短。这种效应使双极晶体管增益减小，特别是在低 f_t 器件中，更为明显。

瞬态效应

瞬态效应是由核爆炸和宇宙射线产生的效应。主要的瞬态爆炸效应有光电流和SGEMP (系统生成的电磁脉冲)。闩锁和翻转。单个存储器单元的翻转可能由宇宙射线的干扰而产生，这种翻转称为单粒子效应 (SEU)。

当X-射线等对半导体结产生离化作用时，就产生光电流。每一个暴露在X射线中的结都产生一个瞬态电流脉冲。其最终效果是使半导体结导通。在偏置的半导体中的总电流能使电路翻转和使半导体毁坏。当X射线干扰该系统时，就产生系统生成电磁脉冲（SGEMP）。例如系统加固装置释放出来的电荷被接口电路中的补充电流中和。最终接口电路的总电流可能使接口电路超载。由于大气层核爆炸环境中X射线的含量低，系统生成电磁脉冲（SGEMP）对飞机产生的影响甚小，算不上一个问题。闩锁效应是在结和氧化物隔离集成电路中（JIIIC）产生的一种效应。对于所有的JIIIC衬底中的四层寄生结构（SCR）都有一种潜能。在高剂量率激励的情况下，寄生的SCR可能导通和锁住该集成电路的功能。从电源流出的高电流可能导致器件过热甚至烧毁。

单粒子效应是光电流产生过程中的一种特殊情况。单个高能粒子通过半导体时会释放电荷，被释放的电荷也许足够翻转这个单元。宇宙射线的研究是一个相当新的领域，在这个领域中发生了令人惊奇的以地面为基础的测试结果。

长期衰减效应

由核辐照产生的半导体的长期衰减效应有两种类型：体损伤和离子化损伤。

“体损伤”这个术语用于描述晶体结构中的位错效应。中子和Van Allen带粒子与硅原子之间的弹性碰撞会导致各种类型的缺陷：空穴式、间隙式以及更复杂的效应。这些缺陷的主要影响是减少少数载流子寿命，这将使晶体管增益减小。低频双极结构（例如

功率晶体管)在流量为 10^{12} 中子/cm² 数量级,等效能量为 1 MeV 的情况下,对缺陷十分敏感。而多数载流子器件(例如各种 MOSFET)也许很难达到这个量级的 100 倍。

“总剂量”或电离损伤是由离化辐照(例如 X 射线、 γ 射线和 β 粒子流)所引起的。在半导体器件中,电荷被氧化物所捕获,在硅—氧化层界面形成界面态。在低电平下,这些效应可能使漏电流增加,在高电平下,可能造成反型和沟道。NMOS 和 CMOS 集成电路的损伤阈值大约在 10^5 到 10^4 拉德(硅)数量级(对于市售的 100 个 MOS 器件的抽测结果)。加固的双极集成电路的损伤阈值为 $10^4 \sim 10^6$ 拉德(硅),甚至还要高些。电子学领域的离化损伤程度与采用的制造工艺有很大关系。

离子化也能引起化学变化,导致材料缺陷。虽然大多数材料一般都能抵制辐照损伤,但是聚四氟乙烯绝缘材料(TFE)则是一种稍微敏感些的计算机用的材料,它在空气中的损伤阈值大约为 $10^5 \sim 10^6$ 拉德(TFE)。

电磁脉冲(EMP)

对于飞机上用的计算机来说,在核爆炸环境中,EMP 是一个十分关心的问题。与计算机连接的电缆起天线的作用,能在接口电路中诱发出很大的瞬态电流。这些瞬态电流以及穿透机壳结构直接进入计算机的电磁脉冲(EMP)能使缺乏保护装置的半导体器件超载。随着集成电路尺寸的缩小,半导体器件变得更加敏感,这个问题将变得越来越严重。电磁脉冲(EMP)不会在光导纤维电缆中诱发瞬态电流。

在宇宙飞船中，只要不是位于地球大气层附近的飞船，电磁脉冲（EMP）是一个小问题。

表4 各种现象及其在计算机中的激励作用

基本现象	环境激励源		
	核爆炸环境		自然环境
	宇宙飞船	飞机	空间辐照
光电流	△	△	△ (宇宙射线)
系统生成电磁脉冲 SGEMP	△	○	
离化损伤	△ 人造带	○ 放射性堕落尘云	△ Van Allen带
体损伤	△ 核爆炸和人造带	△	○ Van Allen带
EMP 电磁脉冲	○	△	

注：△ 重要的 ○ 次要的

性能要求

想要在辐照环境中使用的计算机必须具有辐照耐久性和适合它们系统飞行的性能要求。辐照的衰变过程及响应在部件级是很关键的问题。一般来说，部件的辐照响应是以经验为基础的，仅作统计描述。考虑飞行性能可信度时，把系统级的可信度放在计算机级。

因此，规定设计容限（余量）要复盖在长期生产过程中部件的可变性。另外，设计容限（余量），即在环境级的安全系数或较大的测试样品度量（在部件、电路、计算机级），完全能用来规定在能接受的性能方面的可信度。核爆炸产生影响的时间标准（通过和/或恢复时间）与系统功能和临界性有关，它们强烈地影响着设计的实现途径（部件、屏蔽等）。在建立性能要求和设计容限（余量）的时候，如果没有很好考虑和理解许多种辐照影响问题，也许会导致无意中的设计余量过大或过小。

核爆炸性能要求常常被表示成在模拟器环境中通过质量合格鉴定试验。在这种情况下，所用的模拟器（例如闪光或X射线机）的能力就限制了质量鉴定级别。在宇宙飞船应用中，也许要增加对自主权容限和容错的要求。这三个要求放在一起可能进一步约束了计算机的体系结构，所以，必须仔细平衡每一种要求，以满足在整个飞行过程中所需要的性能。

设 计 影 响

核环境影响在下列几个主要领域中的电子设计：

- a) 衰变
- b) 单粒子效应
- c) 光电流烧毁
- d) 接口烧毁
- e) 翻转恢复
- f) 闪烁

适用于这些效应的设计方法基本上能归纳成一套设计指南。这些指南能以“设计手册”形式被遵循。设计方法严重地影响着性能，设计中需要辐照效应专家进行指导。

衰变过程

正如以前提到的电子器件一样，部件在核环境中会衰变。其衰变（退化）程度与半导体工艺，有效的辐照屏蔽以及各种核环境强度量级密切相关。因为某些工艺比另一些工艺对核环境更加敏感，所以通常，把限制使用的部件列成表。另外，设计时必须调整，使设计考虑的衰变比正常部件的衰变更快。对待辐照衰变就象对待其它任何衰变环境，例如温度或寿命一样。最终的设计办法是将辐照屏蔽、部件选择以及保守电路设计综合起来考虑。

单粒子效应 (SEU)

存储器元件对单粒子效应 (SEU) 的灵敏性强烈地依赖于偏置电压、半导体工艺及器件几何结构。对于大几何尺寸的 CMOS 存储器元件来说，SEU 的灵敏性是个次要问题。随着器件几何尺寸减小，象 LSI 和 VLSI 存储器中那样小的几何尺寸，人们越来越关心单粒子效应。所关心的粒子具有如此之高的能量以至于屏蔽不住。所以，采取的对付措施由零部件选择和计算机体系结构设计两部分组成，在设计约束允许的地方，在高偏置电压下工作的大几何尺寸的部件或 SOS 电路也许是适用的。大的 LSI 存储器可能需要错误校正逻辑。特别关键的功能可能需要具有多数表决的三重冗余。

光电流烧毁

光电流烧毁通常通过耐电流极限来避免。特殊电路，例如电源电路，会因光电流而严重退化。在特殊电路中，采用超尺寸部件或更加微妙的设计措施来防止烧毁。为了实现光电流烧毁保护，一般的LSTTL逻辑板的功耗增加6%。

接口烧毁

SGEMP保护是通过给所有的输入/输出引脚加上终端保护器件的办法来实现的。一般的终端保护器件是齐纳二极管、电阻、MOV等器件以及各种电容器。功率很少受影响，而每个接口电路附加一两个部件却为封装工程师提出了额外的挑战。

输入/输出电路对EMP（电磁脉冲）的防护受电缆屏蔽和终端保护器件联合结果的影响。如果系统结构和电缆屏蔽能使EMP减弱到足够小的话，那么就不再需要终端保护器件。

翻转恢复

核辐照损伤后恢复原状是系统体系结构设计中一个重要问题。核事件的恢复有两条基本途径。最直接了当的一条途径是把核环境屏蔽至逻辑翻转水平之下。在屏蔽行不通的地方，会发生逻辑翻转，需要防止这种翻转发生。

在 10^7 拉德/秒以上的剂量率辐照下，大多数存储器器件将发生翻转。这就限制选用CMOS/SOS器件，这种器件在 10^{10} 拉德/秒辐照下不会翻转。如果能够用合理的屏蔽厚度把环境屏蔽至该器件翻转剂量率以下，那么就不需要进一步采取措施。在屏蔽行不通的地方，计算机体系结构必须适应所有存储器元件的全翻转。在采取了防止翻转措施的设计中，并入一个电路来探测剂量率是否