



强强联合：抗辐射芯片加持，太空技术、核能领域突破新高

新一代抗辐射芯片支撑下，用于高辐射环境的设备终将追上21世纪发展步伐。

Duncan Stewart, David Jarvis, Christie Simons, Gillian Crossan, Roger Chung, Mark Lian, Leo Chen

抗辐射芯片小巧智能，能够承受其他多数芯片无法应付的辐射水平。德勤全球预测，抗辐射芯片电子产品市场将在2023年创造15亿美元销售额，¹尽管芯片市场总规模预计将突破6,600亿美元，²抗辐射芯片只占其中一小部分，但这些芯片的强大之处在于它们能实现的功能，而非创造的金钱价值。

先进抗辐射芯片助推全行业转型

电离辐射的能量比引发皮肤癌的紫外线高一万亿倍，不利于芯片使用。电离辐射会持续损伤芯片（根据总电离辐射剂量（TID）测量），降低芯片性能并最终导致设备无法正常工作。而高能粒子则引起另一种辐射效应。高能粒子会导致单粒子效应并将处理器或内存晶体管的值从1翻转到0或者从0翻转为1，这一现象被称为“位翻转”。经过足够多次的翻

转,计算就会被破坏,甚至造成称为“门锁”的永久性致命错误。³

太阳耀斑释放的高能粒子进入地球大气层时,可能引发“位翻转”现象。太空中,由于晶体管的尺寸较小,单粒子效应成为一个不容忽视的问题。与此同时,在更长时间的太空飞行任务中,总电离辐射剂量也值得关注。部分地面应用(例如福岛核电站核污染净化⁴)还要求对伽马射线具有一定的耐受性。另外,对于暴露在X射线下的医疗设备,强化抗辐射性有助于延长其使用寿命⁵。

尽管抗辐射芯片适用于所有应用场合,但在太空及核能领域却能发挥最大效用。

太空: 对于芯片而言,太空环境过于恶劣。振动、剧烈的热变化、静电放电和发射时的重力都要求太空芯片比普通智能手机芯片更加坚固。这些重重危险中,辐射可以说是其中最大的威胁。地球大气层能够非常有效地阻挡辐射。但更高轨道上的卫星位于大气层上方,因此会持续暴露在较高的有害辐射之下,而在太阳最活跃的时候,这些卫星还会间歇性地受到高度辐射照射。除了国际空间站阻挡的部分之外,目前太空中的大多数芯片都是“传统芯片”,能够耐受辐射,但因采用的技术已过时,无法实现人工智能图像处理和图形操作中端智能手机也能进行的处理流程。因此,许多太空设备都是“哑终

抗辐射芯片制造方式

抗辐射芯片有物理和逻辑两种制造方式。首先(本次预测的重点),芯片的物理制造方式有所不同,可采用碳化硅或氮化镓(详见关于这些材料的相应预测)等不同生产材料,或者硅的处理层可置于绝缘层或衬底上。其他方式还包括使用双极集成电路代替传统的互补金属氧化物半导体(CMOS),动态随机存取存储器(DRAM)代替静态随机存取存储器(SRAM),使用废弃的硼阻挡辐射,或通过专门设计进行辐射硬化。此外,在太空应用中,普通包装无法承受重力和其他环境条件。因此,抗辐射芯片需特制包装(如陶瓷),能够比其他普通材料更有效地承受更高的重力以及更广的温度范围。设计和布局工艺也可用于技术设备硬化。逻辑硬化可以通过各种冗余实现,也可通过特殊的硬化锁存器、布局工艺和定时电路实现。

端”,它们捕捉图像、提供连接并自主操纵,但需要通过地面处理协助完成所有任务。它们需要把所有东西传回地球,等待地球确定下一步行动,然后再把正确的指令传回来。这一过程比较缓慢。

适用于太空环境的新一代抗辐射电子设备或将改变这一局面,并可能带来巨大益处。例如,美国国家航空航天局(NASA)的Space Cube是一种现场可

编程门阵列 (FPGA) 机载系统,可帮助提高太空中的机载计算能力、自主性和人工智能/机器学习能力。⁶在这些技术进步的支撑下,航天器的智能化程度、耐用性和可信度均得到提升。成像卫星可以观测到海底地震等自然灾害,并提前数小时发出海啸警报,挽救数百万人的生命。不合法的甲烷排放(甲烷导致短期全球变暖的程度是二氧化碳的85倍)⁷可被实时检测到,因此可以更快抓获违法者并处以罚款。存在碰撞风险的卫星能够加快自主移动速度,降低失控碰撞和遭遇轨道碎片的风险。⁸

核能:出于对安全和浪费的担忧,核裂变能源生产已在过去20年中有所减少,但实现《巴黎协定》2030年气候目标的时间仍较紧迫,因此裂变又重新引发了人们的关注。⁹未来十年,将涌现出多个全新现代化的核电站,比过去的核电站更小、更安全。日益先进的抗辐射芯片已经能为这些新型核反应堆提供有力支持。

然而,核能的核心并非裂变,而是聚变。更清洁、更环保、(理论上)更强大且更成功的聚变反应堆将

在几十年内推动解决地球的温室气体排放问题。但实现聚变需要磁场、高压以及不断波动的温度,而所有这些要素均需要非常稳健且极度抗辐射的芯片进行感知、阐释和控制。¹⁰随着近期的各种发展进步,聚变动力比以前想象的更具可行性,¹¹运行这些反应堆的必要性正在上升,并有望在这个十年末成为推动抗辐射芯片需求增长的关键因素。

中国抗辐射芯片正走向独立自主

在中国,抗辐射集成电路技术创新团队已取得诸多成果:成功研制具有国际先进水平的FPGA、CPU等多款宇航核心集成电路产品,已在北斗导航、载人航天、探月等重大航天工程中使用,实现了我国集成电路研制能力的跨越式发展。到2023年,中国将进一步推动抗辐射技术的开发和研究,致力于提升抗辐射芯片的国产化率。在未来,通过将AI功能与新一代抗辐射芯片集成在一起,空间设备可以自行处理所有高级分析——图像检测、图像分类、自动决策、及时行动。

小结

正如近期芯片短缺所暴露的问题一样，只在一两家工厂制造任何特定类型的芯片并不明智。各国各地区希望确保本地拥有抗辐射芯片供应商和制造商。例如，美国联邦政府斥资1.7亿美元在明尼苏达州推进抗辐射芯片制造。¹²

抗辐射芯片对军事和国家安全也相当重要。秘密军事监控卫星以及核武器就是其中的典型范例。所有军事应用芯片自给自足程度都不高，截至2021年，美国军事系统所使用的芯片中只有2%是由可信任的美国厂商制造提供。¹³

有趣的是，低空执行短时任务甚至可以使用商用现成技术 (COTS) 芯片，而无需采用特制抗辐射芯片，因为COTS芯片可在系统层级实现抗辐射。这就意味着抗辐射领域出现了重大变局，也降低了某些太空应用的芯片成本。¹⁴

如上所述，太空中使用抗辐射芯片的另一领域是整合人工智能/机器学习能力，并将边缘计算纳入太空应用，如此就无需将它们捕获的所有图片和图像发回地球，等待进一步分析和洞察，也可避免使用有限的网络带宽。将人工智能/机器学习能力与机载抗辐射芯片相结合，太空设备则可自行处理所有高级分析，如图像检测、图像分类、自动决策和及时行动。¹⁵

除了大力发展机载分析外，各公司还在试验将侧重分析的有效载荷送入轨道，专门用于执行高级数据处理和分析任务。此类计算密集型专用卫星可作为向其他轨道卫星提供边缘计算服务的枢纽。¹⁶

公司和政府或将鼓励持续研发抗辐射技术。近期，各方均在实施计划，如美国国家航空航天局的高性能航天计算 (HPSC) 项目，他们的重点在于使用先进芯片和现代架构推进新一代太空任务，旨在支持人类重返月球以及登陆火星的宏伟计划。美国国家航空航天局和Microchip近期合作开展了一项耗资5,000万美元的项目，致力开发星载处理器，其性能将超过当前工业处理器100倍之多。¹⁷

继续探索的方向包括研究复合物半导体 (氮化镓和碳化硅) 等材料，以新方式使用传统硅 (鳍式场效应晶体管 (FinFET) 和绝缘硅片 (SOI))，同时也催生出ARM或RISC-V等常见实用商业技术的抗辐射版本。¹⁸此外，目前几家芯片巨头正在试验先进技术节点和小于10nm的线宽，或将助推减轻发射装置的整体重量。这些举措至关重要，将有助于控制项目总成本，同时提高任务的成功率。

卫星产业可能会面临重大挑战。几十年来，太空传感器一直依赖于地面处理。大幅提升机载处理和内存能力带来全新机遇，未来几年，这些新功能将推动卫星产业大有可为，让我们拭目以待。

尾注

1. 德勤全球预测和分析基于公开资料信息。
2. World Semiconductor Trade Statistics (WSTS), "The World Semiconductor Trade Statistics (WSTS) has released its new semiconductor market forecast generated in August 2022," press release, August 2022.
3. JEDEC, "Single-event latch-up," accessed August 31, 2022.
4. Martin Fackler, "Six years after Fukushima, robots finally find reactors' melted uranium fuel," *The New York Times*, November 19, 2017.
5. Gary Hilson, "Medical devices require radiation-tolerant memory," *EETimes*, July 8, 2014.
6. Xilinx, "Radiation Tolerant Kintex UltraScale product overview," accessed August 31, 2022.
7. United Nations Economic Commission for Europe, "The challenge," accessed August 31, 2022.
8. David Jarvis et al., *Too congested before we're connected? Broadband satellites will need to navigate a crowded sky*, Deloitte Insights, November 30, 2022.
9. Laura Benshoff, "Nuclear power is gaining support after years of decline. But old hurdles remain," NPR, June 30, 2022.
10. Kyungsoo Jeong et al., "A Radiation-Hardened Instrumentation Amplifier for Sensor Readout Integrated Circuits in Nuclear Fusion Applications," *Electronics* 7, no. 12(2018): 429.
11. Jeff Tollefson, "Exclusive: Laser-fusion facility heads back to the drawing board," *Nature*, July 22, 2022.
12. Samuel K. Moore, "U.S. invests in fabs that make radiation-hardened chips," *IEEE Spectrum*, October 29, 2019.
13. Sujai Shivakumar and Charles Wessner, "Semiconductors and national defense: What are the Stakes?," Center for Strategic & International Studies, June 8, 2022.
14. 例如，由于抗辐射芯片价格相当昂贵且难以升级，因此采用商用/现代芯片，并在系统层级打造抗辐射功能。参见 Anastasi in Tech, "Computer chips for space travel", YouTube, 2021年9月14日。
15. Semiconductor Engineering, "Radiation hardening chips for outer space", YouTube, December 14, 2021.
16. Debra Werner, "Living on the edge: Satellites adopt powerful computers," *Space News*, January 24, 2022.
17. Praharsha Anand, "Microchip scoops NASA's \$50m contract for high-performance spaceflight computing processor," *ITPro*, August 16, 2022.
18. Rob Aitken, "Radiation-hardened Arm chips aim for the stars," *Arm*, February 27, 2020; Gareth Halfacree, "Microchip shows off rad-hardened RISC-V for low-cost satellites," *AB Open*, July 25, 2019.

关于作者

Duncan Stewart | dunstewart@deloitte.ca

Duncan Stewart is the director of TMT Research for Deloitte Canada and is a globally recognized specialist on the forecasting of consumer and enterprise technology, media & telecommunications trends. He presents regularly at conferences and to companies on marketing, technology, consumer trends, and the longer-term TMT outlook.

David Jarvis | davjarvis@deloitte.com

David Jarvis is a senior research manager with Deloitte's Center for Technology, Media & Telecommunications, Deloitte Services LP. He has more than 15 years of experience in the technology industry and is a passionate expert and educator focused on the future of our digital society.

Christie Simons | csimons@deloitte.com

Christie Simons is the Audit & Assurance Technology, Media & Telecommunications (TMT) industry leader with Deloitte & Touche LLP. She specializes in serving fast-growing, dynamic venture-backed companies and large complex publicly listed technology clients with external audit, IPO, M&A, and SOX services.

Gillian Crossan | gicrossan@deloitte.com

Gillian Crossan is a principal in Risk & Financial Advisory, Deloitte & Touche LLP, and leads the global technology industry sector. She has been with Deloitte US for more than 25 years and has worked across sectors including energy, health care, consumer products, and technology.

致谢

The authors would like to thank **Karthik Ramachandran**, **Dan Hamling**, and **Brandon Kulik** for their help in supporting our research.