

Technical White Paper

航天应用的 IC 采购：升级筛选 COTS 与航天增强型产品 (SEP) 的利弊



Michael Seidl - Texas Instruments
Frederik Kuechen and Michael Moesken - TESAT Parts Agency

摘要

本白皮书对比了 COTS 升级筛选与航天认证元件采购在不同任务类型中的应用——包括 LEO 星座、MEO 与 GEO 平台、深空以及传统项目——并分析了其中潜在的技术、成本、进度与风险权衡，从而为读者提供一个改进元件采购策略的实用决策框架。

内容

1 简介.....2

2 航天电子设计格局.....2

3 单一受控基准的重要性.....4

4 对 COTS 器件进行升级筛选的步骤.....6

 4.1 第 1 步 — 确定候选器件.....6

 4.2 第 2 步 - 准备单粒子效应 (SEE) 测试 (开帽)6

 4.3 第 3 步 — 单粒子效应 (SEE) 测试.....7

 4.4 第 4 步 — 执行 TID 测试并评估辐射寿命.....7

5 交货周期与良率责任.....9

6 总结.....10

7 参考资料.....11

1 简介

商业航天服务的兴起正在加速低地球轨道 (LEO) 星座的部署，而深空、中地球轨道 (MEO) 和地球同步轨道 (GEO) 任务仍要求在长寿命周期内具备最高可靠性；因此，设计人员正面临两个相互矛盾的目标：最小化成本与最大化可靠性。这两个目标分别通过新航天方案（注重成本的 LEO 星座）和传统航天方案（注重风险的深空、MEO 和 GEO 卫星）来实现。

对商用现货 (COTS) 元件进行升级筛选，有可能降低大规模 LEO 星座的物料清单 (BOM) 成本，但这种做法会带来独特的风险特征，必须予以量化和缓解。相比之下，航天认证器件能在恶劣的太空环境中提供确定性的性能，往往还具有经过验证的飞行传承。对于不能容忍任何风险的长周期任务，例如 MEO 和 GEO 卫星（它们必须实现超长在轨寿命以摊薄高昂的发射成本，并承受由于长期处于范艾伦辐射带而增加的辐射量），以及深空和传统项目，这类器件通常是唯一可行的选择，尽管其价格不菲。

巨型星座（例如宽带、对地观测、物联网 (IoT)）的激增改变了航天硬件的经济模式。曾经足以证明使用抗辐射加固 (rad-hard) 器件具有合理性的单位质量 BOM 成本，如今正被重新评估，被用于与大批量、潜在低成本 COTS 替代品进行比较。一次发射，永久飞行的理念仍适用于高价值的 GEO 资产，而 LEO 星座却要求快速的设计周期、激进的价格目标以及迭代硬件世代的能力。本白皮书针对由此产生的成本效率与任务保证之间的张力进行探讨。

文中通过任务类型分类法（新太空 LEO 星座、传统 MEO 和 GEO 平台、深空探测器以及混合型传统项目）的视角，对比了两种方案——COTS 升级筛选与直接采购航天认证元件。本文审视了使集成电路具备航天适用性的技术特性，概述了筛选活动的实际考量因素，并量化了在成本、进度和总拥有成本方面的潜在权衡。

核心主题包括：

- 任务类型指导——新太空 LEO 星座、传统 MEO 和 GEO 卫星、深空探测器以及混合传承项目在成本、可靠性和寿命要求上有何不同。
- 关键筛选参数——抗辐射能力、热循环耐久性、真空释气、机械冲击及其他特定危险测试，以及每项测试如何与针对特定任务范围定义的危险分析建立对应关系。
- 筛选活动经济学——典型的测试资产、批次规模考量、工程投入，以及由此产生的每个经筛选器件的成本与认证器件单价之间的对比。
- 风险缓解策略——冗余架构、降额、备件库以及轨道运行状况监测，使基于 COTS 的设计能够达到可靠性目标。
- 航天认证器件的优势——针对恶劣太空环境全面特性化，并提供相应数据表、传承飞行记录，以及在失败成本过高的任务中降低项目级风险。
- 生命周期与总拥有成本影响——早期元件选型决策如何影响星座经济性、良率与供应责任、升级路径和过时管理。

本文的读者将获得一个实用的决策框架，能够将元件采购与特定任务类别的成本、风险和进度制约因素相匹配；使读者能够在当前竞争激烈的航天市场中做出明智的选择，在经济效益与任务成功之间取得平衡。

2 航天电子设计格局

航天电子设计格局受到若干关键环境与材料因素的影响，在为任何任务（无论是低成本 LEO 星座，还是长寿命 MEO、GEO 或深空探测器）选择元件时，都必须考虑这些因素。

抗辐射能力高度依赖于工艺。即使是采用相同半导体工艺节点制造的器件，其辐射响应也可能表现出巨大差异，因为电路拓扑和所使用具体模块的不同会影响敏感性。此外，许多关于耐辐射能力的笼统说法具有误导性。虽然 65nm 工艺通常被认为对单粒子闩锁 (SEL) 免疫，但这种免疫仅适用于低压（约 1.1V 及更低）电路。如果产品包含更高电压模块，这些部分更有可能对 SEL 敏感。而且，外延 (epi) 或绝缘体上硅 (SOI) 基板的存在并不能自动保证 CMOS 器件的 SEL 免疫能力。对于大多数 CMOS 产品而言，epi 基板对 SEL 敏感性的影响甚微，而 SOI 仅在场氧化物（浅沟槽隔离）完全贯穿有源层并延伸至埋氧层时，才能提供单粒子闩锁保护¹。此外，抗辐射能力并非晶圆厂中的标准控制参数。批次之间钝化层厚度或化学计量配比的微小变化，都可能导致总电离剂量 (TID) 耐受能力的剧烈波动；一个批次也许能承受 100krad (Si)，而同一晶圆厂的另一批次在仅 10krad (Si) 下就失效了。因此，辐射批次验收测试 (RLAT) 对于任何用于航天的器件都至关重要。因此，可靠的认证需要一套全面的测试方案，包括用于单粒子效应 (SEE) 的重离子测试、位移损伤 (DD) 测试，以及表征累积剂量性能的总电离剂量 (TID) 测试。

极端温度是另一项重大挑战。航天器会经历大范围的温度波动，其设计需要覆盖约 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 的工作范围，才能实现稳定运行。这一范围远宽于典型的商用 (0°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$) 或汽车 3 级 (-40°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$) 标准。许多 COTS 和汽车级器件仅在其有限的商用限值内得到保证，因此必须在整个温度范围内对其进行评估，以确保在太空中的可靠性能。

锡须风险源于许多对成本敏感的 COTS 和汽车级器件上常见的纯锡 (Sn) 端子 (图 2-1)。在太空热机械应力的作用下，锡须会生长，导致相邻引脚间短路，或在锡须断裂并接触到其他电路时引发间歇性短路。尽管保形涂层能实现一定的缓解，但这些涂层并不能消除风险。因此，可靠的航天设计会避免使用纯锡镀层，而是采用锡铅合金、镍钯金 (Ni-Pd-Au) 镀层或抑制锡须形成的类似端子。

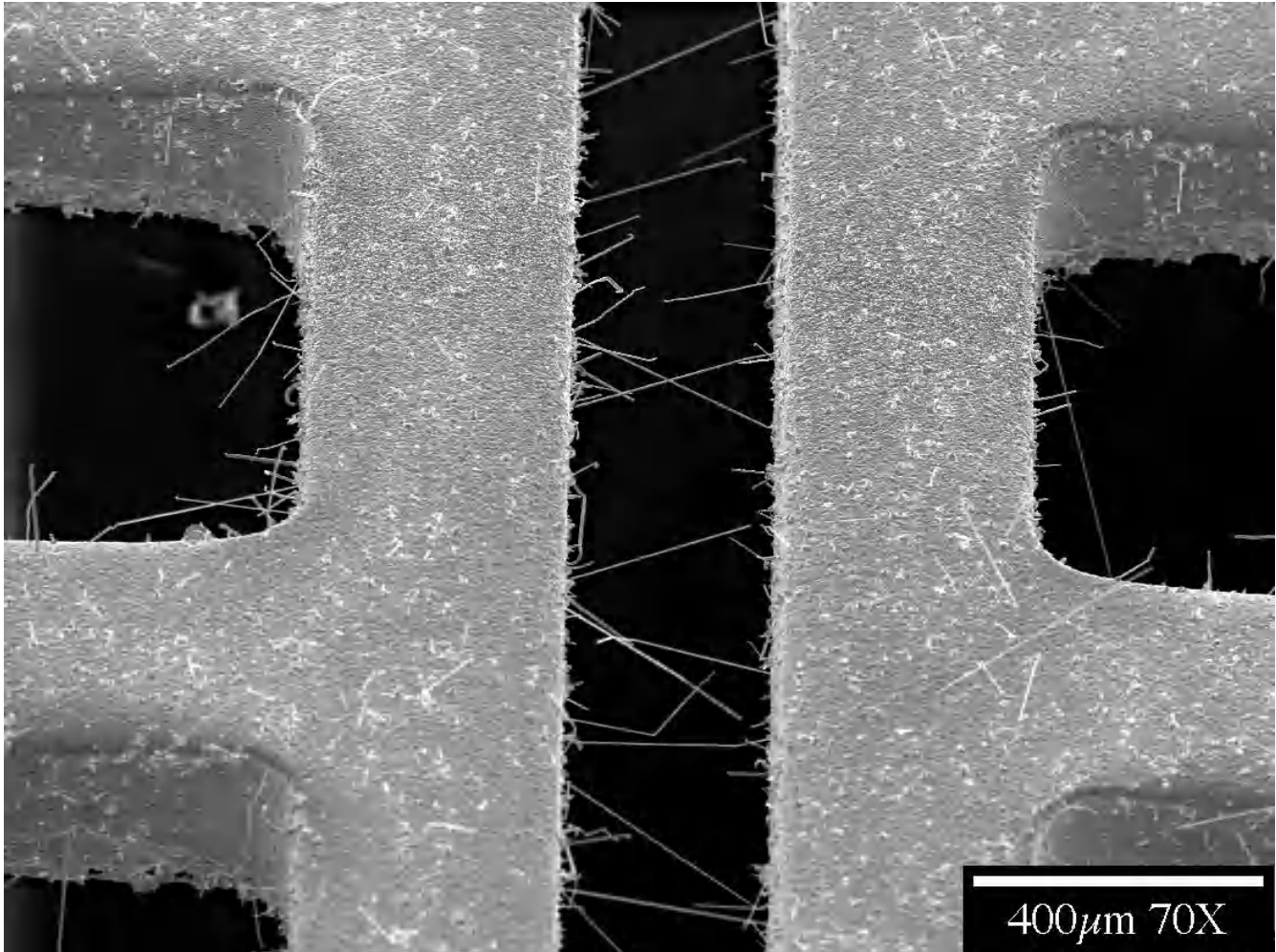


图 2-1. 锡须生长

键合线材料的考量同样会影响可靠性。首选金 (Au) 键合线，因为其温度系数低且耐腐蚀，在反复热循环下具有更好的性能。为降低成本，铜 (Cu) 键合线的使用日益增多，但这些线材需要更严格的工艺控制。铜线的温度系数较高，在快速温度循环 (LEO 中的常见情况) 中更容易出现颈缩断裂失效。在恶劣的太空环境中，金键合线仍是最大限度减少键合完整性失效的首选。

塑料释气与水分吸收也会带来更多隐患。塑封器件的封装材料通常是有机塑封料，在暴露于真空和极端温度时，这些材料既会吸收水分，又会释放出挥发性有机物质。吸收的水分会降低封装的介电强度，可能导致过早失效，而释出的污染物则可能凝结在附近元件上 (尤其是光学器件、图像传感器和高阻抗电路)，进而降低这些元件的性能和可靠性。

选用由低释气材料 (总质量损失 (TML) 低于 1%，收集的可凝挥发物 (CVCM) 低于 0.1%) 制成的封装，并使这些封装经受长时间烘烤和认证测试，可以缓解这些风险 (1)。

综上所述，这些考量构成了全面的危害分析总结。辐射危害 (TID、SEE 和 DD) 要求器件已针对特定工艺进行了表征，通过了 RLAT 验证，并可能需要辅以屏蔽或降额设计。极端温度要求元件额定工作范围为 $-55^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$ ，并在全温度范围内进行验证。锡须问题通过避免纯锡端子，转而采用合金或电镀层来解决。键合线可靠性则通过选用金线来保持，或者若使用铜线，则需执行严格的工艺控制和寿命测试。最后，释气和水分吸收问题通过选择低 TML 和 CVCMM 的塑封化合物，并执行适当的烘烤和认证程序来缓解。

这些通用考量因素构成了航天电子设计格局的基石，并为整个任务谱系 (从商业 LEO 星座到长寿命的 MEO、GEO 及深空探测器) 中的元件选择提供了指导，无论这些元件是经过升级筛选的 COTS，还是完全通过航天认证的元件。

3 单一受控基准的重要性

当为航天应用采购 COTS 或汽车级元件时，首选策略是从单一批次购入足够数量的物料。然而在实际中，制造商通常会将生产分散到多个晶圆厂和封装基地。每个晶圆厂可能使用略有不同的设备、工艺设置或材料配方，而每个封装厂可能采用不同的塑封料和键合线材料。只要器件在数据表规定限值内工作，这些差异通常不会对性能造成影响，但当超出这些限值时，尤其是在太空恶劣的辐射环境中，这些差异就可能变得至关重要。

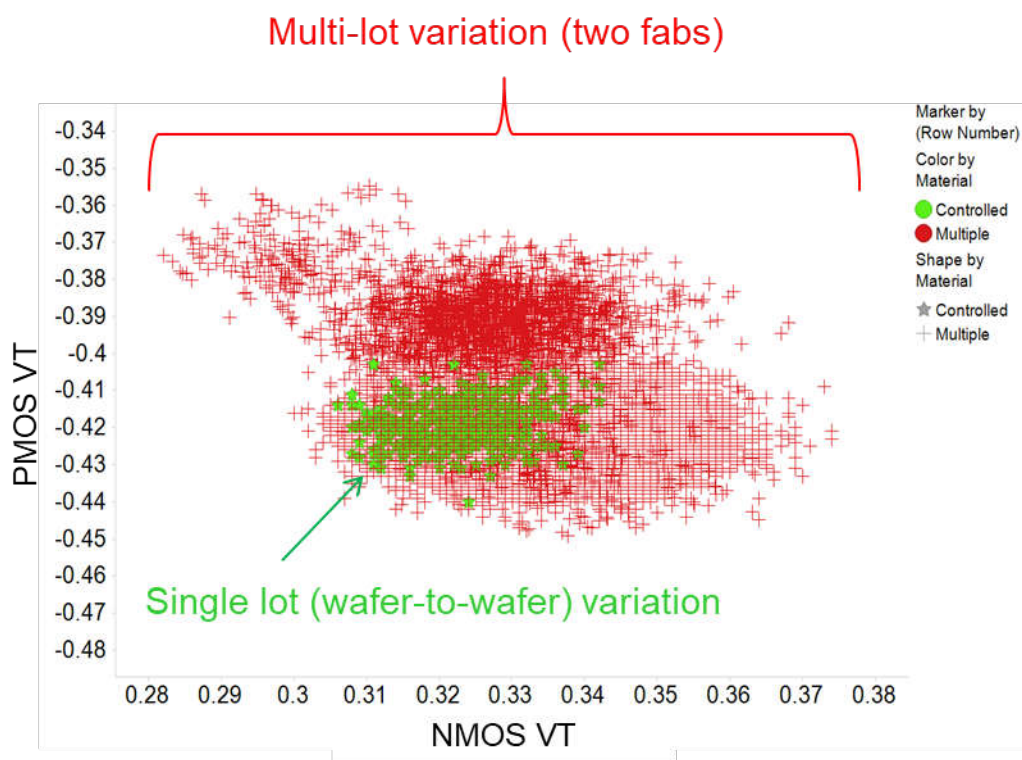


图 3-1. 跨多批次变化的晶体管电压阈值，连同预期的辐射 (TID) 漂移，可能严重危及单个设备在太空中的生命周期

如果一个航天项目采购的器件可能来自混合批次，那么该批次的认证或测试可能与实际发射时使用的批次存在差异，从而埋下隐性的可靠性风险。还有更棘手的情况，即已在飞行中被证明成功的设计，必须扩大规模以满足日益增长的需求。新生产批次可能引入工艺优化、不同的材料或旨在提高良率和降低成本的设计调整。这些变更可能恰好会削弱原始批次所表现出的抗辐射能力或可靠性，因此新批次可能不再能通过原先的认证。随着时间推移，这种风险会不断增加，因为供应商会持续改进工艺，而原有的飞行传承配置可能变得无法获取。其后果是，一个积累了多年飞行传承的元件、电路板或模块，如果无法再采购到完全相同的原始版本，就可能需要重新设计、重新认证或进行差异认证，从而使传承价值荡然无存。

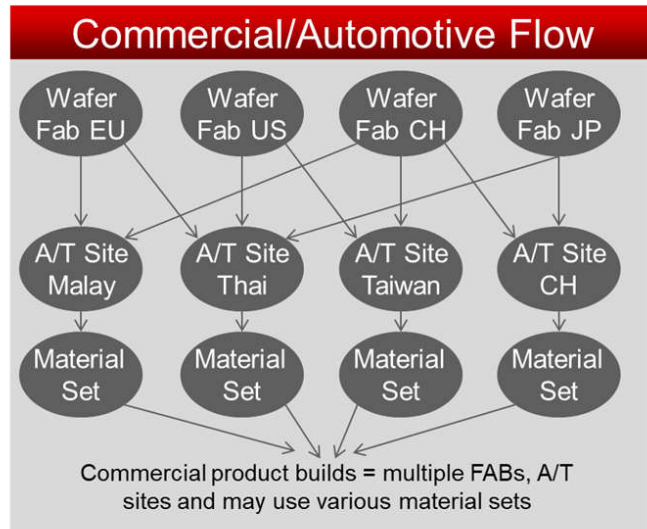
尤其是汽车级器件，其产量极高，且为提升良率和降低成本会频繁进行变更，往往需要多条制造途径来维持供应弹性。由于此类器件的持续演变，它们实际上更不适合被升级筛选用于航天应用，因为在这类应用中，制造过程的稳定性和可追溯性至关重要。上述风险可以通过两种途径之一来解决：要么投资于源自单一晶圆或单一批次的

有保证生产批次 (可能产生额外成本) , 要么基于生产具有同质性的假设而采购整卷元件, 从而接受其固有的风险。

Single Baseline Controlled Flow

Continuous optimization:

Yield, material usage, energy, cost ...



Holding the recipe:

Single baseline

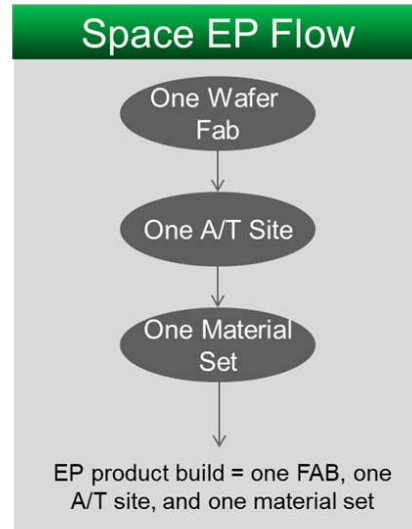


图 3-2. 包括航天 EP (SEP) 在内的 TI 航天级产品遵循单一基准受控流程

因此, 建立单一受控基准至关重要, 即通过固定晶圆厂、封装基地以及整套材料 (包括塑封料和键合线类型) , 并对每个新生产批次执行辐射批次验收测试 (RLAT), 以确保航天系统中使用的每个器件都与经过认证的样品一致, 从而在项目的整个生命周期中保持可靠性与传承。

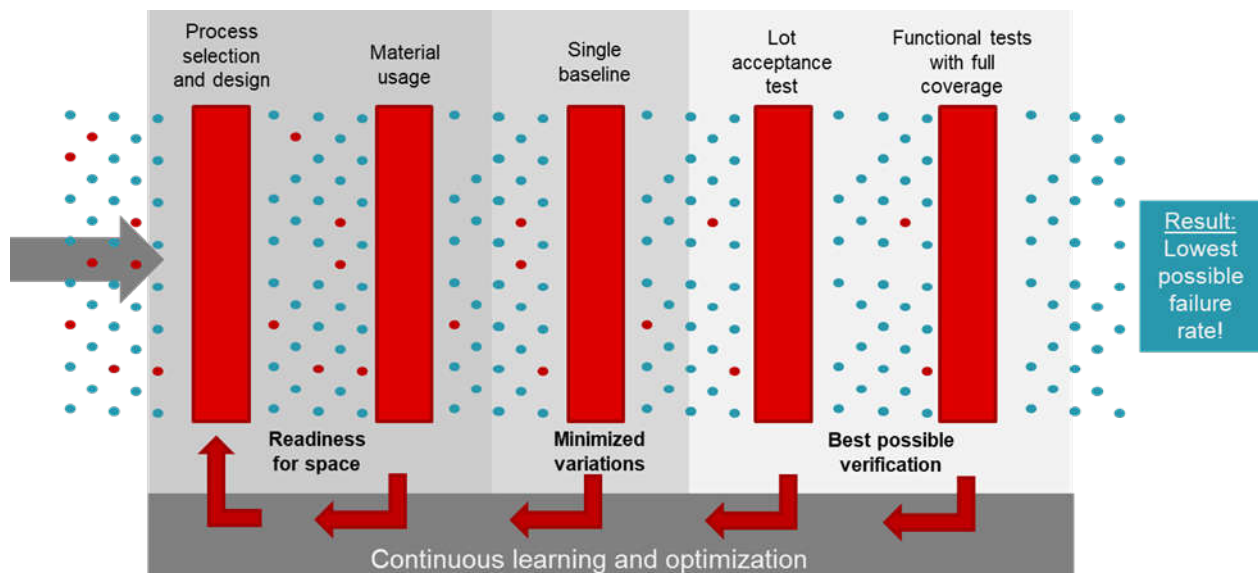


图 3-3. 质量保证 (QA) 是一个自下而上的系统性过程

4 对 COTS 器件进行升级筛选的步骤

尽管上述论点强烈支持使用航天级器件，但忽视对商用现货 (COTS) 器件进行升级筛选的可能性是不明智的。两大主要动机推动着对商用器件的航天飞行评估：

1. 单位成本
2. 在给定 SWaP-C 预算内的性能

随着航天领域越来越多地由私人资本资助，投资回报率 (ROI) 成为关键因素。选择最安全的方案，可能导致元件成本过高、重量过重、体积过大、功耗过高或性能不足，无法满足创新性新航天卫星项目的商业需求。

在此类情况下，升级筛选 COTS 器件可能是一种可行的替代方案。下一节将概述 TESAT 对复杂度较低的相对简单商用器件（如运算放大器、逻辑门或缓冲器）所进行的典型升级筛选活动。该节将提供一般性规则，帮助设计人员理解这些活动的相关典型成本、进度和残余风险，这些知识源自 TESAT 对 200 多种商用/AEC-Q 器件进行航天应用评估所获得的经验。

4.1 第 1 步 — 确定候选器件

TESAT 建议为特定功能选择相对较多的候选器件，通常为五个。基于任务参数（辐射环境、持续时间、轨道以及可接受的残余风险），TESAT 充分利用其评估技术节点以及其他影响整体成功概率的因素的经验。平均而言，在这个初始阶段约有 10% 的候选器件被淘汰，剩下四到五个器件进入测试阶段。

4.2 第 2 步 - 准备单粒子效应 (SEE) 测试 (开帽)

SEE 测试的目的是查明器件被单个粒子撞击时的反应，例如太空中的重离子或质子、地球上的中子，或是封装材料发出的 α 粒子。

SEE 测试通常在能产生高能重离子或质子的加速器设施中进行。被测器件 (DUT) 在其正常工作偏置和功能条件下加电并运行。测试期间，会持续监测电源电流和输出状态等关键参数。当 DUT 暴露于离子或质子束中时，任何电流或输出的瞬态变化都会被记录下来。

对于航天应用而言，重离子辐射下的性能是一个主要关注点。如果一个器件对低能重离子敏感，那么该器件很可能也对高能质子敏感。因此，航天认证项目通常采用重离子或质子束。出于研究目的，也可使用其他局部电荷注入源，例如脉冲激光器。

在重离子测试中，将 DUT 直接置于离子束中，并实时观察 DUT 运行状况。离子束由粒子加速器（例如回旋加速器或范德格拉夫起电机）产生。在轨道上，重离子可能具有足够能量穿透封装的 IC 以及任何存在的屏蔽层。然而，大多数测试设施只能提供足以穿透 $40\mu\text{m} - 400\mu\text{m}$ 硅的离子能量，这不足以穿过完全密封的封装。因此，必须打开封装露出裸片，同时保持器件功能正常。

露出裸片的典型方法包括：

- 喷射蚀刻或选择性化学蚀刻。
- 预减薄至接近可见层。
- 针对三维结构的混合方法（结合蚀刻与减薄）。
- 倒装芯片准备：裸片表面朝下，必须将芯片背面露出并减薄至足够薄，以便离子束能够到达器件正面的有源区。

表 4-1. 准备 SEE 测试时露出裸片的典型方法

方法	说明	典型适用性
喷射蚀刻 选择性化学蚀刻	局部去除封装材料以露出裸片	广泛用于小裸片、少引脚器件
预减薄	测试前将封装减薄至几微米	适用于薄膜或 MEMS 器件
混合方法	针对 3D 结构的蚀刻与减薄结合方法	堆叠式或异构 IC 需要
倒装芯片准备	去除基板并将裸片直接键合到测试板上	用于高性能或多引脚器件

每种技术都需要特定的专业知识；在某些情况下，某种方法并不适用，器件架构（例如采用 3D 堆叠）有时根本无法在保持功能的同时露出裸片。TESAT 报告称，迄今为止检查的候选器件中约有 10% 因这一原因被舍弃。下方图 4-1 展示了一个已开帽器件的示例。

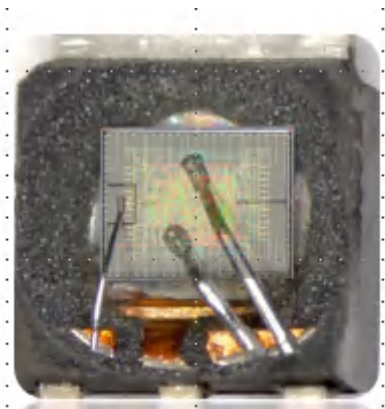


图 4-1. 露出裸片远非一项简单的任务

4.3 第 3 步 — 单粒子效应 (SEE) 测试

在 60MeV 条件下的实际 SEE 测试中，典型的淘汰分布为：

- 剩余候选器件中约 25% 彻底失效。
- 约 50% 通过但带有约束条件（例如，电压受限、温度范围受限、漂移等）。
- 约 25% 通过且无任何约束条件，通常最初假定的五个候选器件中留下三个进入进一步评估。

备注

功率 FET 或一般功率器件的成功概率显著较低。

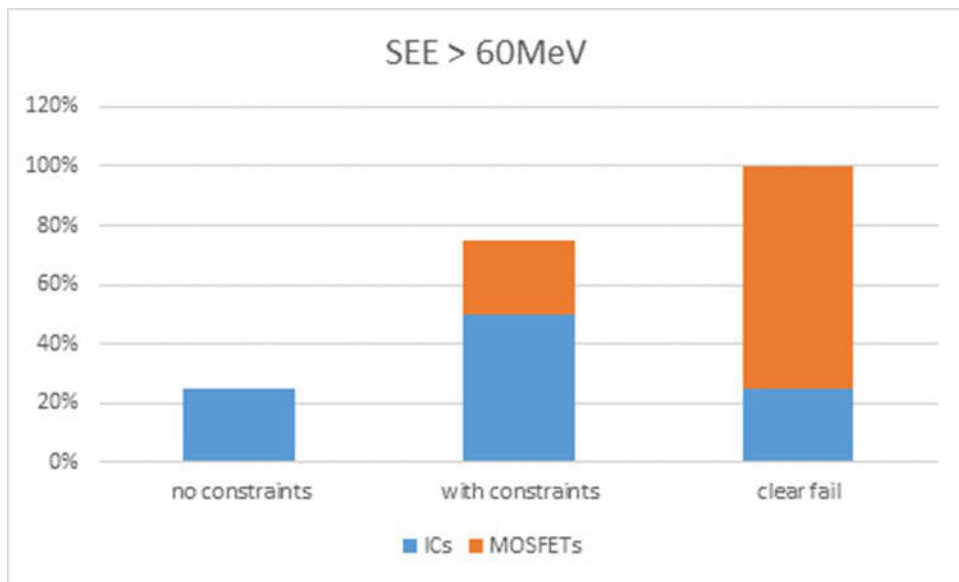


图 4-2. 功率 FET (MOSFET) 或一般功率器件的成功概率显著较低

此外，诸如 MCU 或 ADC 等复杂的 IC，由于配置选项众多，需要精密的测试软件。在实际操作中，必须在开发全面测试项目所投入的精力与测试覆盖不完全所导致的时间和残余风险之间做出权衡。通常，测试项目最终会具有较强的用例针对性，因此如果希望将测试结果应用于未来的设计和用例，需要牢记这一点。

4.4 第 4 步 — 执行 TID 测试并评估辐射寿命

下一步是评估器件在轨期间预计累积的总电离剂量 (TID) 效应。TESAT 的客户通常要求最低耐受剂量为 15krad 至 30krad，并且这些客户还想知道关键器件参数在多大剂量下会完全失效。

一般而言，大约另有 25% 的候选器件无法通过此测试。

总体而言，如表 4-2 所总结的，TESAT 估计非功率、较低复杂度器件的成功率约为 40%，但通常带有显著的降额要求。

表 4-2. TESAT 观察到的非功率、较低复杂度 IC 的典型成功率

基于经验的典型成功率 - 5 颗候选 IC		
步骤	典型成功率	剩余候选器件数
技术评估	90%	4
开帽	90%	4
SEE	75%	3
TID	75%	2
其他 (T&C, 商用等)	95%	2
总计	43%	2/5

成功执行这些测试活动需要充足的资金和时间投入。决策者必须预计到项目周期约为 20 周。总投资水平因专用测试设备、定制适配器和必要工具的可用性而波动。为降低这些成本并加快测试吞吐量，强烈建议利用自动化测试站，例如 TESAT 中实施的测试站。这些系统能够实现并行元件测试，在大规模升级筛选阶段可提供显著的可扩展性和效率优势。与采购单价高昂的航天级器件相比，升级筛选的盈亏平衡点大约在 1,000 件左右。在航天市场，这已属于相对较大的数量，因此 TESAT 和 TI 均建议在启动筛选活动之前与供应商洽谈定价。对于诸如星座等包含多颗相同卫星的太空基础设施项目尤为如此，因为航天工业正努力向批量生产方式迈进，其数量规模正接近上述器件数量。

航天设备制造商如欲了解更多元件升级筛选或 EEE (电气、电子和机电) 器件服务详情，请访问 [TESAT 器件代理商网站](#)。

[TESAT CAMPUS](#) 现场培训由 TESAT 资深工程和 EEE 专家主讲，会带来更深入的见解。

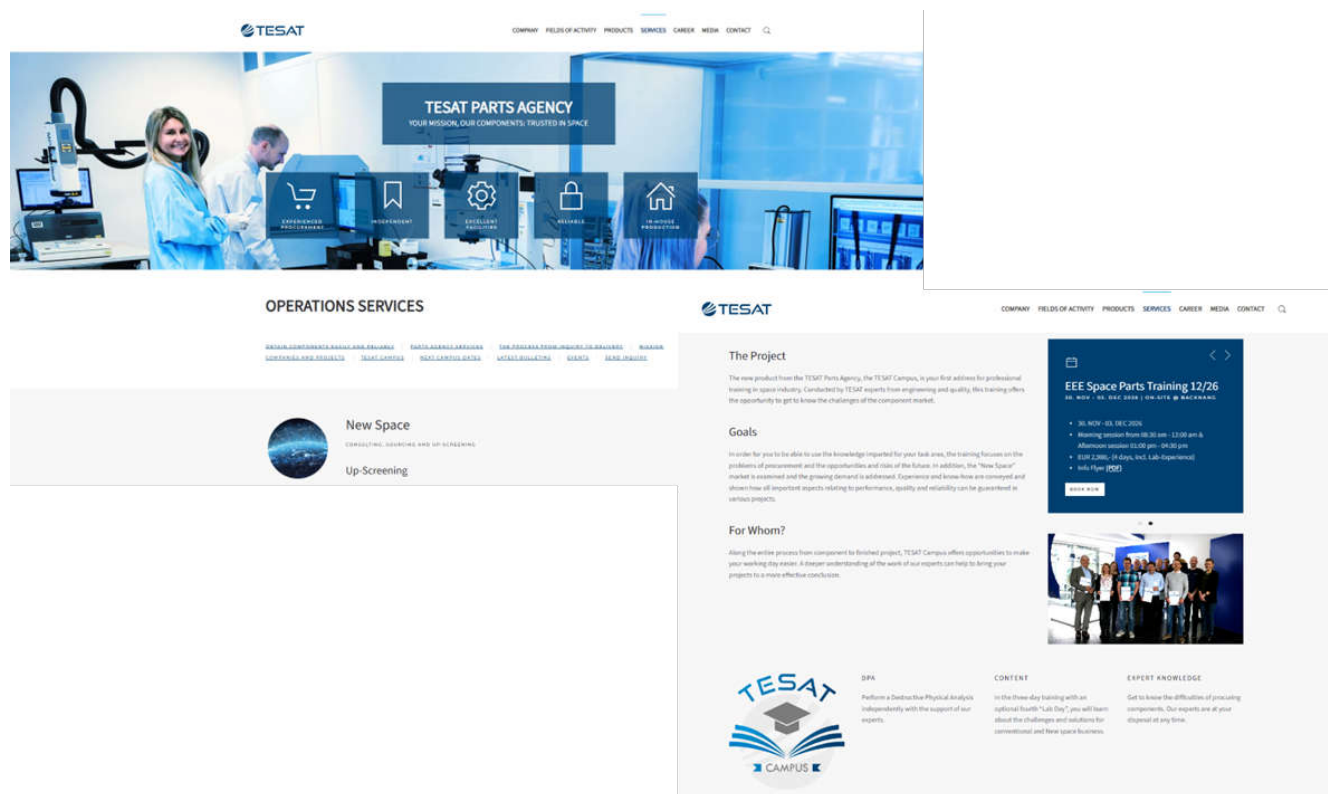


图 4-3. 有关元件升级筛选或 EEE (电气、电子和机电) 器件服务的更多详情和见解，请访问 TESAT 网页

5 交货周期与良率责任

另一个关键因素是所需航天级器件的交货周期。高可靠性 (HiRel) 器件可能具有漫长的采购周期。为缓解此问题，TI 保有一定数量的航天级元件缓冲库存，并在 TI 在线商店上实时显示库存水平。客户可以确认供货情况并在项目

早期预留器件。如果显示无库存，TI 鼓励客户联系公司，获取关于后续补货的信息。或者，客户可以咨询 TESAT 等器件代理商，这些机构与 TI 保持着直接联系。

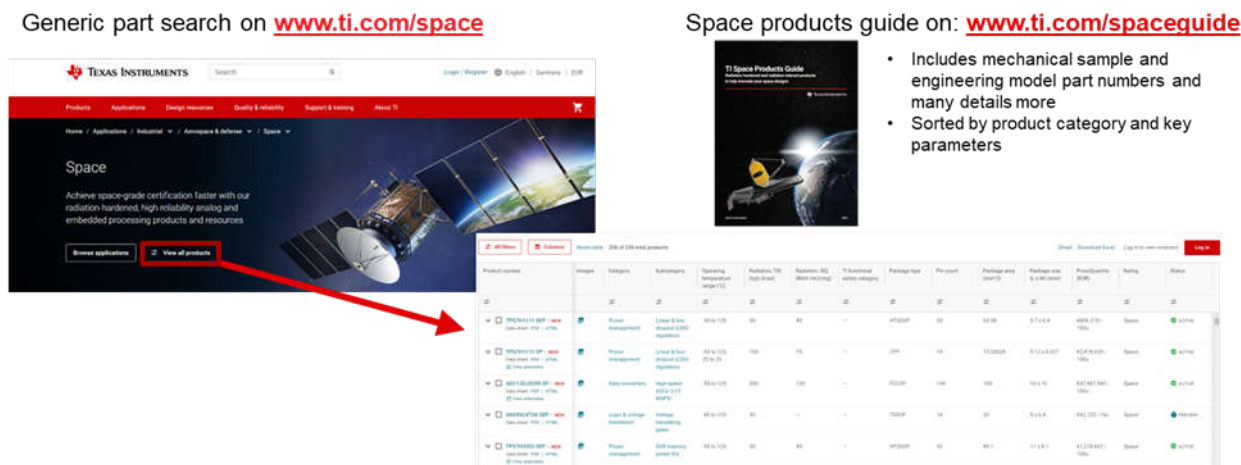


图 5-1. 在 TI.com 上查找航天认证器件，包括所有文档、报告、价格指示和库存水平

对于升级筛选活动，设计工程师还必须对良率负责。在实际操作中，这意味着要预测两个变量：

- 项目所需的器件总数。
- 这些器件中能够通过筛选测试的比例。

准确的预测至关重要，因为任何短缺都会直接影响进度和成本。

对 COTS 器件进行升级筛选总是伴随着多维的风险与机遇；风险必须谨慎管理，而机遇则必须在设计和制造的每一步进行充分权衡，因为每一步都会消耗宝贵的资源。为应对这些挑战，TI 不仅提供了完全合规（满足美国国防后勤局 (DLA) QML-V-RHA 标准）的抗辐射加固器件，还提供了一系列航天增强型产品 (SEP)。SEP 器件（以后缀 -SEP 标识）在成本与残余风险之间实现了平衡，使设计人员能够满足典型的 LEO 卫星任务需求，而无需承受筛选活动带来的漫长交货周期和不确定性。业界通常将这一质量等级归类为耐辐射。因此，当有可用的耐辐射器件满足所有技术和环境要求，且该器件在商业上可行时，它通常是首选方案。

6 总结

对半导体产品进行航天飞行认证是一项极为复杂的工作。在决策时，应充分利用您的器件代理商和半导体制造商的专业知识，因为升级筛选的元件与目录中的航天级器件可以有效互补。

当强烈的技术或商业驱动力要求进行升级筛选时，请务必注意相关风险并采取积极主动的立场：

- 监测参数漂移、良率，并及时评估额外的器件甚至整个批次。
- 认识到您自身有责任保证质量。
- 力求采用最高效的升级筛选方法。
- 与 **EEE** 专家（例如 **TESAT** 器件代理商）展开对话，获取元件服务，以量身定制符合您特定项目和质量需求的采购策略。

只要存在合适的航天级器件，该器件通常就是首选。航天级器件具有多项优势：

- 久经考验、自下而上的质量保证。
- 可重复订购并复用于未来设计。
- 长期的工艺稳定性，随着时间累积飞行传承。

如果成本是关注点，尤其是在数量较大（1,000 件以上）时，请与德州仪器 (TI) 等供应商展开对话，探讨定价方案。

请记住：质量无法通过测试来赋予器件（Staerk，2000 年）。

7 参考资料

1. Deming, W. E. (2018 年)。 *Out of the Crisis* (Kindle 版)。麻省理工学院出版社。(原著于 1982 年出版)。
2. Kruckmeyer, Kirby , (2022 年)。 [借助增强型航天塑料产品降低近地轨道任务的风险](#)应用手册，德州仪器 (TI)。
3. Kuechen, Frederik and Seidl, Michael (2025 年)。 [IC Sourcing for Space: How to Cut Costs Without Cutting Corners](#) ON24 Webinar。
4. Staerk, Daniela Dr. (2000 年)。TESAT 的 EEE 事项及相关技术首席工程师，参考 W. Edwards Deming。 *Out of the Crisis* - 第 2 版，Kindle 版。麻省理工学院出版社。
5. 德州仪器 (TI)， (2019 年)。 [电子产品辐射手册](#)，电子书 (通过 TI myTI™ 在线信息服务帐户 ID 访问)。
6. 纽约州立大学布法罗分校 (2019 年)。 [Figure 1: Matte-tin-plated-IC-02 photograph](#)，照片由 Peter Bush 提供， [NASA 基本信息/常见问题解答网页](#)。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月