

Kirby Kruckmeyer

摘要

一直以来，卫星计划使用航天级、密封封装、经 QML-V 认证的元件来提高可靠性和耐辐射性。随着发射的用于新商业和政府计划的星座和近地轨道卫星越来越多，人们越来越需要满足严格预算的更小型元件。因此，出于各种原因，人们对在太空中使用塑料封装的微电路 (PEM) 产生了更浓厚的兴趣。PEM 变得更具吸引力，因为前沿产品不符合航天标准，而且 PEM 通常具有更小的尺寸且比航天级产品使用的陶瓷封装更轻。人们已经认识到，使用现成的商用 (COTS) 产品存在质量和可靠性风险，一些太空计划一直在研究使用具有更严格鉴定要求的汽车级 AEC-Q100 产品。但是，Q100 器件中的额外鉴定步骤并不能满足航天应用的所有要求，即使对于那些要求降低的航天应用也是如此。例如，预计使用寿命为三年的商业近地轨道 (LEO) 应用仍然必须满足许多 PEM 产品无法承受的辐射目标。卫星计划的主要挑战之一是找到并测试那些可满足辐射目标的产品。

尽管辐射性能可能是在太空中使用某些 COTS 或汽车产品的主要障碍，但还有许多其他风险和因素需要考虑，例如锡晶须、铜键合线、额定温度范围和封装释气。事实证明，寻找能够承受恶劣太空环境的器件既费时又具有挑战性。

除了德州仪器 (TI) 用于常规和高风险航天任务的全系列抗辐射 QML-V 产品外，TI 还推出了采用 PEM 封装的耐辐射增强型航天塑料 (Space EP) 产品系列，用于降低使用 PEM 执行要求较低任务的风险。Space EP 产品具有以下特征：

- 单粒子门锁 (SEL) 的抗扰度为 $43\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ ，且某些元件（例如电源管理）具有额外的破坏性单粒子效应和单粒子瞬变特性。每个产品都在最大工作电压和 125°C 下进行测试。
- 在 30 至 $50\text{krad}(\text{Si})$ 的条件下无 ELDRS。每个双极和 BiCMOS 产品都以 $10\text{mrad}(\text{Si})/\text{s}$ 的低剂量率 (LDR) 进行 ELDRS 表征。
- 20 至 $50\text{krad}(\text{Si})$ 的辐射批次验收测试 (RLAT)。每个晶圆批次都经过测试并符合 $20\text{krad}(\text{Si})$ 的要求，同时提供 RLAT 报告。具有更高 TID 特征值的器件通常可以确保具有相同的 RLAT 级别。
- 一些元件也报告有中子置换损坏
- 军用级温度范围： -55°C 至 $+125^\circ\text{C}$ 。
- 无铜键合线。所有产品都有金键合线。
- 无雾锡。引线镀层是 NiPdAu 或其他不含纯锡的镀层。
- 采用增强型塑封实现低释气。
- 每个组装批次都经过扩展鉴定，包括 HAST 和温度循环。
- 100% 温度循环。每个器件都接受温度循环或等效测试。
- 单一生产流程。一个晶圆厂和组装场地，尽可能减少批次间的差异。
- 较长的产品生命周期。
- 每个产品在 DLA 网站上都有自己的供应商项目图 (VID)。

本应用手册讨论了在航天应用中使用 PEM 的风险以及 TI 的 Space EP 产品如何应对这些风险。

内容

1 辐射挑战.....	3
2 温度范围.....	3
3 锡晶须.....	3
4 铜线风险.....	3
5 塑料释气和吸湿.....	4
6 恶劣环境鉴定.....	4
7 多个制造工厂.....	5
8 较长的生命周期.....	5
9 VID - 供应商项目图.....	5
10 结论.....	6
11 修订历史记录.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 辐射挑战

不同的半导体技术具有不同的固有辐射容限（有关详细信息，请参阅 [TI 的电子产品辐射手册](#)）。同时，使用相同工艺技术或节点的两种产品，由于产品的设计方式和工艺使用模块的不同，可能具有完全不同的辐射响应。因此，客户需要花费时间和资源来评估这些器件的可靠性和辐射性能。为了缩短开发时间，德州仪器 (TI) 的 Space EP 产品提供了广泛的辐射特性，以满足 LEO 任务的要求。

此外，辐射耐受性不能一概而论，并非适用于所有情况。65nm 工艺可能不受 SEL 的影响，但仅适用于 1.1V 电路。如果产品使用电压更高的电路，它更有可能有 SEL。具有 EPI 或 SOI 基板并不一定意味着 CMOS 产品对 SEL 抗扰。对于大多数 CMOS 产品，使用 EPI 基板对 SEL 敏感性没有影响，并且 SOI 仅在场氧化物 (STI) 通过有源层到达埋氧层时才能确保 SEL 抗扰度。

TI 等供应商了解其产品所使用的流程。使用这些信息，TI 可以选择可能具有较高耐辐射性的产品，并且经常通过工艺或设计更改来满足辐射目标。选择器件后，TI 会通过重离子、中子置换损伤 (NDD) 和总电离剂量 (TID) 测试来验证所选方案。

TI 的 Space EP 流程也遵循单一生产流程，并提供辐射批次验收测试 (RLAT)，以降低批次间产生差异的风险。大多数晶圆厂没有针对辐射耐受性的监控器或控制装置。现代晶圆厂保持非常严格的控制以确保一致的电气性能，但控制的参数与影响辐射耐受性的参数不同。例如，钝化层的化学计量和厚度对电气性能几乎没有影响，但在辐射耐受性方面会有很大变化。在极端的情况下，有一个产品的一个批次通过了 100krad(Si)，而一个月后在同一晶圆厂加工的批次仅通过了 10krad(Si)。因此，辐射批次验收测试 (RLAT) 非常重要。

客户可以使用德州仪器 (TI) 的 Space EP 产品进行设计，以帮助将新的航天系统更快地推向市场，并确保这些系统满足 LEO 任务的辐射要求。每个器件都预先进行了辐射测试，并在产品文件夹中包含的单独辐射报告中提供了 TID、SEE 和通常的 NDD 特性。为了提高辐射可靠性，Space EP 产品仅使用一个生产流程，并且每批都获得 RLAT，从而消除了批次间产生差异的风险。

2 温度范围

卫星经常在太空中经历极热和极冷的温度范围。为了确保该环境下电路电气性能的可靠性，TI 的 Space EP 产品具有 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 的温度范围，并通过了电气参数测试，确保可在这些条件下运行。商业级温度范围通常为 0°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 。对于汽车产品，共有几个额定温度范围，常见的是 -40°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$ 的 3 级。虽然一些 COTS 和汽车产品可能会在额定温度之外运行，但许多其他产品则不然。有必要在应用的极端温度下测试产品，以确定 COTS 或汽车产品是否可以正常工作。

3 锡晶须

许多商业和汽车产品现在使用纯锡 (Sn) 作为铅涂层或作为球栅阵列 (BGA) 中焊球的主要成分，以实现低成本、对生态友好的解决方案。

现在普遍用于 COTS 和 AEC-Q100 PEM 的雾锡镀层存在风险，在恶劣的条件下可能会长出足够长的晶须，从而在两条金属引线之间造成短路。此外，这些晶须可能会折断，从而导致模块中其他位置的电气短路。为了降低这种故障风险，TI 的 Space EP 流程选择不使用任何纯锡终端。保形涂层并非一个完整的解决方案，因为它只是部分地延缓了晶须的生长，而且晶须仍然可以通过涂层生长。许多卫星故障都是锡晶须造成的。

TI 的解决方案是不使用纯锡终端。TI 的 Space EP 产品采用的终端是 Sn63Pb37 浸焊、NiPdAu 电镀或类似表面处理，没有哑光锡。对于 BGA，TI Space EP 产品使用 Sn63Pb37 焊球。

4 铜线风险

LEO 卫星在每天绕地球多次运行时，热循环问题尤为突出。TI 的 Space EP 产品使用金键合线代替商业和汽车 AEC-Q100 产品中常见的经典铜 (Cu) 键合线，旨在降低潜在风险。

为了节省成本，越来越多的 COTS 产品正在从金 (Au) 键合线转换为铜 (Cu) 键合线。现在，甚至是汽车 AEC-Q100 产品都支持使用铜键合线。在某些产品上，供应商可以决定使用 Au 或 Cu 键合线，但通常基于可用的 Cu 键合能力。很多时候，客户并不知道在任何给定批次上使用的是哪种键合线材料。

尽管铜键合工艺和铜键合线的可靠性不断提高，但仍存在潜在风险，尤其是在恶劣环境应用中。铜线键合需要更严格的工艺控制，否则会导致键合完整性和可靠性问题。由于与塑封材料的相互作用，会发生零星的铜线腐蚀。在某些情况下，当出现封装分层时，Cu 键合线/引线框架界面会出现腐蚀。在恶劣环境中，最令人担忧的可能是铜

线的温度系数高于金线，使其在热循环期间更容易受到键颈断裂的影响。这一点在某些 LEO 应用中可能至关重要，在这些应用中，卫星每天可能会经历数次极端温度循环。

5 塑料释气和吸湿

将 PEM 用于空间系统的一个常见问题是封装材料是一种有机模塑料，它会吸收水分并释放有机化合物。吸湿有可能降低产品的可靠性或者缩短使用寿命。对组分释气会在其他元件上产生凝结，将这些元件污染并影响其性能。这是传感器（例如成像传感器）的主要问题。

半导体行业根据产品类型、封装尺寸和架构、应用以及装配现场可用的模塑料使用许多不同的模塑料。不同的模塑料具有不同的湿敏等级和释气性。

TI 的 Space EP 产品使用增强型模塑料并通过了扩展的鉴定测试，超出了 AEC-Q100 对汽车产品的要求。

Space EP 产品上使用的模塑料超过了 NASA 在 ASTM E-495 中对总质量损失 (TML) 低于 1.0% 和收集的挥发性可冷凝材料 (CVCM) 低于 0.1% 的释气要求。

6 恶劣环境鉴定

COT 和汽车产品没有针对太空飞行的恶劣条件进行测试或鉴定，例如发射期间的高 G 力或在 LEO 任务中每天多次经历的直到极端温度的温度循环。

每个 TI Space EP 组装批次都经过扩展鉴定。组装批次鉴定测试包括在 130°C 和 85% 湿度下持续 192 小时的高度加速应力测试 (HAST)、在 -65°C 至 +150°C 之间进行 500 次的温度循环以及湿度水平敏感性 (MSL) 预处理测试，然后是超声显微镜 (CSAM)。确保正确包装的样品检查包括在模具工艺之前的引线键合后目视检查以及包装后目视和 X 射线检查。

封装后，每个 Space EP 单元都会在电气测试之前接受温度循环（20 个循环）或类似的回流应力。这种扩展鉴定旨在确保器件在恶劣太空环境中的性能和可靠性，超出了典型商业和汽车组件的鉴定范围。

7 多个制造工厂

为了实现制造灵活性，COTS 产品可能在几个不同的晶圆厂中生产。每个晶圆厂的设备和工艺可能略有不同。只要产品在数据表的参数范围内使用，晶圆厂的差异就不会影响产品的性能。这些差异可能会影响器件在超出额定参数运行时的性能，并可能显著影响产品的辐射性能。

同样，COTS 或汽车产品可以在多个组装场地进行组装，这些地点会使用不同的模具化合物和键合线。如前所述，当在超出额定性能的恶劣环境中使用器件时，这些差异可能会对产品可靠性产生重大影响。通常，客户无法选择产品制造工厂。

对于 TI Space EP 产品，每个产品只使用一个生产流程、一个晶圆厂和一个组装场地。这大大减少了批次间的差异。

8 较长的生命周期

在 COTS 产品中进行设计所面临的一个风险是，一些 COTS 产品的生命周期很短，并且已经过时而且难以在未来的航天器建造中获得。

德州仪器 (TI) 拥有通过长生命周期产品支持军用/航空工业的历史。TI 继续提供 50 多年前首次发布的军用和航天级产品。

9 VID - 供应商项目图

每个 Space EP 产品都有自己的 VID，由美国国防部的国防后勤局 (DLA) - 陆地和海上司令部负责维护。VID 可在 DLA 网站上下载，其访问不受限制。VID 类似于用于 QML-V 空间合格产品的 SMD，确保实现 Space EP 产品的制造、鉴定和测试标准化。可在 ti.com 上的 TI 数据表和产品页面中找到指向 VID 的链接。

10 结论

太空环境恶劣，因此需要坚固可靠的集成电路。虽然一些 COTS 和 Q100 器件可能满足辐射要求，但事实证明这些器件的鉴定既昂贵又耗时。尽管辐射可靠性是首要关注点，但在证明产品在太空中的可靠性时，仍存在许多其他风险和不确定性。

TI 发布了增强型航天塑料 (Space EP) 系列产品，可消除升级筛选的不确定性并节省成本，同时缩短了设计周期。客户可以利用 Space EP 产品提供的详细辐射报告和增强的质量流程，Space EP 产品经证明可以满足 LEO 卫星的任务要求。Space EP 产品可以在 ti.com 的产品页面上通过后缀“-SEP”找到，也可以在数据表中了解。

对于需要更严格的辐射和可靠性要求的高风险太空任务，TI 还提供经全面鉴定的 QMLV 系列航天产品，其中 TID 水平高达 300 krad(Si)、SEL 和 SEFI 抗扰度高达 120MeVcm²/mg 并具有全面的 SEE 表征。

只需在浏览器中输入 ti.com/space，即可随时找到有关 TI 航天产品选项的更多信息。

11 修订历史记录

Changes from Revision * (July 2019) to Revision A (September 2022)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 删除了 NewSpace.....	1
• 使用新信息更新了整个出版物.....	1

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司