

摘要

本应用报告详细介绍了 TI 的 BAW 技术，将 BAW 谐振器与振荡器电路集成以形成独立振荡器，以及使用 BAW 振荡器相对于石英晶体振荡器的优势。BAW 振荡器相对于石英晶体振荡器的主要优势包括：灵活性更高、温度稳定性更高、抖动性能提升、电源噪声抗扰度增强、振动稳定性和冲击性能显著提高。

内容

1 引言.....	2
2 BAW 技术概述.....	2
3 BAW 振荡器集成.....	2
4 晶体振荡器.....	3
5 LMK6C/D/P/H BAW 振荡器与石英晶体振荡器的比较汇总.....	4
5.1 灵活性.....	4
5.2 温度稳定性.....	5
5.3 相位噪声性能.....	5
5.4 电源噪声抗扰度.....	6
5.5 机械稳健性.....	7
6 结论.....	9

插图清单

图 3-1. BAW 和基础芯片集成.....	2
图 3-2. LMK6C/D/P/H BAW 振荡器方框图.....	3
图 4-1. SPXO 晶体振荡器方框图.....	3
图 4-2. 具有 PLL 的晶体振荡器方框图.....	3
图 5-1. BAW 振荡器频率在温度范围内的稳定性.....	5
图 5-2. LMK6P/D/H BAW 振荡器差分相位噪声性能 (标准化)	5
图 5-3. LMK6C BAW 振荡器单端相位噪声性能 (标准化)	6
图 5-4. 1500g 时的 LMKD/P/H 冲击效应.....	7
图 5-5. 1500g 时的 LMK6C 冲击效应.....	8
图 5-6. LMK6C/D/P/H BAW 振荡器与石英晶体振荡器的振动灵敏度比较.....	8
图 5-7. LMK6P/D/H 差分老化.....	9
图 5-8. LMK6C 单端老化.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

自 20 世纪 20 年代发明以来，石英晶体振荡器 (XO) 已主导时序基准市场长达一个多世纪。这些晶体振荡器已广泛应用于各种产品，包括低端 (实时时钟) 和高端 (复杂无线电、GPS 和军事/航空) 应用。在过去的几十年中，移动通信和新兴物联网 (IoT) 市场推动探索一种全新的谐振器技术：不仅要功耗更低、外形尺寸更小、易于集成，还要具有与石英晶体类似或更好的性能。在过去十年中，少数采用不同类型微谐振器技术的独立振荡器产品已推向消费市场。德州仪器 (TI) 从 2012 年开始自行开发体声波 (BAW) 谐振器技术，旨在用于高级计时应用，并从 2018 年以来发布了一些系统产品，包括性能出色的抖动清除器 (LMK05318 系列) 和全球较早的商用无晶体 BLE 无线电产品 (CC2652RB 系列)。借助这些器件的大规模生产经验，TI 现在推出了基于 BAW 的独立振荡器产品。

2 BAW 技术概述

TI BAW 谐振器技术可利用压电式转换在 2.5GHz 频率下产生高 Q 值谐振。谐振器是一个由顶部和底部电极覆盖的四边形区域。交替的高、低噪声阻抗层会在谐振体下方形成声镜，防止声能泄漏到基板中。此外，这些声镜还放置在谐振器堆叠的顶部，保护器件免受污染，并更大限度地减少泄漏到封装材料中的能量。这款独特的双布拉格声波谐振器 (DBAR) 可实现高效激励，无需在其周围制造成本高昂的真空腔。因此，TI BAW 谐振器不受由表面吸附污染物导致的频率变化的影响，可以直接放置在非密封塑料封装中，而振荡器电路则采用标准振荡器尺寸 (3.2mm × 2.5mm 和 2.5mm × 2.0mm)。

3 BAW 振荡器集成

LMK6C/D/P/H 包含 BAW 谐振器、分数输出分频器 (FOD) 和输出驱动器，它们共同生成预编程的输出频率。内部的精密温度传感器持续监测振荡频率随温度的变化，然后将其输入到频率控制逻辑块。此频率控制逻辑块可在内部执行频率校准，以便在整个温度范围内和老化过程中将输出频率保持在 $\pm 25\text{ppm}$ 以内。输出驱动器能够提供单端 LVCMOS 和差分 LVPECL、LVDS 和 HCSL 输出格式。该器件还包含可降低电源噪声的内部 LDO，从而实现低噪声时钟输出。

图 3-1 显示了在模塑前集成的 BAW 振荡器。BAW 振荡器包含一个基础芯片，其中包括额外的 IC 电路，例如 FOD、LDO 和温度传感器以及 BAW 谐振器芯片。WLP (Wafer-Level Package) 用于提高器件的抗振性和抗冲击性，并实现更可靠的应力隔离。

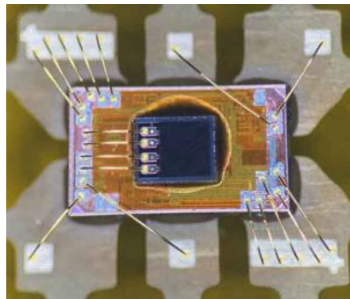


图 3-1. BAW 和基础芯片集成

最后形成一个简单的 4 引脚 (单端 LVCMOS) 或 6 引脚 (差分、LVPECL、LVDS、HCSL) 业界通用 3.2mm × 2.5mm 或 2.5mm × 2.0mm 封装, 这些封装与允许直接替换的备选器件引脚对引脚兼容。

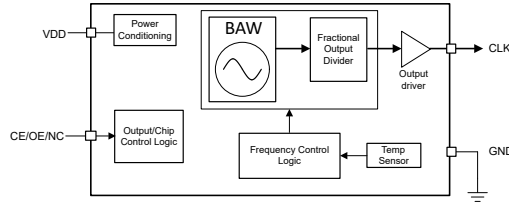


图 3-2. LMK6C/D/P/H BAW 振荡器方框图

4 晶体振荡器

石英谐振器可以采用两种不同的集成方法, 组成独立的振荡器器件; 每种方法都有各自的优缺点。第一种方法是将晶体谐振器与振荡电路相结合, 只添加输出驱动器即可支持不同的输出类型 - 这通常称为 SPXO, 即简单封装振荡器。

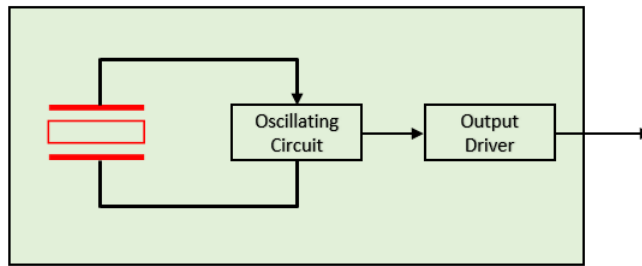


图 4-1. SPXO 晶体振荡器方框图

虽然这是一种巧妙的解决方案, 具有简易性、小型封装和快速启动时间 (因为没有校准), 但它支持的频率非常有限。频率支持完全取决于所使用的石英晶体。为了支持不同的输出频率, 封装中需要组装一个不同的晶体, 因为组装后无法再更改。此外, 由于晶体谐振器频率与晶体厚度成反比, 这使得在大约 50MHz 以上的基频下工作的晶体谐振器非常罕见, 因为它们很难处理和制造。更可能的解决方案是晶体谐振器在基频的奇次泛音下工作, 例如三阶泛音, 即工作频率是基频的 3 倍。当晶体在三阶泛音下工作时, 其电阻大约是基频的 3 倍, 而其电容几乎减少了 9 倍 - 这两种变化都会显著影响 Q 值和调谐晶体的能力。

晶体集成的另一种方法是将晶体用作 PLL 环路的基准, VCO 以更高的频率 (通常以 GHz 为单位) 运行。在上述 GHz 频率下, 一个简单的分频器和输出驱动器可以提供特定输出类型所需的特定输出频率。可以在 PLL 或输出分频器中添加分数引擎, 从而增加单个 IC 支持的频率值。这些晶体振荡器将具有某种通信协议 (I2C 或 SPI), 用于简单的寄存器编程。

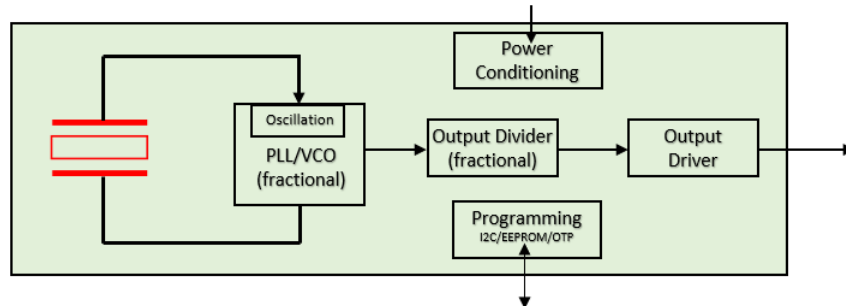


图 4-2. 具有 PLL 的晶体振荡器方框图

虽然这是一种更稳健、更灵活的解决方案, 一个器件能够支持所有频率, 但也存在一些缺点。一般而言, 由于需要更多内核块 (PLL、分频器等), 这将导致封装尺寸更大 (5mm × 3.2mm、7mm × 5mm) 且电流消耗更高 (超过 100mA)。最后, PLL 校准和锁定会导致启动时间更长, 通常为 10ms 或更长时间。

考虑到尺寸、功耗和启动时间，降低供应限制风险（一个器件通过不同编程支持所有可能的频率）的价值是显而易见的。

5 LMK6C/D/P/H BAW 振荡器与石英晶体振荡器的比较汇总

表 5-1. LMK6C/D/P/H BAW 振荡器与石英晶体振荡器的主要规格比较

参数	LMK6C/D/P/H BAW 振荡器规格和详细信息	石英晶体振荡器规格和详细信息	BAW 振荡器相对于石英晶体振荡器的优势	优势
灵活性	一个 BAW 芯片 + 一个基础芯片 (单 IC 解决方案可支持任何频率、电压电源、引脚对引脚兼容)	频率限制	缓解供应限制，单个 IC 即可支持所有频率	BAW 振荡器
温度稳定性	±10ppm (保持温度范围外的温度稳定性)	ppm 稳定性随温度升高而升高	在扩展温度下具有更高稳定性	BAW 振荡器
抖动 BW : 12kHz 至 20MHz	最大 125fs (LVDS、LVPECL、HCSL) 最大 500fs (LVCMOS)	高端性能类似于 BAW	BAW 与石英市场的高端产品很匹配	类似
电源噪声抗扰度	-70dBc (50kHz 至 1MHz 频率范围内在 3.3V 电源上注入 50mV 引起的峰值杂散) (集成式 LDO)	通常没有集成式 LDO	无需外部 LDO 或直流/直流转换器即可优化性能	BAW 振荡器
振动	MIL_STD_883F 方法 2002 条件 A (除了 MIL 标准，BAW 振荡器的典型振动稳定性约为 1ppb/g。这将更最大限度地减少振动引起的相位噪声影响。)	通常不会通过 MIL-STD 标准。可超过 10ppb/g。	更最大限度地减少环境影响	BAW 振荡器
冲击	MIL_STD_883F 方法 2007 条件 B (除 MIL 标准外，可承受更高的冲击水平)	通常不会通过 MIL-STD 标准。可能会在 2,000g 时失败。	更最大限度地减少环境影响	BAW 振荡器

5.1 灵活性

LMK6C/D/P/H BAW 振荡器是一款单 IC (单个 BAW 芯片 + 单个基础芯片) 解决方案，可生成 1MHz 至 400MHz 范围内的任意输出频率 (与基于 PLL/VCO 的石英晶体振荡器非常相似)，但其规格更接近 SPXO。BAW 振荡器具有快速启动时间 (低于 5ms)，采用业界通用的小型封装 (3.2mm × 2.5mm、2.5mm × 2.0mm)，典型电流消耗为 50mA。它可以由 1.8V、2.5V 或 3.3V 电源供电，并与所有振荡器竞争器件引脚对引脚兼容。BAW 振荡器还支持所有标准输出类型，包括 LVPECL、LVDS 和 HCSL (差分版本) 以及 LVCMOS (单端版本)。

5.2 温度稳定性

晶体往往与温度具有很高的相关性，随着温度的升高，频率会发生显著变化。如果不添加一些温度补偿电路，则不可能支持扩展工业级 (115°C LVCMOS/105°C 差分) 的 25ppm 器件。LMK6C/D/P/H BAW 振荡器在整个温度范围内可满足 $\pm 10\text{ppm}$ 的预算。

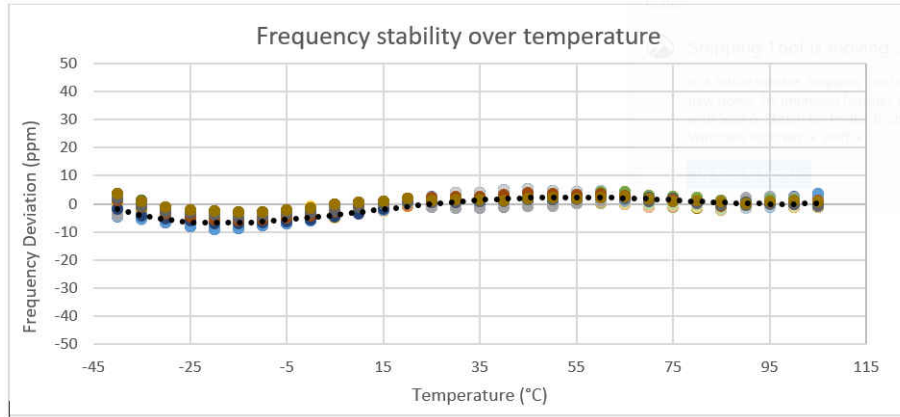


图 5-1. BAW 振荡器频率在温度范围内的稳定性

5.3 相位噪声性能

抖动是衡量所有时钟产品的主要性能规格。LMK6P/D/H BAW 振荡器可提供出色的抖动性能，差分输出下的典型值为 100fs：

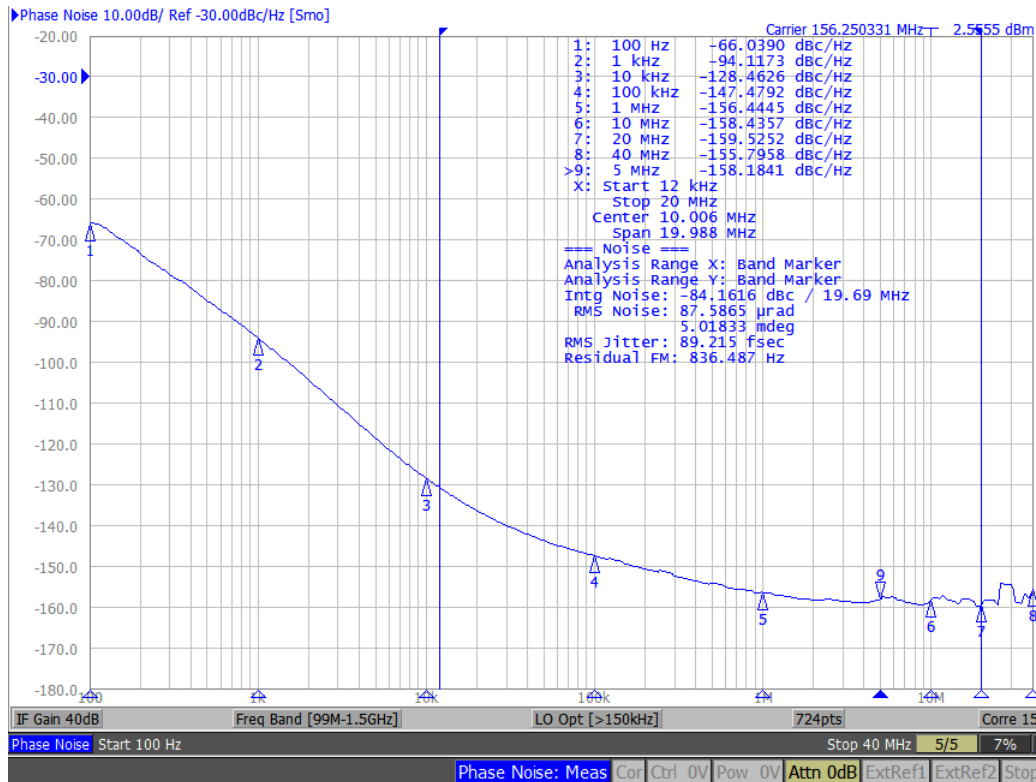


图 5-2. LMK6P/D/H BAW 振荡器差分相位噪声性能 (标准化)

单端版本具有出色的抖动性能，典型值低于 300fs：

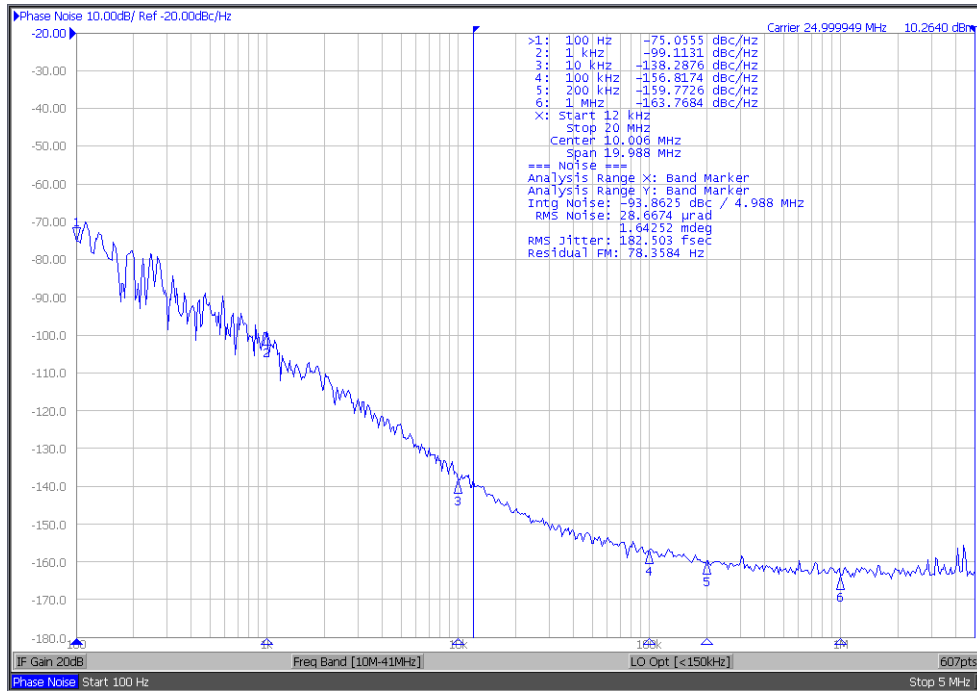


图 5-3. LMK6C BAW 振荡器单端相位噪声性能 (标准化)

5.4 电源噪声抗扰度

LMK6C/D/P/H BAW 振荡器集成了内部 LDO，可为输出时钟提供电源纹波保护。这增加了一项优势：无需对电源安装外部 LDO 或直流/直流转换器，即可使振荡器实现出色的性能。在电源引脚上使用简单的旁路电容器，可以抑制大部分纹波并且不会在输出端引起噪声。

5.5 机械稳健性

对于振荡器，振动和冲击是导致相位噪声和抖动增加、移频和尖峰甚至谐振器及其封装物理损坏的常见原因。与石英晶体相比，LMK6C/D/P/H 质量较小且频率较高，因此具有更强的抗振性和抗冲击性。这是由于质量小，通过加速而施加到器件上的力要小得多。LMK6C/D/P/H BAW 振荡器同时满足 MIL_STD_883F 方法 2002 条件 A (振动) 和 MIL_STD_883F 方法 2007 条件 B (冲击) 标准，在振动和冲击事件后不会出现性能下降 (抖动、稳定性、一般器件性能)。

除了军用标准测试外，LMK6C/D/P/H BAW 振荡器还在多种条件下进行了应力测试。BAW 振荡器不仅在承受应力时产生最小的频移 (由冲击引起)，还能在事件发生后恢复到之前的水平：

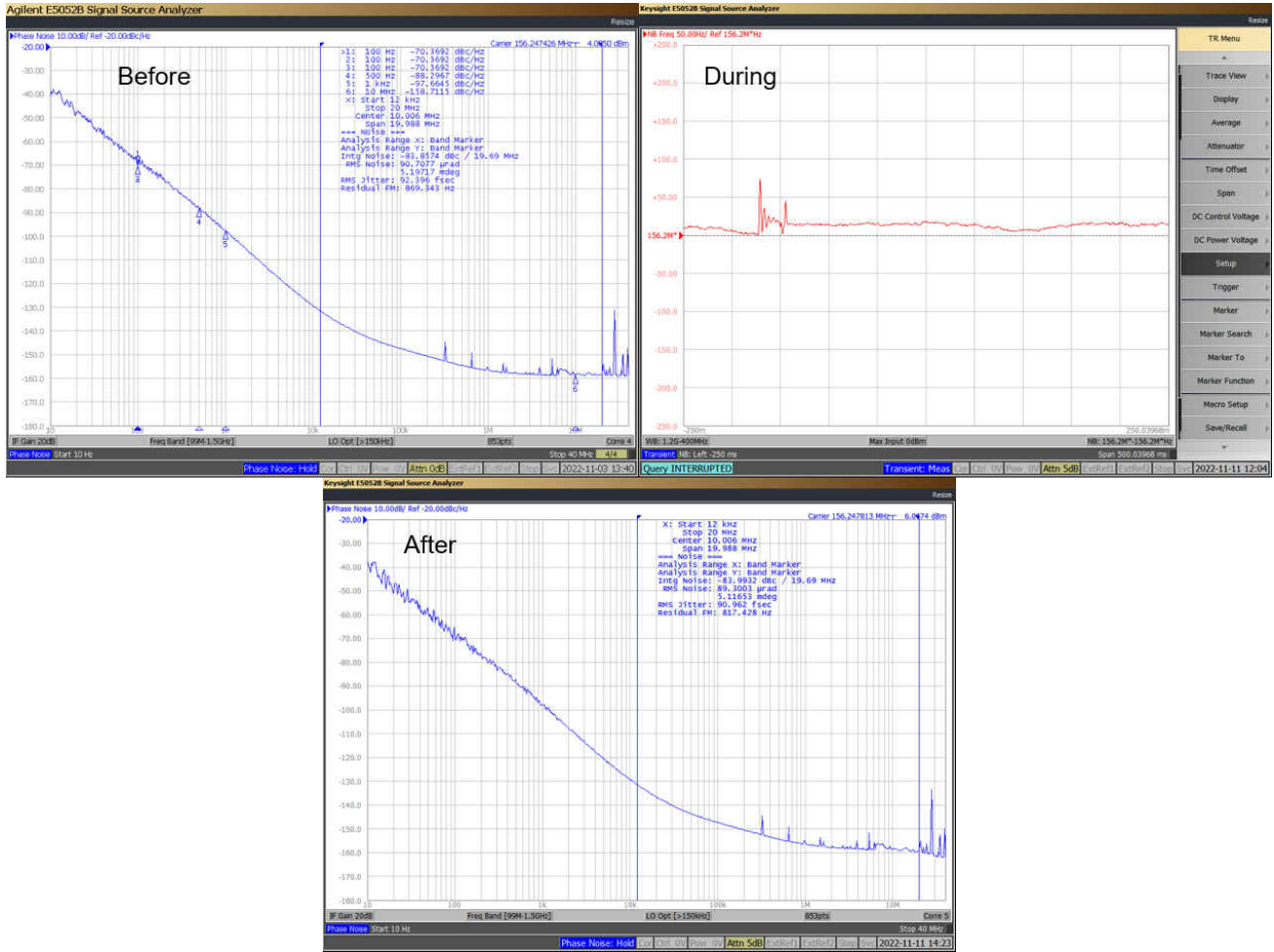


图 5-4. 1500g 时的 LMKD/P/H 冲击效应

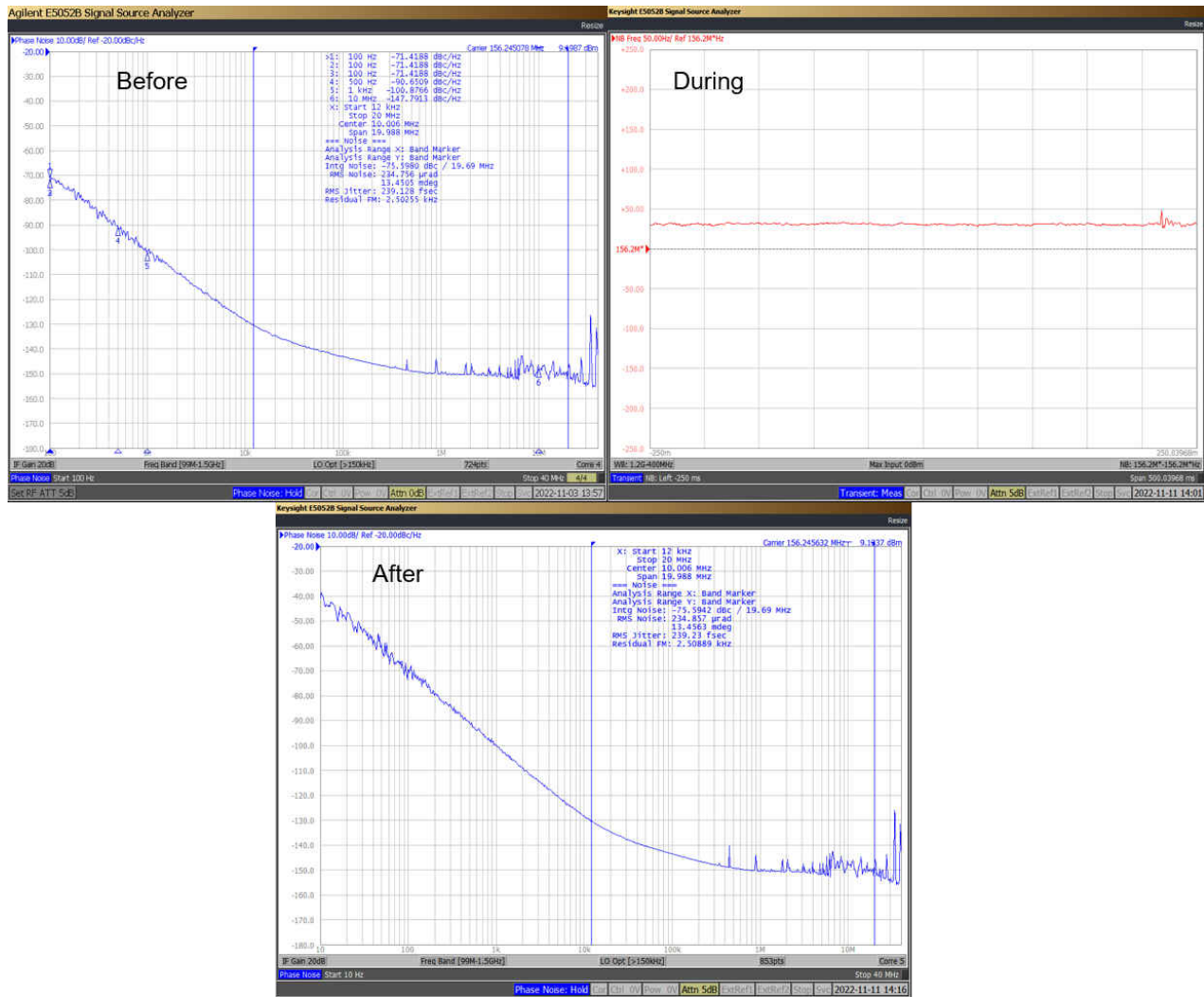


图 5-5. 1500g 时的 LMK6C 冲击效应

在振动方面，BAW 振荡器受振动会产生最小的频率偏差，约为 1ppb/g。这比晶体振荡器解决方案提高了一个数量级。

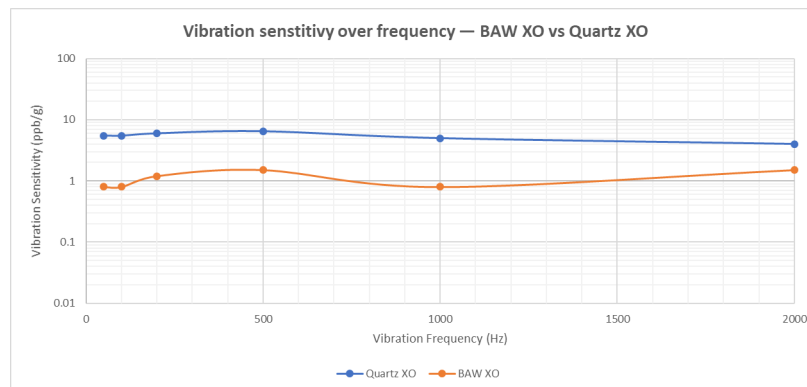


图 5-6. LMK6C/D/P/H BAW 振荡器与石英晶体振荡器的振动灵敏度比较

在 10 年老化期间，LMK6C/D/P/H BAW 振荡器可保证 ± 25 ppm 的整体频率稳定性。图 5-7 和图 5-8 分别显示了 LMK6P/D/H 差分 BAW 振荡器和 LMK6C 单端 BAW 振荡器的老化趋势。

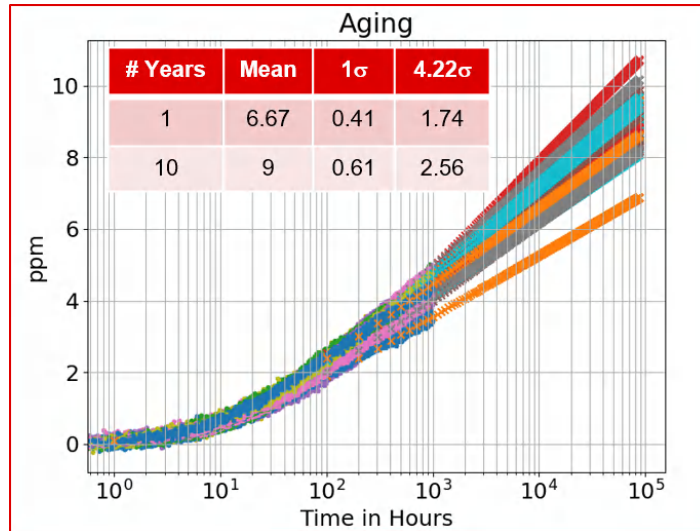


图 5-7. LMK6P/D/H 差分老化

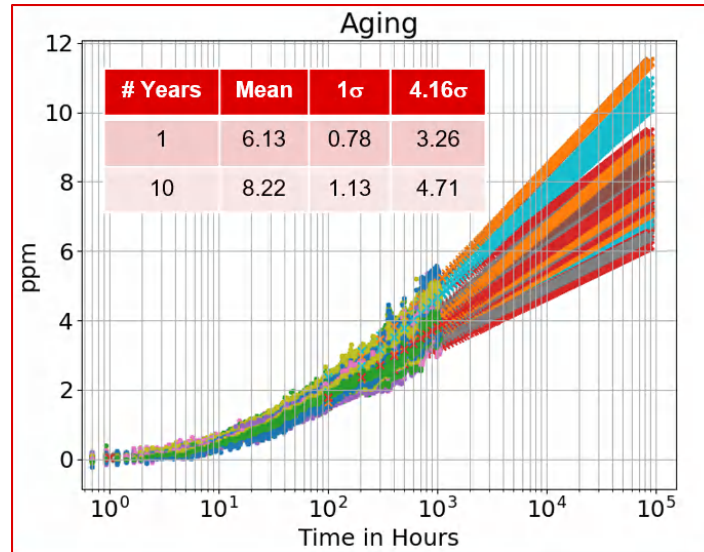


图 5-8. LMK6C 单端老化

6 结论

LMK6C/D/P/H BAW 振荡器为晶体振荡器提供了出色的替代选项，具有本文所述的许多性能优势。除此之外，BAW 振荡器的供应限制与石英晶体振荡器市场的不同，因为它是一种完全由 TI 控制和设计的制造工艺，只需单个晶圆即可大量生产。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司