

Application Note

水晶発振器に対するスタンドアロン BAW 発振器の利点



Clock and Timing Solutions

概要

このアプリケーション・レポートでは、テキサス・インスツルメンツの BAW テクノロジー、BAW 共振器と発振器回路の統合によるスタンドアロン発振器の作成、BAW 発振器を使うことの利点 (水晶発振器との比較) について詳しく説明します。水晶発振器に対する BAW 発振器の主な利点には、柔軟性の向上、温度安定性の向上、ジッタ性能の向上、電源ノイズ耐性の向上、振動安定性の大幅な向上、耐衝撃性の大幅な向上が挙げられます。

目次

1 概要.....	2
2 BAW テクノロジーの概要.....	2
3 BAW 発振器の統合.....	2
4 水晶発振器.....	3
5 LMK6C/D/P/H BAW 発振器と水晶発振器の比較.....	5
5.1 柔軟性.....	5
5.2 温度安定性.....	6
5.3 位相ノイズ性能.....	6
5.4 電源ノイズ耐性.....	7
5.5 機械的堅牢性.....	8
6 まとめ.....	10

図の一覧

図 3-1. BAW とベース・ダイの統合.....	2
図 3-2. LMK6C/D/P/H BAW 発振器のブロック図.....	3
図 4-1. SPXO 水晶発振器のブロック図.....	3
図 4-2. PLL 付き水晶発振器のブロック図.....	4
図 5-1. 全温度範囲での BAW 発振器の周波数安定性.....	6
図 5-2. LMK6P/D/H BAW 発振器 (差動) の位相ノイズ性能 (正規化済み).....	6
図 5-3. LMK6C BAW 発振器 (シングルエンド) の位相ノイズ性能 (正規化済み).....	7
図 5-4. LMKD/P/H の衝撃 (1500g) の影響.....	8
図 5-5. LMK6C の衝撃 (1500g) の影響.....	9
図 5-6. LMK6C/D/P/H BAW 発振器と水晶発振器の振動に対する感受性の比較.....	9
図 5-7. LMK6P/D/H (差動) の経時変動.....	10
図 5-8. LMK6C (シングルエンド) の経時変動.....	10

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

水晶振動子発振器 (XO) は、1920 年代に発明されて以来、1 世紀以上にわたってタイミング・リファレンス市場を支配してきました。これらの水晶発振器は、ローエンド・アプリケーション (リアルタイム・クロック) からハイエンド・アプリケーション (複雑な無線、GPS、ミリタリー / 航空) まで幅広い製品で有効性が見出されてきました。ここ数 10 年間、移動体通信と新たに出現した IoT 市場が、水晶振動子と同等以上の性能を維持しながら、消費電力が小さく、小型で、統合しやすい新しい共振器技術の探索を推進してきました。この 10 年間に、各種のマイクロ共振器技術を利用した複数のスタンドアロン発振器製品が消費者市場に投入されました。テキサス・インスツルメンツは、2012 年に、先進のタイミング・アプリケーションを目指して独自のバルク弾性波 (BAW) 共振器テクノロジーの開発を開始しました。また、2018 年以来、業界最高性能のジッタ・クリーナ (LMK05318 ファミリー) と世界で初めて商品化された水晶振動子を使わない BLE 無線 (CC2652RB ファミリー) を含む複数のシステム製品を発表してきました。これらのデバイスの量産経験を生かして、テキサス・インスツルメンツは今回、BAW を使ったスタンドアロン発振器製品を発売しました。

2 BAW テクノロジーの概要

テキサス・インスツルメンツの BAW 共振器テクノロジーは、2.5GHz での高 Q 共振を発生させるために圧電変換を利用しています。この共振器は、上下の電極に挟まれた四角形の領域によって定義されます。高音響インピーダンス層と低音響インピーダンス層を交互に配置することで、共振体の下に音響ミラーを形成し、基板への音響エネルギーの漏れを防止します。さらに、デバイスを汚染から保護し、パッケージ材料へのエネルギーの漏れを最小限に抑えるため、これらの音響ミラーは共振器スタックの上に配置されています。この独自のデュアル・ブラッグ音響共振器 (DBAR) によって、共振器を囲む高価な真空キャビティがなくても効果的に励起することを可能にしています。結果的に、テキサス・インスツルメンツの BAW 共振器は、表面汚染物質の吸収による周波数ドリフトに影響されないため、標準的な発振器フットプリント (3.2mm × 2.5mm および 2.5mm × 2.0mm) の非気密プラスチック・パッケージ内に発振器回路と共に直接配置できます。

3 BAW 発振器の統合

LMK6C/D/P/H は BAW 共振器、分数出力分周器 (FOD)、出力ドライバを内蔵しており、これらを組み合わせることで、あらかじめ設定された出力周波数が生成されます。発振周波数の温度変動は、内部の高精度温度センサによって連続的に監視され、その信号は周波数制御ロジック・ブロックに入力されます。この周波数制御ロジック・ブロックを使って、温度による変動と経時変動を含めて、出力周波数を $\pm 25\text{ppm}$ 以内に維持するための周波数補正が内部的に実行されます。出力ドライバは、シングルエンド (LVCMOS) と差動 (LVPECL, LVDS, HCSL) の両方の方式で出力できます。本デバイスは、電源ノイズを低減する LDO も内蔵しているため、低ノイズのクロック出力が得られます。

図 3-1 に、BAW 発振器の統合の様子 (モールド前) を示します。BAW 発振器には、FOD、LDO、温度センサなどの追加 IC 回路を内蔵するベース・ダイと、BAW 共振器ダイが含まれます。WLP (ウェハー・レベル・パッケージ) は、振動および衝撃耐性とストレス分離の観点から、デバイスの信頼性を向上させるために採用されています。

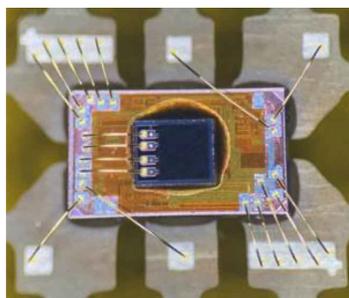


図 3-1. BAW とベース・ダイの統合

その結果、本デバイスは、代替品とピン互換であり、そのまま交換できるシンプルな 4 ピン (シングルエンド LVCMOS) または 6 ピン (差動、LVPECL、LVDS、HCSL) の業界標準パッケージ (3.2mm × 2.5mm または 2.5mm × 2.0mm) で供給されます。

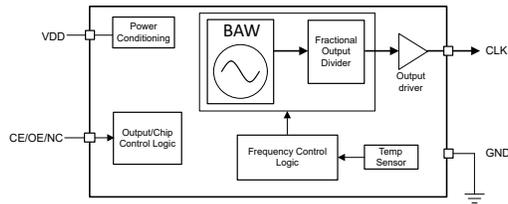


図 3-2. LMK6C/D/P/H BAW 発振器のブロック図

4 水晶発振器

スタンドアロンの発振器デバイスを構成する場合、水晶振動子を統合するのに 2 つの方法があります。それぞれの方法には固有の利点と欠点があります。第 1 の方法は、水晶振動子と発振回路を組み合わせ、各種の出力タイプに対応するために単純に出力ドライバを追加することです。これは通常、SPXO シンプル・パッケージ発振器と呼ばれます。

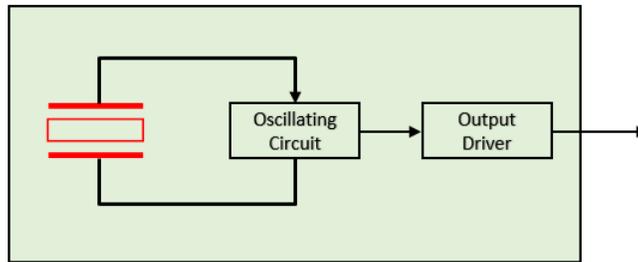


図 4-1. SPXO 水晶発振器のブロック図

これは洗練されたソリューションであり、簡潔性、小型パッケージ、迅速な起動時間 (キャリブレーションがないため) を実現できますが、対応可能な周波数は非常に限られています。対応する周波数は、使用する水晶振動子で単純に決まります。アセンブリ後に水晶振動子の周波数を変更することはできないため、異なる出力周波数に対応するには、別の水晶振動子をパッケージ内に組み込んでおく必要があります。さらに、水晶振動子の周波数は水晶の厚さに反比例するため、約 50MHz を超える基本周波数で動作する水晶振動子は、取り扱いと製造が非常に困難であることから、ほとんど存在しません。より可能性の高い方法は、基本波の奇数のオーバートーン (たとえば 3 次のオーバートーン) で動作させることです。これは、基本周波数の 3 倍の周波数で水晶振動子が動作することを意味します。水晶振動子が 3 次オーバートーンで動作している場合、その抵抗は基本波で動作している場合の抵抗の約 3 倍になりますが、その静電容量は約 9 分の 1 に低下します。どちらの変化も、水晶振動子の Q と調整能力に大きく影響します。

水晶振動子を統合するもう 1 つの方法は、はるかに高い周波数 (通常は GHz 単位) で動作する VCO を使った PLL ループの基準として水晶振動子を使用することです。この GHz 単位の周波数から、単純な分周器と出力ドライバを使って、必要とされる特定の出力周波数を特定の出力タイプで提供できます。1 つの IC で対応できる周波数の数を増やすために、PLL と出力分周器のどちらかにフラクショナル・エンジンを追加することもできます。これらの水晶発振器には、レジスタを簡単に設定するための何らかの通信プロトコル (I2C または SPI) を備えます。

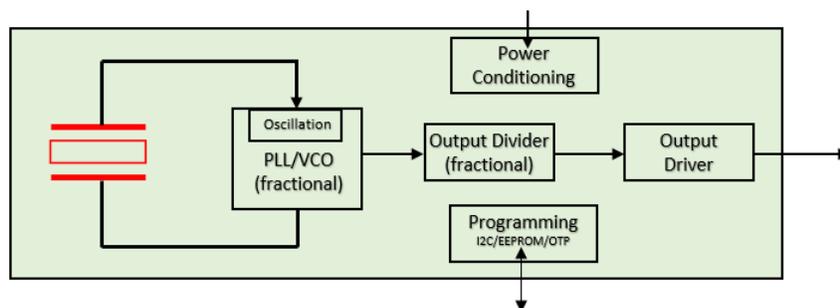


図 4-2. PLL 付き水晶発振器のブロック図

これは、すべての周波数をサポートできる 1 つのシリコンを使ったより堅牢かつフレキシブルなソリューションですが、いくつかの短所があります。一般に、多くのコア・ブロック (PLL、分周器など) が必要とされるため、比較的大きなパッケージ・サイズ (5mm × 3.2mm、7mm × 5mm) と大きな消費電流 (100mA 以上) の原因となります。最後に、PLL のキャリブレーションとロックは比較的遅い起動時間 (通常 10ms 以上) の原因となります。

サイズ、消費電力、起動時間に関する短所は、部品供給の制約のリスクを緩和するためのコストが低減される (設定を変更することですべての可能な周波数に 1 つのシリコンで対応できるため) という長所によって相殺されます。

5 LMK6C/D/P/H BAW 発振器と水晶発振器の比較

表 5-1. LMK6C/D/P/H BAW 発振器と水晶発振器の主な仕様の比較

パラメータ	LMK6C/D/P/H BAW 発振器の仕様と詳細	水晶発振器の仕様と詳細	水晶振動子に対する BAW の利点	優位
柔軟性	1 つの BAW ダイ + 1 つのベース・ダイ (任意の周波数、電圧電源、ピン互換をサポートするシングル IC ソリューション)	周波数の制約	供給の制約が少ない。1 つの IC ですべての周波数をサポート。	BAW 発振器
温度安定性	±10ppm (温度範囲と無関係に温度安定性を維持)	温度が上昇するにつれて、安定性の ppm 値も増加する。	広い温度範囲で安定性が優れている。	BAW 発振器
ジッタ BW 12kHz~20MHz	125fs 以下 (LVDS、LVPECL、HCSSL) 500fs 以下 (LVCMOS)	ハイエンド品は BAW と同様の性能を発揮。	BAW は、水晶振動子市場のハイエンド品に匹敵。	同等
電源ノイズ耐性	-70dBc (3.3V 電源への 50mV の注入によるピーク・スプリアス、50kHz~1MHz) (内蔵 LDO)	通常、LDO は内蔵されていない。	性能を最適化するのに LDO も DC/DC コンバータも外付け不要。	BAW 発振器
振動	MIL_STD_883F 方法 2002 条件 A (MIL 規格に加えて、BAW 発振器は約 1ppb/g (標準値) の振動安定性を達成しています。そのため、振動による位相ノイズの影響を最小限に抑えることができます。)	通常は MIL-STD に合格しない。10ppb/g を超える場合がある。	環境からの影響は最小限。	BAW 発振器
衝撃	MIL_STD_883F 方法 2007 条件 B (MIL 規格に加えて、非常に高い衝撃レベルに耐えることができます。)	通常は MIL-STD に合格しない。2,000g で故障する可能性がある。	環境からの影響は最小限。	BAW 発振器

5.1 柔軟性

LMK6C/D/P/H BAW 発振器は、PLL/VCO を使った水晶発振器とよく似た、1MHz~400MHz の任意の出力周波数を生成できるシングル IC ソリューション (1 つの BAW ダイ + 1 つのベース・ダイ) ですが、仕様は SPXO にはるかに近い値です。本 BAW 発振器は起動時間が速く (5ms 未満)、業界標準の超小型パッケージ (3.2mm × 2.5mm、2.5mm × 2.0mm) で供給され、消費電流は 50mA (標準値) です。1.8V、2.5V、3.3V 電源で動作でき、競合するすべての発振器製品とピン互換です。また、本 BAW 発振器は一般的なすべての出力タイプ (差動:LVPECL、LVDS、HCSSL、シングルエンド:LVCMOS) をサポートしています。

5.2 温度安定性

水晶振動子は大きな温度依存性を持っており、温度が上昇すると周波数は大きく変化します。拡張産業用グレード (115°C LVCMOS / 105°C 差動) での 25ppm 品のサポートは、何らかの温度補償回路を追加しない限り不可能です。LMK6C/D/P/H BAW 発振器は、全温度範囲で ± 10 ppm の許容値を満たします。

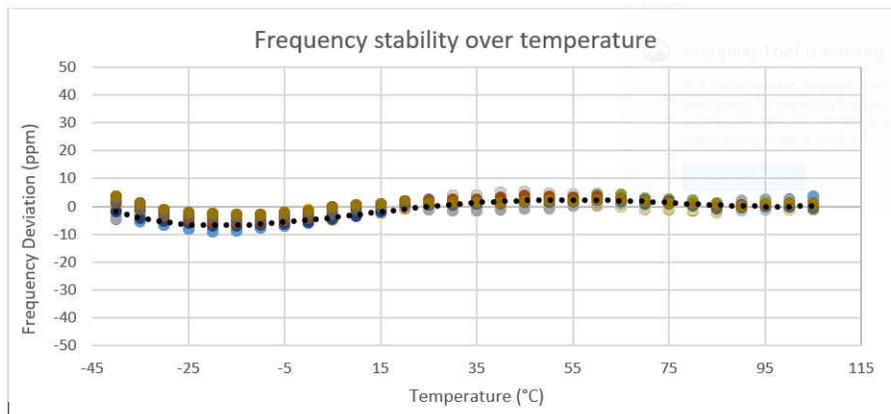


図 5-1. 全温度範囲での BAW 発振器の周波数安定性

5.3 位相ノイズ性能

ジッタは、すべてのクロック製品で評価の基準となる重要な性能仕様です。LMK6P/D/H BAW 発振器は、差動出力で 100fs (標準値) を満たす優れたジッタ性能を備えています。

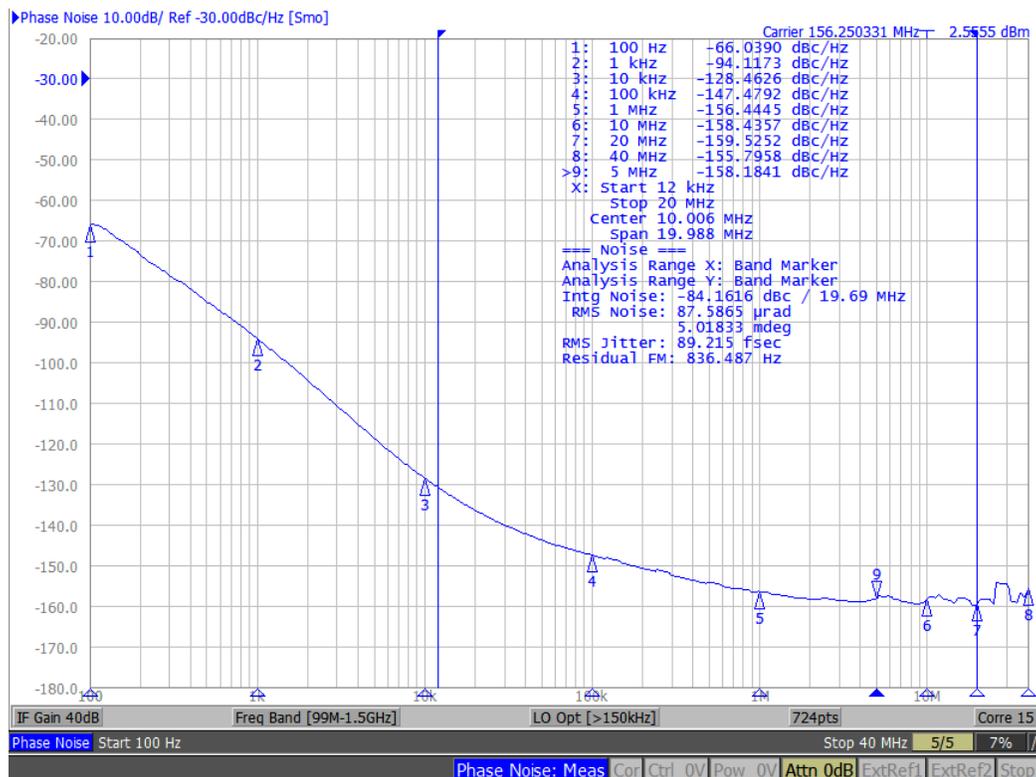


図 5-2. LMK6P/D/H BAW 発振器 (差動) の位相ノイズ性能 (正規化済み)

シングルエンド・バージョンは、300fs 未満 (標準値) というクラス最高のジッタ性能を備えています。

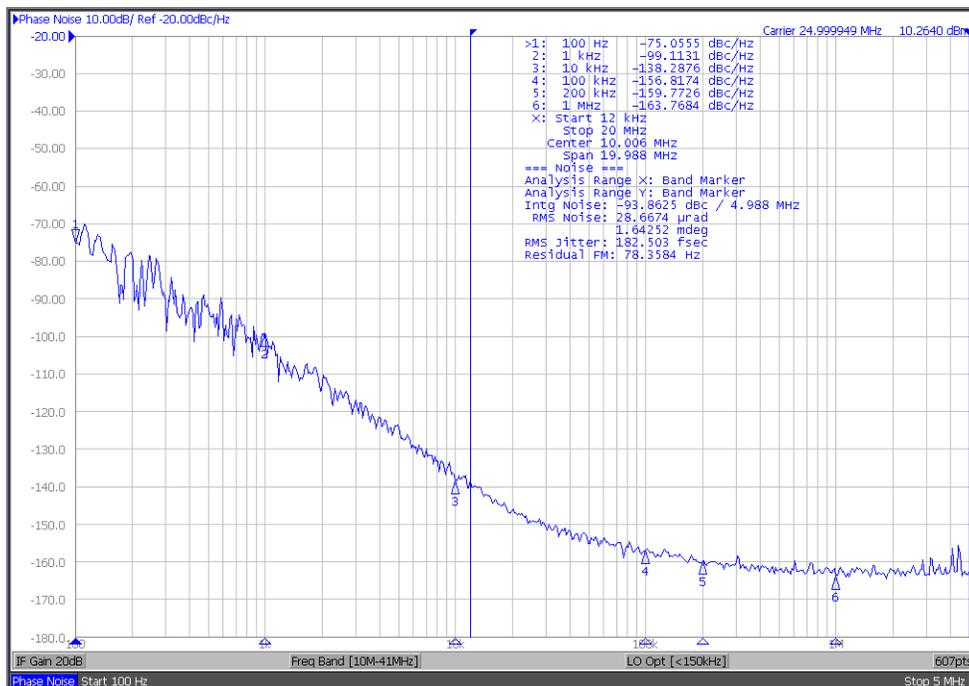


図 5-3. LMK6C BAW 発振器 (シングルエンド) の位相ノイズ性能 (正規化済み)

5.4 電源ノイズ耐性

LMK6C/D/P/H BAW 発振器は、電源のリップルから出力クロックを保護する LDO を内蔵しています。そのため、外付け LDO または DC/DC コンバータを電源に接続しなくても、発振器の性能を最大限に引き出せるという利点があります。電源ピンに単純なバイパス・コンデンサを接続するだけで、リップルの大部分は除去され、出力にノイズを生じさせません。

5.5 機械的堅牢性

発振器にとって振動と衝撃は、位相ノイズとジッタの増加、周波数シフトおよびスパイク、さらには共振器とそのパッケージに対する物理的損傷のよくある原因です。水晶振動子と比較して LMK6C/D/P/H は、その数桁小さい質量と高い周波数により、振動や衝撃に対する耐性が高くなります。質量が小さいため、加速度によってデバイスに加わる力が非常に小さいためです。LMK6C/D/P/H BAW 発振器は MIL_STD_883F 方法 2002 の条件 A (振動) と MIL_STD_883F 方法 2007 の条件 B (衝撃) の両方に適合しており、振動および衝撃イベントの後も性能 (ジッタ、安定性、その他の各種デバイス性能) は低下しません。

軍用規格試験に加えて、LMK6C/D/P/H BAW 発振器は各種条件の応力下でテストされます。応力下での衝撃によって観測される BAW 発振器の周波数シフトは、最小限であるだけでなく、イベント後に以前のレベルに回復します。

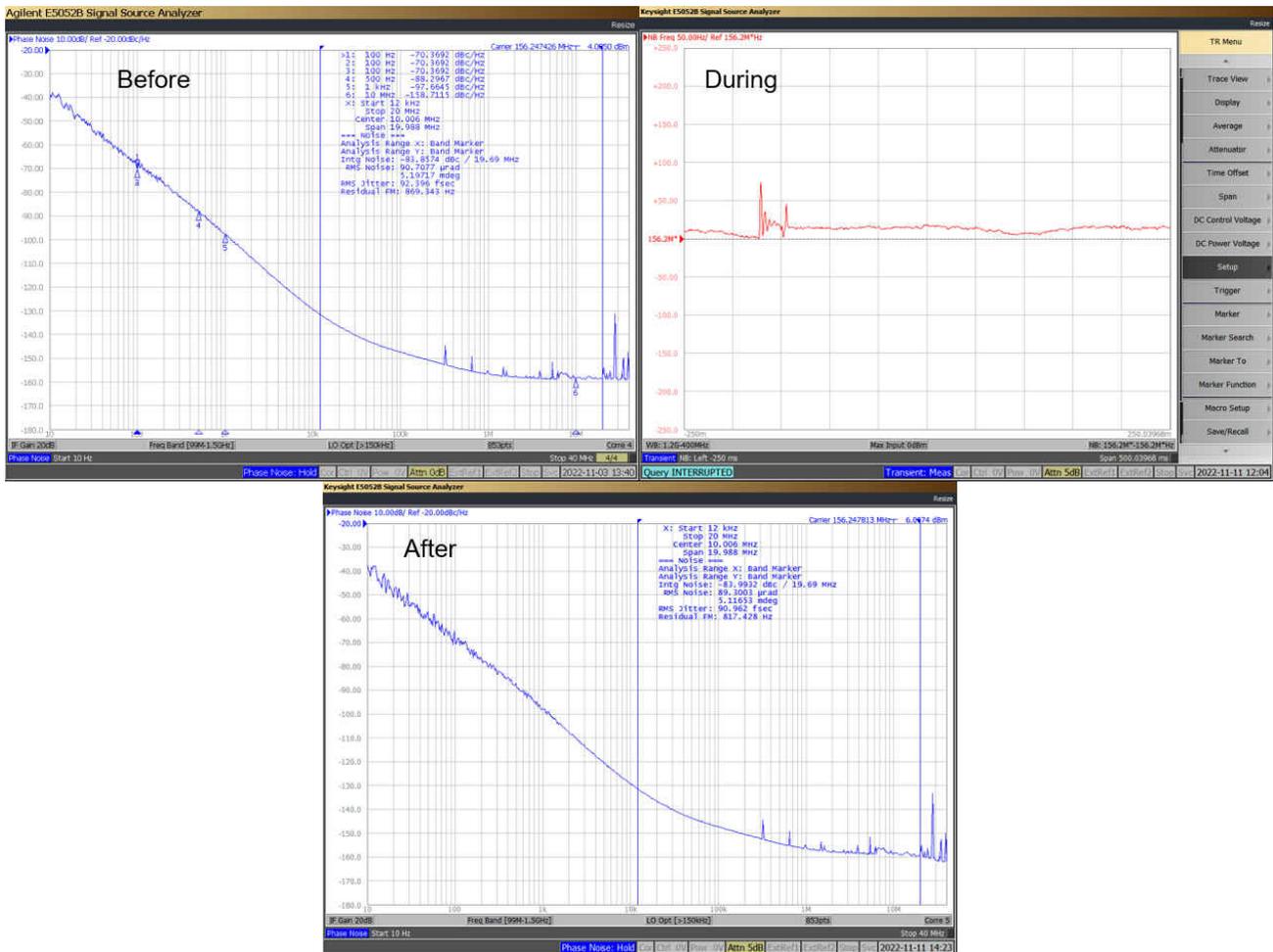


図 5-4. LMKD/P/H の衝撃 (1500g) の影響

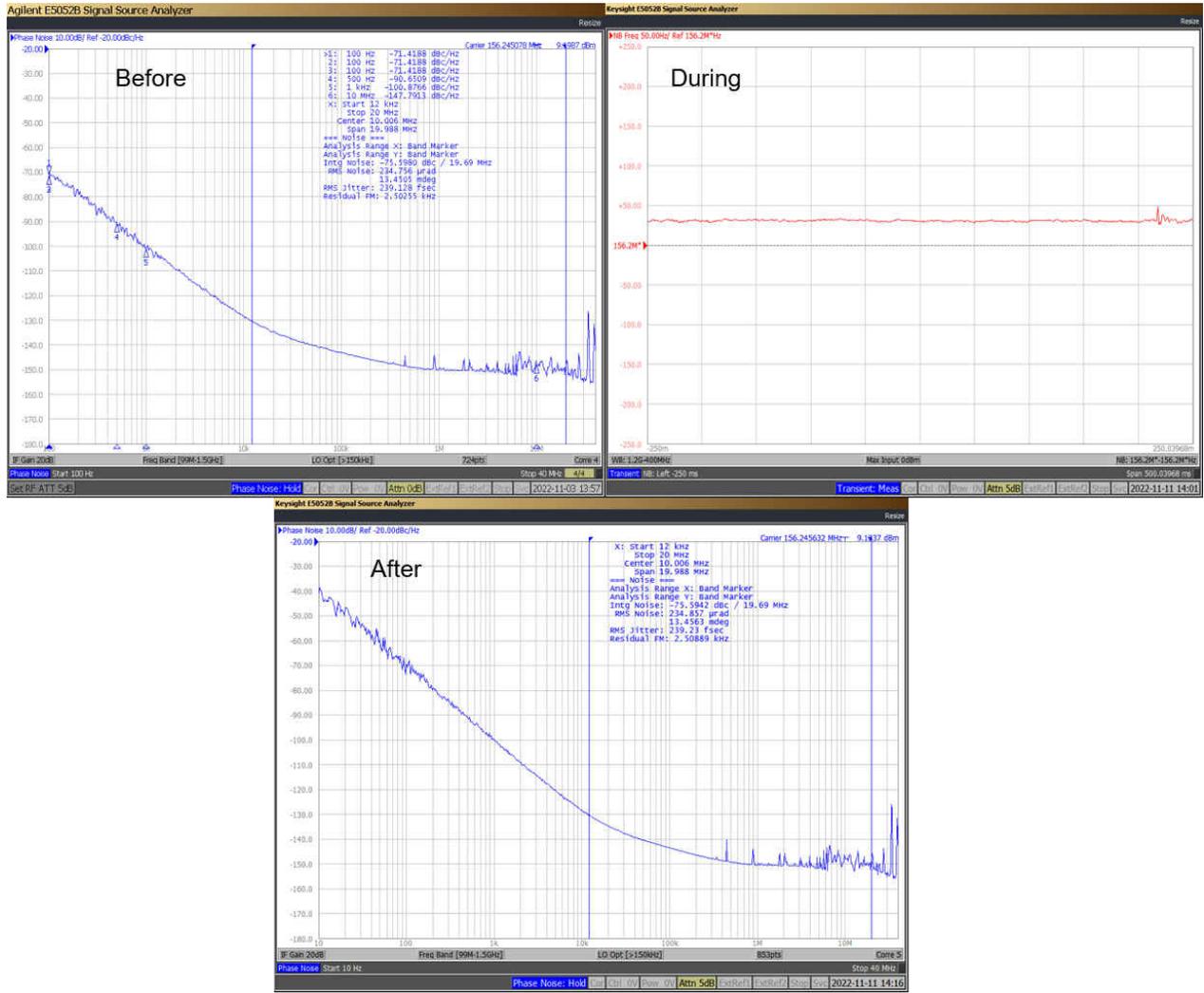


図 5-5. LMK6C の衝撃 (1500g) の影響

振動に関しては、BAW 発振器が示す、振動による周波数偏差は最小限 (約 1ppb/g) です。これは、水晶発振器ソリューションに対して 1 桁近く良い値です。

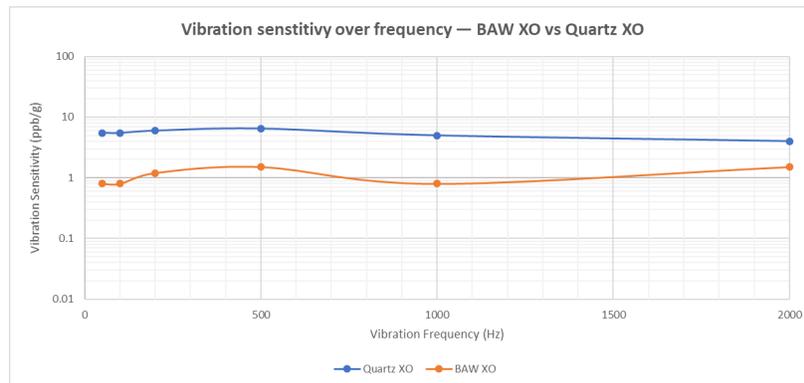


図 5-6. LMK6C/D/P/H BAW 発振器と水晶発振器の振動に対する感受性の比較

LMK6C/D/P/H BAW 発振器は、10 年間の経時変動を含め、すべて込みで $\pm 25\text{ppm}$ の周波数安定性を保証しています。図 5-7 と図 5-8 に、LMK6P/D/H 差動および LMK6C シングルエンド BAW 発振器の経時変動の傾向を示します。

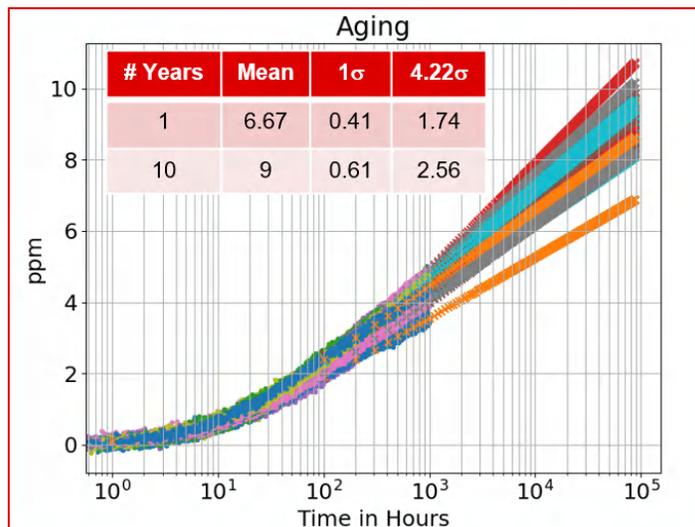


図 5-7. LMK6P/D/H (差分) の経時変動

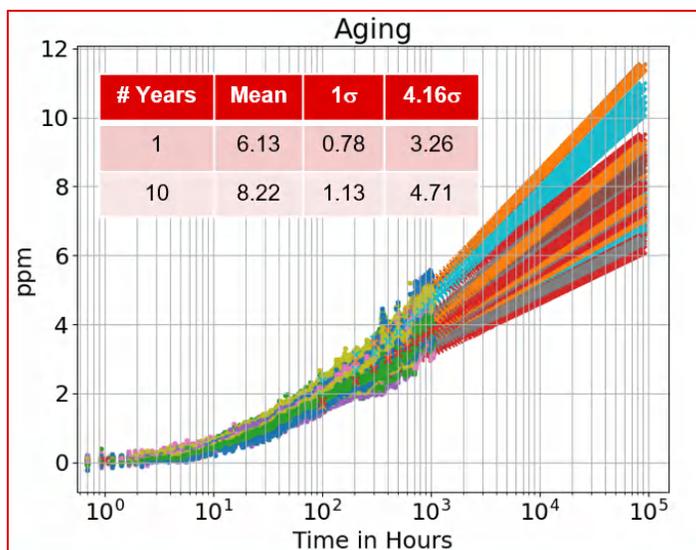


図 5-8. LMK6C (シングルエンド) の経時変動

6 まとめ

LMK6C/D/P/H BAW 発振器は、本書で取り上げた多くの性能上の利点が見えるように、水晶発振器に代わる優れた選択肢です。それに加えて、BAW 発振器には、水晶発振器市場に見られるような供給にかかわる制約がありません。BAW 発振器は、テキサス・インスツルメンツによって完全に制御および設計された製造プロセスを使っており、1 回のウェハー・プロセスで大量の製品を製造できるためです。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated