



## 水晶発振器の性能を凌駕しはじめた MEMS発振器の実際

### シリコンMEMS発振器の新常識

露口 剛司/榎本 峰人

Takeshi Tsuyuguchi/Takahito Enomoto

#### 1 はじめに

本誌読者であれば「発振器」や「振動子(発振子)」をご存じの方が多いことと思います。これらはタイミング信号を必要とするあらゆる電子機器に使用されています。

電子機器は、内部回路を駆動し、回路間の同期を取るためにクロック源を必要とします。このクロック源として一般的に利用されているのが発振器や振動子です。多くの方々にとって、これらは水晶発振器や水晶振動子など、水晶を素材としたデバイスというイメージでしょう。それは半分正しいです。昔から、水晶は「産業の米」といわれる半導体とともになくてはならない存在であり、タイミング・デバイスだけでなく、SAWデバイスやフィルタといった多くの水晶デバイスが産業の発展とともに、現在も多くの水晶体デバイスが使用されています。

近年、5Gの導入により、ブロードバンド・インターネットやIoTの増強が可能となり、自動運転や機器の遠隔操作、VR/ARといった「新たな市場が生まれること」「これまでつながっていなかった多数のモノがつながること」が期待されています。一方、装置や機器は、これまでと異なる設置環境(例えば、車のような振動/衝撃が伝わりやすい、温度の変動が大きい場所。)、要件を定義され、装置や機器に搭載される電子部品はより信頼性が求められます。このような環境変化の中でより安定したタイミング信号を供給可能なデバイスとして、Si(シリコン)を素材とした、MEMS (Micro Electric Mechanical Device) の技術で製造する「Si MEMS発振器」や「Si MEMS振動子」の売り上げが伸びてきています。

Si MEMSが評価されているのは、①タイミング・デバイスが小型なこと、②耐振動/衝撃性、③温度特性、④経年変化、⑤信頼性といったポイントが従来のタイミング・デバイスと比較して良好なためです。

本稿では、Si MEMS発振器市場で90%以上のシェアを保有する米SiTime社が保有するSi MEMS発振

器の構造と動作原理、製品特性、製造プロセスなどについて説明します。

#### 2 SiTime Corporationについて

同社は2003年設立で、米国に本社を置くSi MEMS タイミング・デバイスのリーディング・カンパニーです。独Robert Bosch社がもつ信頼性の高いMEMS製造技術を受け継ぎ開発する独自のMEMS振動子に加え、自社開発する高性能アナログCMOS ICをもつ企業です。

2014年に日本のファブレス半導体メーカーである(株)メガチップスのグループ会社となり、2019年にNASDAQ Global Marketに上場しました。

#### 3 Si MEMS発振器の基礎知識

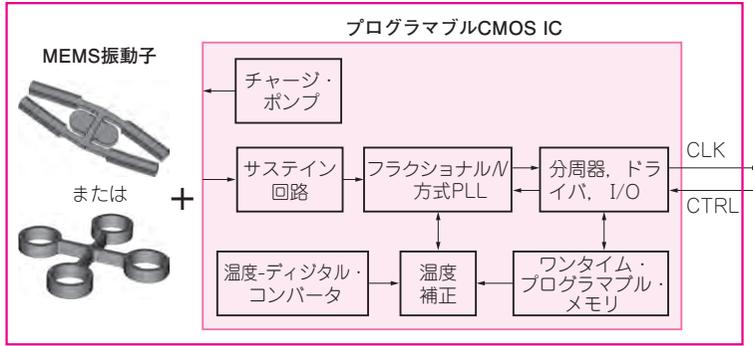
##### 3.1 内部構成

SiTimeのSi MEMS発振器は2006年に初めて市場に登場し、MEMS技術で製造されたMEMS振動子とアナログCMOS ICの二つのダイ(図1)で構成されています。どちらもSiTime社の自社設計であり、それゆえに外部からの振動や温度変化に伴う周波数の変動がほとんどない、PLLを使ったプログラマブル・クロック・デバイスでありながらも低ジッタと低位相ノイズを実現しています。

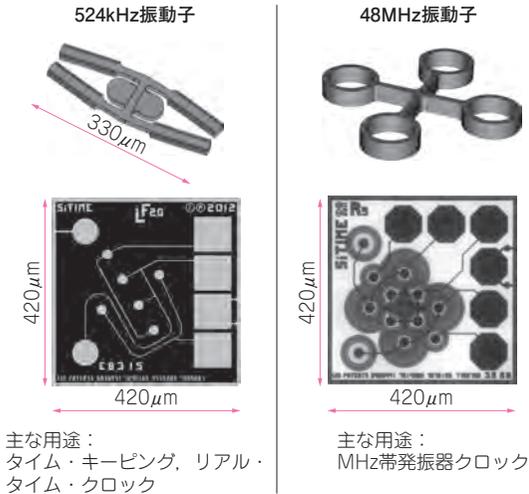
SiTimeのSi MEMS発振器は、図2に示す524 kHzと48 MHzの2種類の振動子を製品仕様に合わせて使い分けています。低周波数や低消費電流を実現する場合には低周波数の524 kHzのMEMS振動子を使用し、低ジッタや高周波数を実現する場合には48 MHzのMEMS振動子を使用します。これら2種類の振動子とプログラマブルPLL ICの組み合わせで、1 Hz~1.2 GHzまでの幅広い周波数範囲をカバーしています。周波数分解能は70 ppt(70×10<sup>-12</sup>)で、既定の範囲内ならどの周波数でもプログラムが可能です。

SiTimeはSi MEMS振動子の形状を工夫すること

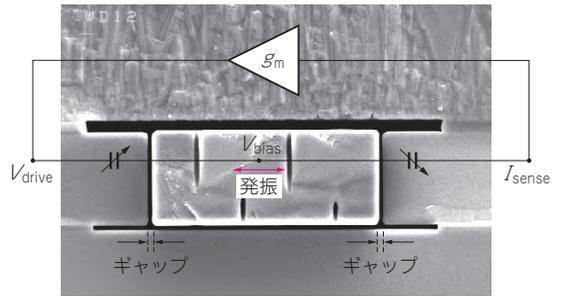
## MEMS発振器



〈図1〉 SiTime社のSi MEMS発振器の構成



〈図2〉 Si MEMS振動子(SiTime社)



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$k$ : 剛性 (スチフネス),  $m$ : 重量  
 $f_0$ : 共振周波数

写真2 Si MEMS振動子の動作原理

で、安定した振動モードを実現しました。基本周波数以外の高調波が生じないように設計することで「アクティビティ・ディップ」と呼ばれる周波数飛びの発生を抑制しています。

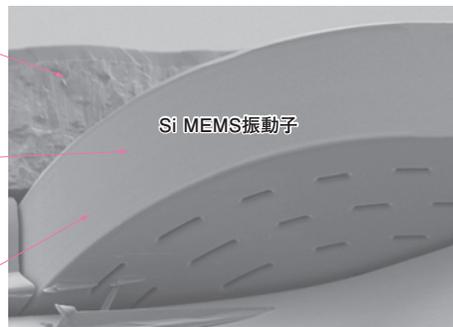
### 3.2 動作原理

Si MEMS振動子(写真1)は単結晶シリコンで形成

されています。シリコンの引っ張り強度は7 GPaで、引っ張り強度が330~500 MPaのチタンに比べて14倍以上の強度をもっています。振動子の変位は、周囲の側壁とのギャップ長に対して1%未満と非常に微小な振動で動作しています。

写真2を見てください。Si MEMS振動子の動作原理は、水晶デバイスに特有の圧電効果を使った圧電駆動

- EpiSealプロセス(1100℃のクリーン環境)によってMEMS振動子を真空封止
- 高純度材料を使用し、ppbレベルで製造
- 不純物がないので高精度状態を保持
- 高圧に耐えるために単結晶シリコン層によって振動子を保護



〈写真1〉 Si MEMS振動子の内部(SiTime社)