

プラズマCVM技術を応用した超小型水晶振動子の開発

研究者：山村 和也 大阪大学 大学院工学研究科
附属超精密科学研究センター 准教授
開発企業：谷本 秀夫 京セラ株式会社 代表取締役社長
(推薦者：神山 一司 京セラ株式会社 中央研究所 所長)



山村 和也氏



谷本 秀夫氏

1. 技術の背景

近年のスマートフォンの高機能化やウェアラブル端末の本格普及にともない、電子部品に対してますますの小型化が要求されている。京セラ株式会社が量産している水晶振動子においても、他の電子部品と同様に小型化が強く求められている。

水晶振動子は水晶の圧電現象を利用して、一定の周波数を生み出し、すべての電子機器に正しい時間と速度で情報を送るタイミングデバイスである。図1、図2に水晶振動子を示す。水晶振動子はセラミックパッケージ内に水晶素子を収容している。水晶素子は水晶の結晶軸に対して特定の方向に切断され、その両面に電極が形成される。この水晶素子に電圧が加わると水晶の圧電効果により振動する。外部の発振回路から加える電圧の周波数と水晶素子が有する固有振動数が一致することで発振する。

水晶振動子は水晶素子の寸法が特性に大きく影響する。メインの振動モードが不要なスプリアスモードと結合すると、出力する周波数が不安定になる。そのため、スプリアスモードが発生しないような寸法や電極形状を設計する。しかしながら、水晶素子の小型化にともない、振動エネルギーが閉じ込めにくくなる為、漏れた振動に起因するスプリアスモードが数多く存在するようになる。この為、寸法や電極形状の最適な範囲が狭くなる。

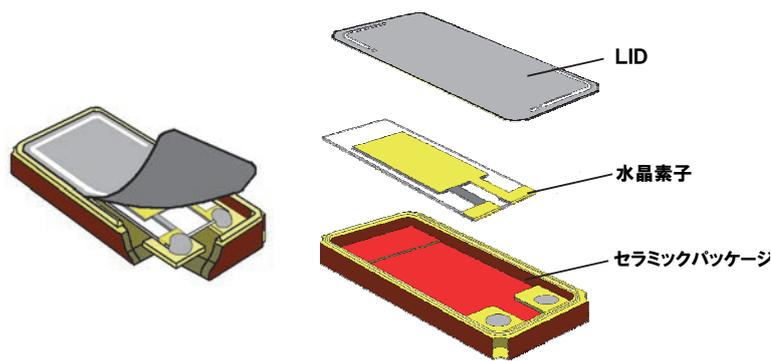


図1 水晶振動子のイメージ



図2 水晶振動子の写真（開封後）

従来、水晶素子は水晶のウエハから切断により個片化する工程と厚さ方向と幅方向の研磨を繰り返す、機械加工方式で作られていた。しかし、近年、小型の水晶素子実現に向け半導体フォトリソプロセスを使った工法が検討されている。この工法の適用により寸法精度が極めて高い水晶素子可以实现できる。その一方で、式(1)および図3に示されるように水晶素子の厚さが発振周波数を決めるため、半導体フォトリソプロセスで水晶素子を作製するためには、厚さのばらつきの少ない水晶ウエハを作製する事が必要不可欠であった。

$$f_0 = 1.67 \times \frac{n}{t}$$

- f_0 : 共振周波数 (MHz)
- n : オーバートーン次数
- t : 厚さ (mm)

式(1)

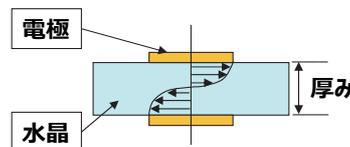
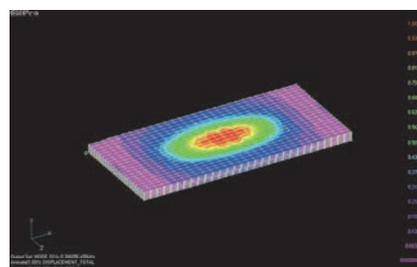


図3 水晶振動子の振動状態
(上 素子の変位量/下 断面)

2. 技術の概要

本研究の目的は、水晶ウエハの高精度加工技術をベースに、超小型化水晶振動子を開発するものである。

今回、大阪大学で開発したプラズマCVM (Chemical Vaporization Machining) 技術により、厚さばらつきの少ない、超高精度水晶ウエハを実現した。プラズマCVM技術は大阪大学の森勇藏名誉教授らが発明した工

法であり、高圧力雰囲気中で空間的に局在した高周波プラズマによって高密度の反応種を生成し、加工物表面原子と反応させて揮発性の物質に変えることにより除去を行う加工方法である（図4）。従来技術である研削や研磨などの工法では、加工物より固い工具（砥粒）を用いて削るため、加工速度は速いが工具の摩耗による加工精度の低下や結晶中に欠陥が入ってしまうことから、結晶品質の劣化や歩留りの低下が生じるという問題があった。また、研磨加工におけるウエハ厚さのばらつきは80nm程度であるが、その場合、水晶素子においてはウエハ面内で周波数が約3300 ppm程度ばらつく。

一方、プラズマCVM技術では、プラズマ中の中性ラジカルと加工表面の化学反応を利用するため、原子単位の加工が可能となり、外乱の影響を受けずに幾何学的に優れた加工面が得られる。さらに、材料本来の性質を損なうことなく、結晶学的観点からも極めて優れた加工面を創成できる。今回、山村准教授らと京セラ株式会社は、真空チャンバーを用いない大気開放型のプラズマCVM加工装置と水晶厚さの高精度均一化プロセスを共同で開発し、ウエハ厚さのばらつきを2nm以下に抑える事に成功した。その結果、水晶素子の周波数ばらつきを約80 ppmまで抑える事ができた（52 MHzにて計算）。

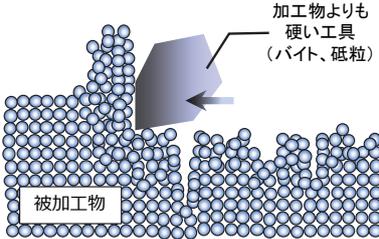
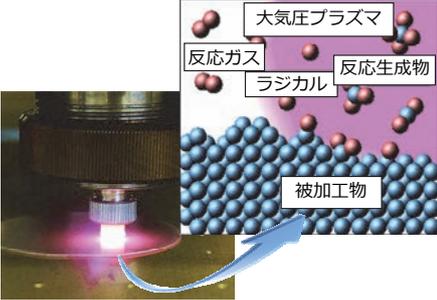
項目	機械加工	プラズマCVM
イメージ図	 <p>加工物よりも硬い工具（バイト、砥粒）</p> <p>被加工物</p>	 <p>大気圧プラズマ</p> <p>反応ガス</p> <p>ラジカル</p> <p>反応生成物</p> <p>被加工物</p>
加工原理	機械作用による材料欠陥の導入、運動、増殖を利用	プラズマにより生成したラジカルの化学反応を利用
加工精度	機械の精度、振動、熱変形等に依存したり、工具損耗により精度低下	加工量をプラズマの滞在時間で制御するため、機械の精度や外乱の影響を受けにくい
ダメージ	加工変質層が形成される	化学反応を利用するため、加工変質層がない

図4 プラズマCVM技術の説明

プラズマCVM技術により高精度に加工したウエハをベースに、半導体フォトリソプロセスによる水晶素子の量産工程を構築し、超小型水晶振動子CX1210（サイズ1.2 mm×1.0 mm）の量産化に取り組んだ。

従来、機械加工方式では個片での周波数選別や調整が必要となり量産性に課題があったが、半導体フォトリソプロセスを用いた事で精度の高い水晶素子を作製できるようになり、個片での周波数選別や調整を行う事なく水晶素子を完成できるようになった。また、半導体フォトリソプロセスは、フォトマスクに多くの設計内容を入れられるため、同一ウエハ上に設計仕様の異なる水晶素子を多数作製する事ができる。これにより、水晶素子の設計期間を大幅に短縮できるようになった（京セラ株式会社での従来工法と比較し半分以下の期間）。これらの技術が構築できた事で、超小型水晶振動子CX1210を11種類製品化し、量産を開始した。また、さらなる小型品である世界最小サイズの水晶振動子CX1008（サイズ1.0 mm×0.8 mm）の開発も完了した（図5）。

3. 効果

本技術の構築により、超小型の水晶振動子を安定して世の中に提供できるようになった。これにより、スマートフォンやウェアラブル端末の高機能化や大容量化に貢献できたと考えている。また、補聴器や医療カプセルの小型化など、高齢化社会に向けて、使い勝手の良い医療機器の提供に貢献できたと考えている。今後、これらの技術をベースに、車載向け低周波帯振動子、基地局向け高周波帯振動子や高精度発振器など、さまざまな製品の開発を加速し、今後発展が期待される第5世代移動通信システムや先進運転支援システム(ADAS)、IoTなどが進展する社会を支えていく。

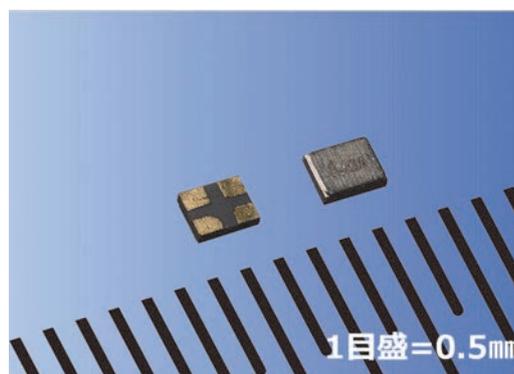


図5 世界最小サイズの水晶振動子 CX1008