

論文の内容の要旨

論文題目 水熱合成法 PZT 薄膜を用いた縦振動プローブセンサ

氏名 神田 岳文

はじめに

半導体製造技術などの各種加工技術の微細化に伴い、高分解能の表面形状測定システムが必要とされている。既存の測定技術では、AFM のように分解能が高いが測定ストロークが短いこと、あるいは表面粗さ計のように接触圧力が高く、測定対象物に対して損傷を与えることなどの問題があった。本研究では、AFM などの SPM に準ずるサブナノの分解能を持ち、 $0.1\mu\text{N}$ 以下と表面粗さ計よりも測定力が低く、数 mm 角程度の範囲で形状測定を行い、工作機械で加工中の物体や液中の試料等の形状測定が可能な形状測定システムの実現を目指し、このようなシステムを構成するのに必要な、プローブセンサについて、試作、評価を行った。

原理と構造

センサによる形状測定のイメージを Fig.1 に示す。センサは縦振動 2 分の 1 波長共振させる振動子からなり、この節の部分をサポートする。振動子のホーン先端を測定対象へ近づけ、このときの共振状態の変化を測定することにより、

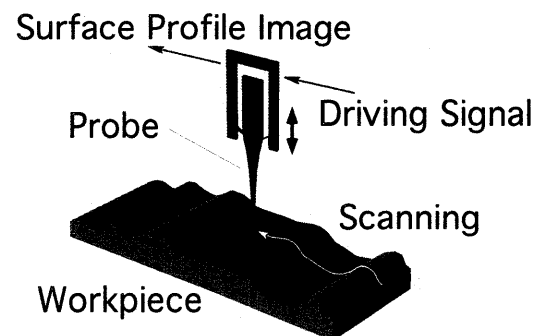


Fig.1 プローブセンサによる表面形状の測定

近接状態、接触を検出する。

このセンサでは縦振動の共振状態の変化を接触、近接の検出に用いている。一般に、AFMなどのSPMでは、カンチレバーのたわみ振動が用いられている。これに対し、縦振動子は粘性抵抗の影響が小さく、また共振周波数が高いなどの利点があり、カンチレバーに比べて高分解能・高速走査を実現できると考えられる。

Fig.2 に試作したセンサの振動子の構造を示す。振動子は板状であり、圧電体であるPZTの薄膜が水熱合成法[1, 2]により成膜されている。このPZT薄膜の表面に加振用、振動検出用の電極を設けた。振動子の長さは9.8mmであり、またチタン芯材の厚さは100 μ m、PZT膜の厚さ10 μ m、ホーンによる振幅拡大率は3.2である。

本研究では、圧電体PZTの成膜に、水熱合成法を用い、印加電圧と振動速度、振動振幅について、線形性の高い縦振動子を実現した。Fig.3に水熱合成法によって成膜されたPZT薄膜表面のSEM写真を示す。

振動子の特性と検出分解能の評価

振動子の振動振幅と検出電圧の関係を測定した。印加電圧は3V_{pp}である。また、検出電圧の測定には、プリアンプとして差動増幅回路を用い、Fig.3に示す参照電極と検出電極の間の電位差を測定した測定結果をFig.4に示す。このとき振動振幅は126 nm_{o-p}、Q値は705、検出電圧は3.4 mV_{rms}である。

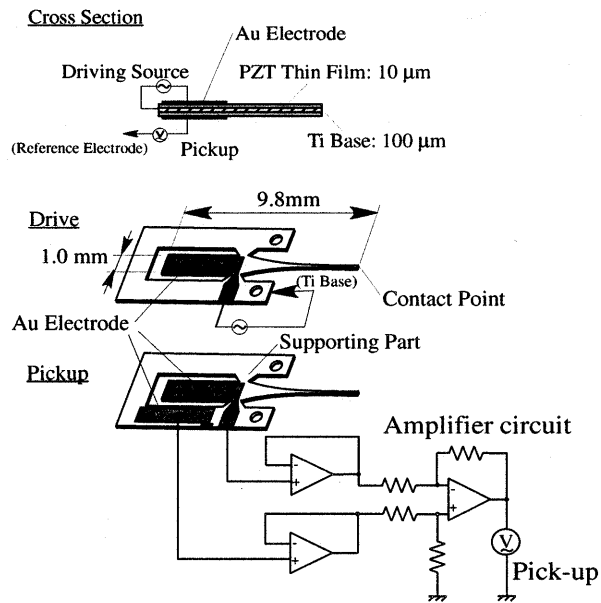


Fig.2 試作したセンサの構造

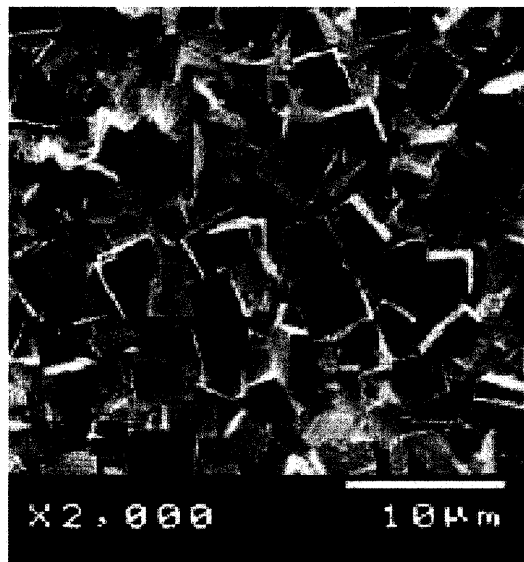


Fig.3 水熱合成法によって成膜されたPZT薄膜表面のSEM写真

振動子を試料表面に近づけた時の検出電圧の値 V と振動子先端の変位 d の関係を、Fig.5 に示す。Fig.5 で各部分は、左側から、自由振動時、周期的接触（タッピングモード）時、完全接触時を表すものと考えられる。このとき、周期的接触時のグラフ上での傾斜が急であるほど感度が高いといえる。このことから、感度 P を

$$P = \delta V / \delta d \quad (1)$$

と定義する。

センサの感度から、センサの形状測定時の垂直方向の接触検出分解能を求めることができる。最小検出電圧を V_{min} 、差動増幅回路のノイズレベルを v_m 、差動増幅回路の増幅率を G とするとき、センサの分解能 R_s は、

$$V_{min} = v_m / G \quad (2)$$

として、

$$R_s = V_{min} / P \quad (3)$$

となる。Fig.5 の測定結果から、分解能は 2.4 nm であった。

分解能の向上

分解能を向上する方法

分解能を向上する方法としては、式(3)から、感度 P の増大と、ノイズレベル v_m

の減少の二種類の方法が考えられる。感度 P は、圧電定数 e_{31} にほぼ比例する。このため、PZT 薄膜の圧電特性を向上することによって感度の向上が可能である。また、振動子の小型化・高周波化によっても感度の向上が可能である。

PZT の成膜プロセスの改善

センサの感度は圧電定数 e_{31} に比例し、分解能は感度に反比例する。測定から、水熱合成法によって成膜された PZT 薄膜の圧電定数 e_{31} は、PZT のバルク材料の 4.3 % に過ぎないことがわかった。また d_{31} は -34.2 pC/N である。この値はバルク材料での圧電定数 d_{31} の値 -93.6 pC/N[3] の 37 % である。圧電定数 e_{31} は d_{31} と弾性スティフネスの積に依存する。したがって、水熱合成法による薄膜のヤング率の値を増大させることによって圧電定数 e_{31} が

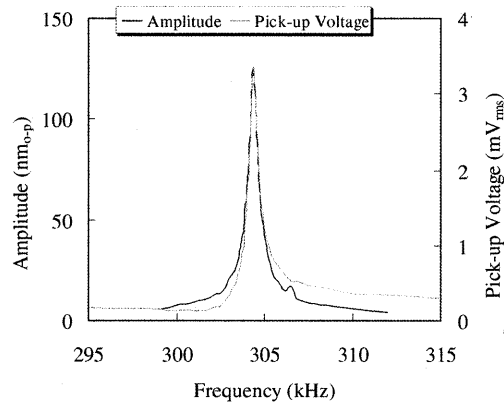


Fig.4 振動子先端での振動振幅と検出電圧の関係

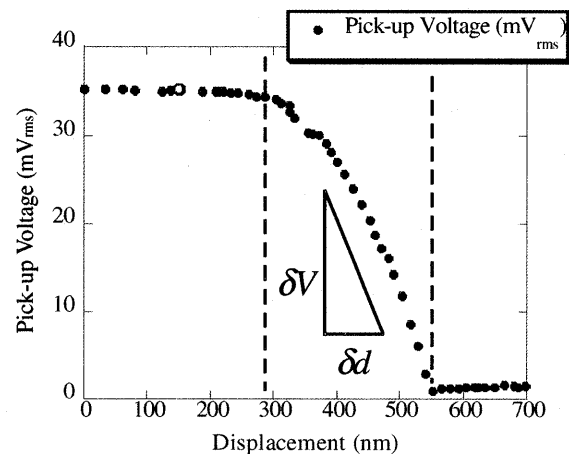


Fig.5 測定対象物表面への接近時の検出電圧の変化

改善され、感度が向上する。

ノイズレベルの低減

ノイズレベル v_m は、回路における雑音と、振動子での雑音の振幅値の二乗和の平方根をとったものに相当する。振動子において、発生する雑音は、電気的な雑音源によるものと機械的なものがある。機械的なものとしては、振動子の熱振動による雑音あげられる。

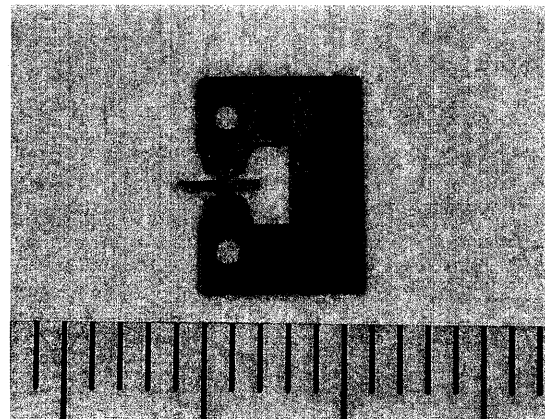


Fig.6 小型化した振動子

センサに用いる縦振動子について、ノイズ分に相当する振動振幅の値を計算した。

熱振動ノイズに比ベジョンソンノイズによる振幅が 50 倍以上大きく、支配的であるといえる。回路、伝送線路における雑音発生がないものとして、振動子において発生するノイズの値から、センサの理論分解能を求めると 35 pm となった。

上記のように、振動子のノイズできまる分解能は 35 pm であるが、プリアンプ回路出力から求められる分解能は 2.4 nm である。すなわち、振動子におけるノイズレベルよりも、プリアンプ回路内部で発生するノイズレベルのほうが支配的であることがわかる。今回、使用したオペアンプ LF356 の仕様から、増幅回路において発生する雑音を求めると、プリアンプ（差動増幅）回路において内部で、発生するノイズレベルは、0.45 mV となり、測定値とほぼ等しい。

振動子の小型化

センサの分解能を高め、さらに応答周波数を高くするためには、小型化による高周波化を進めることが有効である。

Fig.8 に示すように、より小型のセンサの試作を行い、振動振幅の測定を行った。振動子の構造は従来と同様である。振動子の長さは 3.0 mm であり、先端の幅は 0.1 mm、反対側の幅は 0.3 mm である。また、振動子の厚さは 0.1 mm である。縦振動速度、縦振動振幅、共振周波数、振動の Q 値は、それぞれ 2.4×10^{-2} m/s、4.1 nm_{o-p}、937 kHz、394 となった。試作した振動子について感度を求めると、 1.0×10^{-1} mV/nm となり、従来の振動子の感度 2.0×10^{-2} mV/nm の 5.0 倍となって感度は向上した。

まとめ

水熱合成法 PZT 薄膜を用いた縦振動プローブ接触センサについて、試作を行い、感度、分解能の評価を行った。線形性に優れた振動子を実現し、ナノメートルオーダーで垂直方向の分解能は確認できたが、サブナノメートルオーダーの分解能での測定のためには、さらに改良が必要である。これには、PZT の圧電定数の向上、振動子の小型・高周波化が有効であり、ノイズレベルの低下が必要である。

参考文献.

- [1] K. Shimomura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.30, 9B, p2174-2177, 1991.
- [2] T.Morita et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, No.36 5B, pp.2998-2999, 1997.
- [3] B.Jaffe et al : "Piezoelectric Ceramics", Academic Press, London, 1971.