

論文の内容の要旨

論文題目

Fabrication and Evaluation of Nanometric Oscillators

ナノメートルオーダーの機械振動子の作製と特性評価

東京大学生産技術研究所

精密機械工学専攻 87071 佐谷大輔

1. はじめに

非接触モード原子間力顕微鏡 (AFM) では先端に鋭利な探針のある長さ数百 μm ほどのカンチレバーが用いられ、探針と観察試料表面の間に作用する力勾配をカンチレバーの共振周波数変化から検出する。AFM の感度向上のために最小検出可能力勾配を下げるにはカンチレバーの微小化が望まれる。それは、微小カンチレバーは高い共振周波数を持つからである。我々は大きさが 100nm から 3 μm で振動のための質量-バネから構成されるナノ振動子を作製して、AFM としての微小力検出や質量検出への応用を目指している。

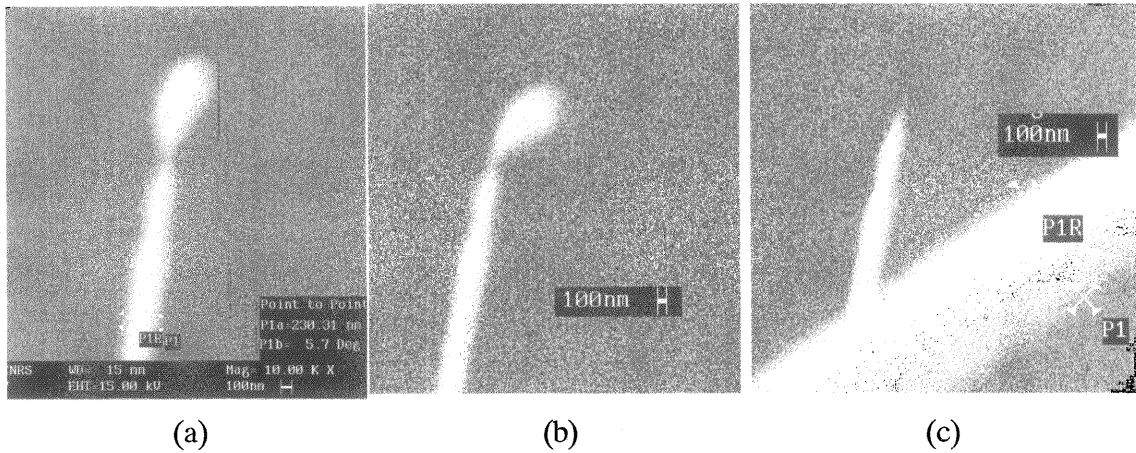
2. 金属微小探針の真空中での加熱によるナノ振動子の作製

電気化学エッチングにとりえられた直径 100nm ほどの微小金属探針を真空中で加熱すると表面拡散のみまたは表面拡散と蒸発により形状が変化する。テーパが少ない場合下の部分にくびれが生じ先端部分は球状になる。それがやがて分裂に至るが分裂直前で加熱を止めることでナノカンチレバーの形状を得る。

60分の加熱で Figure 1(a)のようにナノ振動子が形成された。作製したナノ振動子を機械的に押すことで弾力性を確認するために、3次元位置決め装置により微小探針をナノ振動子に近づけていき接触させた。ナノ振動子の根元の部分に接触してナノ振動子が Figure 1(b)のようにやや曲がった。

Figure 1(c)のようにボールの部分に接触してボールは容易に壊れた。

この実験で得たナノ振動子はもろい事が分かった。作製の再現性も良くなかった。



(a) 1時間の加熱で得られたナノ振動子
 (b) ナノ振動子のベースを他の梁でたたいた後のナノ振動子の変形
 (c) ナノ振動子のボールを他の梁でたたいた後

3. シリコン基板を用いて微細加工技術によるナノ振動子作製

より再現性の高い丈夫なナノ振動子の作製を目指して、Si 基板を用いて半導体製造技術によりナノ振動子を作製する。Si 微細加工技術は既に確立されており、大量生産も期待できる。

(1) SiO₂ 細ネックのナノ振動子

作製には SOI(silicon on insulator)ウエハを用いる。SOI は top Si/ buried SiO₂/ substrate Si の3層からなる。まず KOH による異方性エッチングと Si の局部酸化を用いる方法で SOI の上部 Si 層を Si 三角錐形状にエッチングする。Si 三角錐の大きさは SOI ウエハの上層 Si の膜厚で決まる。そのために、リソグラフィ技術の精度に依存しないで、Si 三角錐が作製できる。それにより高い再現性、均一性をもった作製が可能となる。そして、buried SiO₂ 層を Si 三角錐をマスクとして CHF₃ ガスの反応性イオンエッチングにより垂直にエッチングし、Si-SiO₂ のコラムを形成する。そして緩衝フッ酸(BHF)により Si-SiO₂ のコラムの SiO₂ 層をエッチングして細らせ、バネ部分を形成する。Figure2 に作製した Si 三角錐を質量とするナノ振動子の SEM 像を示す。ネックの径は 100nm である。計算によると共振周波数 5 MHz でバネ定数は 0.1N/m である。

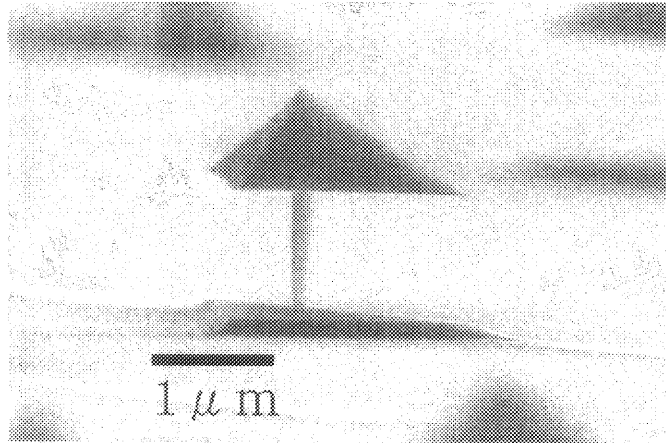


Figure 2. Si 三角錐 型 SiO₂ 細ネック振動子の SEM 像

(2) 斜め蒸着 Si を板バネとするナノ振動子、平行バネ振動子

まず (1) の作製と同様に、Si 三角錐を作り、Si-SiO₂ コラムを形成する。次に Si をスパッタにより斜め蒸着し SiO₂ 層を犠牲層として完全に除去すると、Si を板バネとする振動子が形成される。Figure3 に斜め蒸着 Si を板バネとするナノ振動子の SEM 像を示す。板バネの膜厚 100nm で、計算ではバネ定数は 3N/m、共振周波数、18MHz である。バネの厚さはスパッタの蒸着量で容易に制御可能であり、より高い再現性、均一性を持った作製が可能となる。

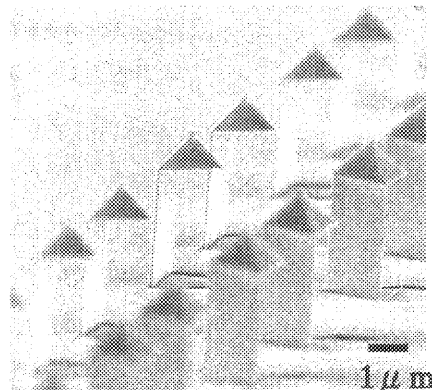


Figure 3. 斜め蒸着による Si の板バネナノ振動子の SEM 像

(3) マルチプローブカンチレバー（単結晶 Si 微小カンチレバー）の作製

バネと探針が一体化した単結晶 Si でできた微小カンチレバーの作製法を考えた。このカンチレバーの作製行程は3回の KOH の異方性エッチングと 2 回の Si 局所酸化によりカンチレバーの面を形成していくものである。この手法により 1 μm から 3 μm 程度の長さで、先端に探針のある単結晶 Si カンチレバーを結晶の異方性を利用することでリソグラフィ技術の精度に依存しないで作製する事に成功した。Figure 4 に単結晶 Si カンチレバーの SEM 像を示す。バネの厚さは 30nm で、計算ではバネ定数 0.1N/m、共振周波数 3MHz である。この方法ではカンチレバーが 10 μm の間隔でアレー状に形成可能であり、1mm 四方に 1 万本のカンチレバーが形成され、マルチプローブ

カンチレバーアレーとして、それを用いた微小領域の走査を一括して行うための AFM の実現を目指している。

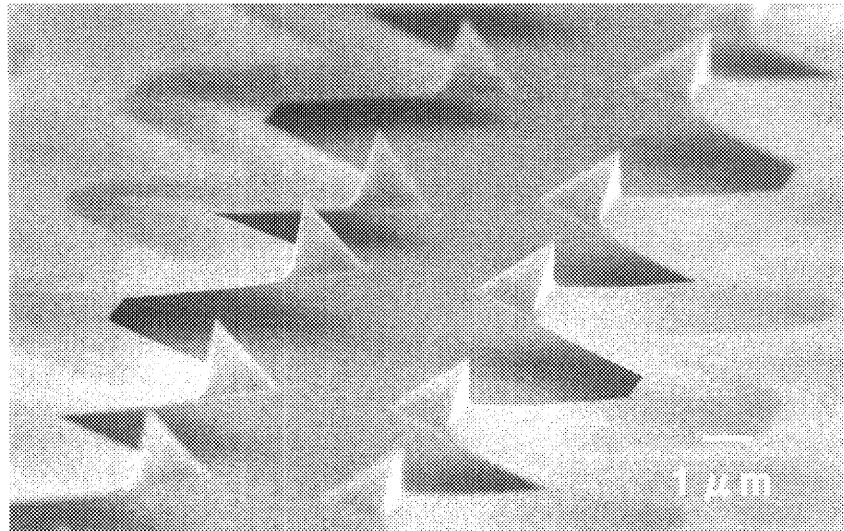


Figure 4. マルチプローブカンチレバーアレーの SEM 像

4. ナノ振動子の静的機械特性

作製したナノ振動子の静的特性を測定するために SEM-AFM を用いて市販の AFM 用カンチレバーや STM 探針によってナノ振動子を押し実験を行った。Figure5(a)のような真直なネックの場合は、ネックが均等に変形している。これは振動子が高いQ値を持つことを示唆している。大きく変形させると塑性変形、または破断した。頸部は 1GPa 程度の強度を有し、AFM 探針として用いた場合の微小力検出のための十分な強度を有することが確認できた。

また単結晶 Si カンチレバーを STM 探針で押し実験を行った。Figure5(b)のように変形しその後 STM 探針を離れたところ、元に戻り弾性変形をしているのが確認された。さらに強く押したところ SiO₂ 層で支えられた部分で割れた。単結晶 Si カンチレバーは塑性変形はみられなかった。

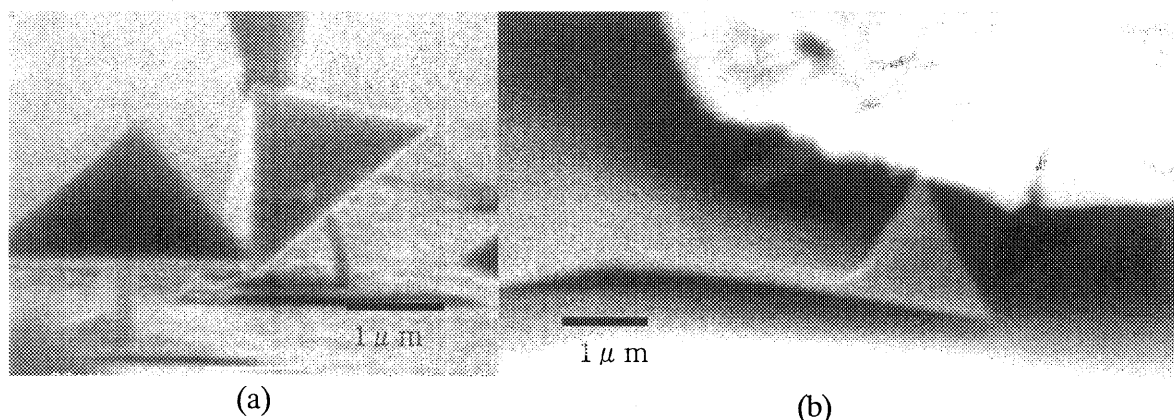


Figure5. ナノ振動子の変形

5. ナノ振動子の動的機械特性

長さ $8\ \mu\text{m}$ の単結晶 Si カンチレバーをピエゾで振動励起し、Laser Doppler 振動計で振動の測定を行った。振動は真空中 (10^{-6} torr) で行った。Figure6 にスペクトラムを示す。共振周波数は 1.2MHz ほどで Q 値は $10,000$ ほどであった。これらの特性からこのカンチレバーは 1×10^{-16} N であると分かった。

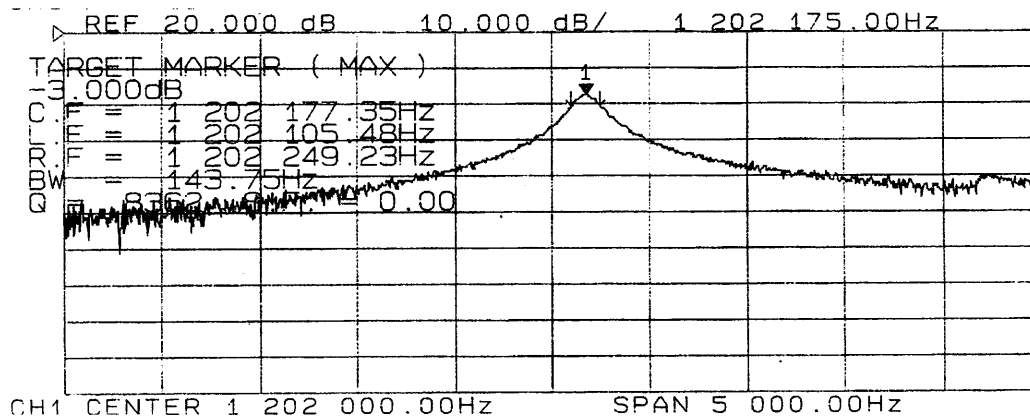


Figure 6. 単結晶 Si カンチレバーのスペクトラム

6. おわりに

Si 基板を用いて大きさが 100nm から数 μm のナノ振動子を再現性良く作製することに成功した。作製方法の都合上、ナノ振動子の形状は限られたものであるが、作製の際のパラメータを変えることで、理想の機械特性を持つ振動子を作りあげることが可能である。機械特性測定の結果、AFM 用の微小力センサーとして十分な強度、弾性を持つことが分かった。そして、 $1 \times 10^{-16}\text{N}$ 程の力の検出が可能であることが分かった。今後は、ナノ振動子の振動の励起検出方法を確立し、ナノ振動子を用いた AFM の装置をセットアップする。また、数万オーダの微小カンチレバーアレーの一斉の振動の励起と検出方法を確立し、AFM の一括走査を行う。