

論文内容の要旨

論文題目 Force Sensing Piezoresistive Probes for Biophysical Manipulation

(生物物理マニピュレーションのための力測定プローブ)

氏名 ゲル ムラト

自然界の分子モーターを理解することで、ナノスケールのデバイスの実現により近づくことができる。現在、それらの物質の操作は主に光ピンセットやマイクロガラス管、または AFM カンチレバーによって行われている。これらは、高い力感度を得るためには有効なツールとなるが、ナノスケールでのリアルタイムの現象を理解するためには時間分解能が十分ではない。光ピンセットとマイクロガラス管では、ビデオ映像を使って変位を測定しているので、ビデオシステムの性能によってサンプリングレートが制限されてしまう。AFM カンチレバーは先端の光変位を用いているが、カンチレバーの共振周波数の制限があるため、計測の際に狭い帯域幅しか得られない。

広い帯域幅を得るためにはカンチレバーの共振周波数を高める必要があり、そのためにはカンチレバーの幅と長さをできるだけ小さくしなくてはならない。しかし、そのように作ると、カンチレバーの先端の裏側から反射する光の強度が著しく減少してしまう。非常に複雑で高価な光学系を組まなければ光変位法を用いて高い時間分解能を得るのは非常に難しい。高感度の piezoresistive カンチレバーを作るには、その厚さと幅をできる限り小さくする必要がある。カンチレバーの厚さがサブマイクロンの大きさにまで小さくなると、カンチレバーの表面に非常に限られたセンシング領域を作るのは難しくなる。本研究では、これらの問題を解決するための二つの新しい方法を研究した。

一つ目の方法は、高エネルギーのイオンを注入することで原子レベルにおいて結晶構造を破壊し、カンチレバー断面に導電性の勾配を生成するという方法に基づいている。イオン注入によって生成されるアモルファス層の深さは注入エネルギーを調整することで制御可能である。Figure 1 ではこの方法の原理を示す。Figure 2 はこの方法で試作されたカンチレバーである。ホウ素のドーピングと KOH のエッチングによって 500nm の厚さのカンチレバーを試作した。圧電型アクチュエータを用いてカンチレバーの先端を動かすことで変位の感度を測定した。イオン注入による感度の向上を測定した。全注入量を $35 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ とした時、初期変位感度 $1 \times 10^{-7} \text{ 1/}$ に対して最高変位感度は $8.24 \times 10^{-7} \text{ 1/}$ にまで向上した。

二つ目の方法は、プロキシミティ・ラピッド・サーマル・ディフュージョン法 (RTD) を用い、カンチレバーの表面に浅い接合を生成する。RTD 法のプロセスでは、ソースとターゲットウエハを近接に設置することでドーパントをソースから蒸発させ、ターゲットウエハに拡散させる。この方法によって厚さ 340nm の piezoresistive カンチレバーを試作した。Figure 3 が試作したカンチレバーである。実験によって、このタイプのカンチレバーを使うことで数百 pN の力を容易に検出できることが分かった。Figure 4 はカンチレバーが

36nm のステップで押されたときのデータを示す。カンチレバーは RTD 法によってドーパされた SOI ウエハを用いて試作した。変位感度は圧電型アクチュエータでカンチレバーの先端を動かすことで計測した。その結果、変位感度は $1.7 \times 10^{-7} \text{ 1/}$ であることが分かった。計算によると弾性係数は 16 pN/nm である。力感度を向上させるために、酸化と HF エッチングによってより薄いカンチレバーを試作し、その共振特性を測定した。厚さが $65 \sim 80 \text{ nm}$ で共振周波数が 4.6 kHz のものと、厚さが $175 \sim 230 \text{ nm}$ で共振周波数が 11 kHz のものをそれぞれ試作した。これらのカンチレバーの弾性係数は $0.1 \sim 1 \text{ pN/nm}$ であり、分子間マニピュレーションに要求される範囲を満たしている。

さらに、バイオアッセイでのカンチレバーチップの応用についても研究した。バイオアッセイのカバーガラスの間に固定できるようにカンチレバーチップを設計した。カンチレバーを垂直な位置に固定することで、倒立顕微鏡で分子の現象を観察しながら同時に力の計測ができるという利点を持つ。カンチレバーチップをガラス表面に近づけるために、可撓性を持つ構造を設計した。

結論として、サブマイクロンの厚さを持つピエゾ抵抗型カンチレバーの感度を向上させる二つの新しい方法を研究した。結果から、超薄型の高感度カンチレバーを試作するのに有効であることが示された。また、この研究で述べた方法を使うことで分子マニピュレーションに必要とされる範囲の弾性定数値を備えたカンチレバーを試作できることが示された。

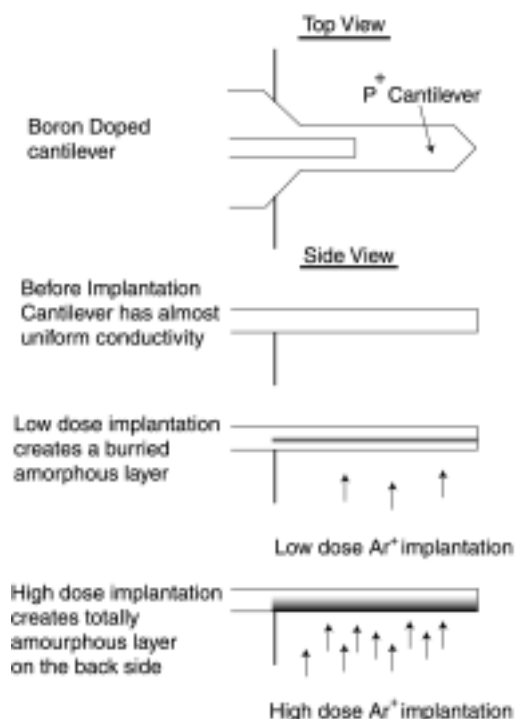


Figure 1 アルゴン注入によって感度を向上させる方法の原理図

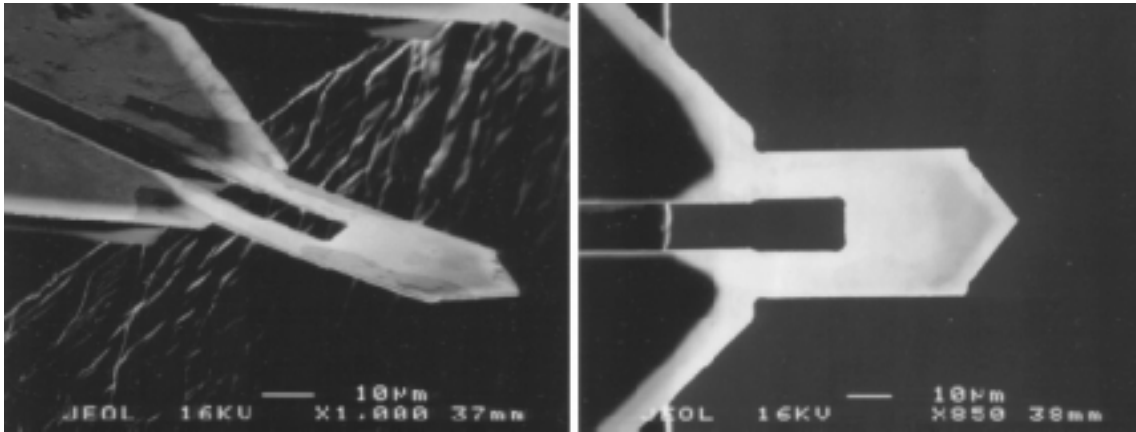


Figure 2 注入後の試作されたカンチレバー

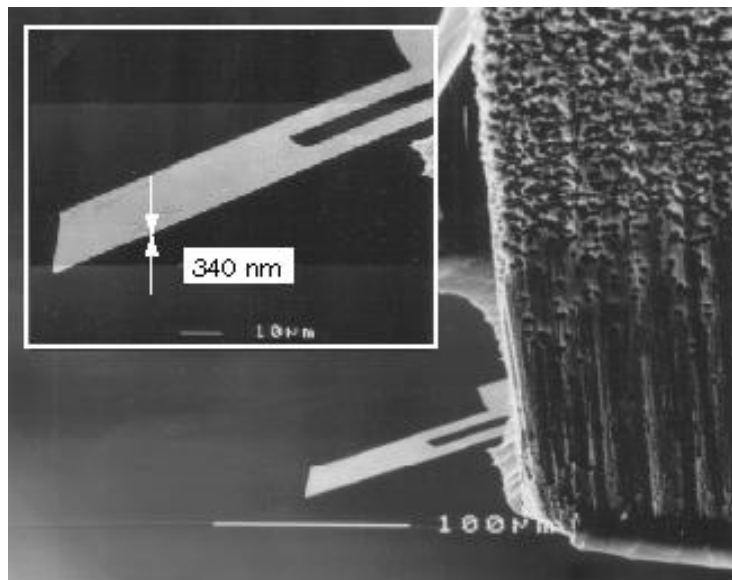


Figure 3 ラピッド・サーマル・ディフュージョン法によってドーブされたカンチレバー

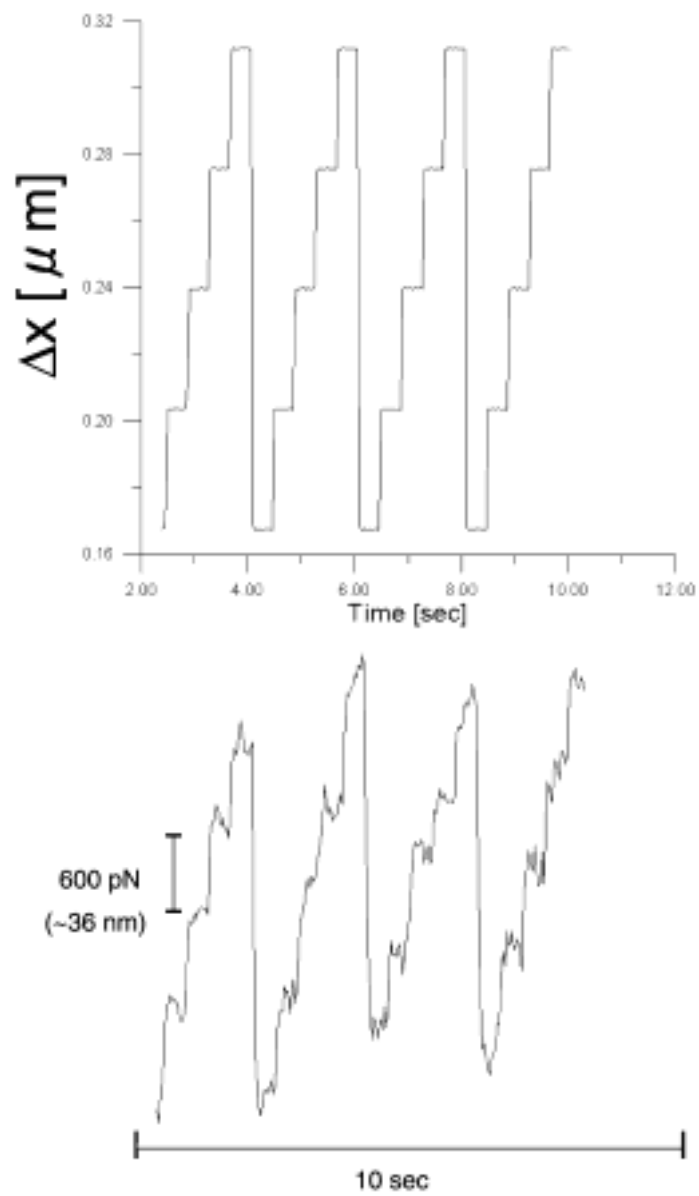


Figure 4 (上) 36nm ステップで動く圧電型アクチュエータの動作
 (下) 圧電型アクチュエータでカンチレバーの先端が押されたときの出力信号