

論文の内容の要旨

論文題目 MEMS 針端の形状変化の TEM その場観察と電気・機械特性の同時測定

氏名 石田 忠

ムーアの法則に則った持続的な半導体技術に代表される工業製品の微細化に対して、ナノテクノロジーは大きく貢献しており、今後の微細化のブレークスルーにはナノテクノロジーの発展が不可欠であるといえる。1980年に走査型トンネル顕微鏡 (STM) が開発されたことで、原子レベルでの表面観察や単原子操作が可能となり、人類は原子レベルの世界への扉を開いた。しかし、STM は探針と試料の間に高電界が発生するため、探針と試料の表面において形状変化が起こっている可能性があった。そこで、STM と透過型電子顕微鏡 (TEM) を組み合わせた装置を用いて、探針-試料間の形状変化を可視化する研究が行われた。この STM と TEM を組み合わせた特別な装置によって、たとえば、ナノサイズにとがった針を互いに近づけると接合し、引き離すとナノワイヤとして伸びるという現象を見出した。ところが、このシステムは装置が複雑であることや、さらに応力、電界、熱などナノ構造をとりまく環境を変えた実験を行う際にはさらに装置が複雑になるという問題があった。そこで本研究では、同等の実験を行える MEMS デバイスを TEM に挿入することでこの問題を解決することを提案した。

第2章では、上述の MEMS デバイスの設計を論じた。TEM 内で STM 探針-試料間における現象と同等の現象を引き起こし、安定した実験を行うことが可能なツールとして、ナノ界面研究用 MEMS (MINI) を設計した。設計した条件を実現するために MINI を作製するためにさまざまな方法を考案し、シリコン対向探針、金対向探針、金対シリコン対向探針をもった3種類の MINI の作製方法を確立した。

第3章では、実験で使用した TEM と TEM 電子ビームがナノレベルの形状変化に与える影響を論じた。対向探針間の現象を観察する方法として TEM を使い、TEM 試料室内部で MEMS を駆動するための試料ホルダを利用することで、原子レベルで対向探針先端形状とその動きを観察しながら電氣的・機械的測定を行うための可視化計測系を開発した。TEM 電子線による観察対象への影響についての考察を行い、電氣的・機械的特性への影響を実験的に調べた。また、本論文で行った対向探針間のナノ界面における実験と、探針間に形成するナノ構造の電氣的特性と機械的特性の評価方法について説明した。

第4章では、シリコン探針 MINI を TEM 試料室に挿入し、TEM の観察を行いながらシリコン探針 MINI を駆動する実験について述べた。シリコン探針 MINI に駆動電圧を印加することで可動探針が固定探針に接近し、対向探針間にナノコンタクトを形成した。ナノコンタクト形成後、それを引っ張り、最終的に破断させた。一連の過程において、シリコン対向探針先端の形状変化を観察し、同時に電氣的特性と機械的特性を測定した。TEM による観察により、シリコンナノコンタクトはバルクと異なり、非常に延性に富んだ変形をした。また TEM による観察の元、ナノコンタクトに電流を流してエレクトロマイグレーションによりシリコンナノコンタクトの形状変化や破断を行った。

第5章では、金探針 MINI を TEM 試料室に挿入し、TEM の観察を行いながら金探針 MINI を駆動する実験について述べた。シリコン MINI の実験同様、金対向探針を接近させ、探針間においてトンネル現象や原子の再配列による金ナノコンタクトの形成や引張試験を行った。金ナノコンタクトの引張過程において電流測定を行ったところ、形状変化に伴いコンダクタンスが量子化コンダクタンスの値に対応して階段状に減少することを確認した。対向探針間のバイアス電圧を変えることで対向探針の接触により形成されるナノコンタクトのサイズが変わることや、ナノコンタクトの引張方向を変えることでナノコンタクトの形状が大きく変わることを見出した。また、エレクトロマイグレーションによる金ナノコンタクトが形状変化し破断にいたる過程を観察し、同時に電流測定を行った。

第6章では、金対シリコン探針 MINI を TEM 試料室に挿入し、TEM の観察を行いながら金対シリコン MINI を駆動する実験について述べた。金探針とシリコン探針を接触させ 100 μA 程度の電流を金とシリコンの界面に流すことで、金がシリコン探針上を拡散する様子や、金対シリコン探針間において放電を起こすことで金ナノクラスターをシリコン探針上に散布し、金ナノクラスターがシリコン探針内部へ室温で拡散する様子を可視化した。

第7章においては、ナノ界面におけるさまざまな現象の観察と特性評価を実現した MINI が、ナノ領域を研究に対して非常に有効なツールであることについて述べた。特に MINI にマイクロヒーターやマルチプローブといった MEMS デバイスを集積化することで、従来手法では困難なナノコンタクトの引張試験における温度の影響やマルチプローブを用いたナノコンタクトのデバイス化などを実現可能である。