

氏名(本籍)	まつ だ とも こ (岡山県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第5296号		
学位授与年月日	平成22年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	金とパラジウムナノメートル接点の構造と物性		
主査	筑波大学准教授	工学博士	木塚 徳 志
副査	筑波大学教授	理学博士	大嶋 建 一
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田 眞 司
副査	筑波大学准教授	工学博士	金 熙 榮

論 文 の 内 容 の 要 旨

本論文では、その場高分解能透過電子顕微鏡法を用いてコンダクタンスの量子化を示す金ナノメートル接点と量子化を示さないパラジウムナノメートル接点の構造ダイナミクス、電気伝導特性および機械的特性が調べられ、金属ナノメートル接点の構造と物性が明らかにされた。実験には、高分解能透過電子顕微鏡を母体とし、走査トンネル顕微鏡と原子間力顕微鏡の機能を組み入れたその場電子顕微鏡が用いられた。この顕微鏡の試料室内で、アルゴンイオン研磨により、ナノメートルサイズまで先鋭化した金あるいはパラジウムの薄板と、シリコンカンチレバーに金あるいはパラジウムを堆積させた探針を接触させて、室温で金あるいはパラジウムの単一組成のナノメートル接点がそれぞれ作製された。その後、探針を薄板の先端から引き離し、それぞれのナノメートル接点を変形させた。この過程で、ナノメートル接点に直流あるいは交流電圧を印加してコンダクタンスが二端子法で測定された。一方、ナノメートル接点に作用する力が光てこ方式で測定された。接点を引っ張り変形させる他に、新たに組み込んだ電流帰還制御法を用いて、ある一定のコンダクタンスの値を示すナノメートル接点の構造が連続的に観察された。

金ナノメートル接点に13 mVの電圧を印加して、帰還回路によりコンダクタンスを $1G_0(=2e^2/h)$ 、 e は電子の電荷、 h はプランク定数)から $5G_0$ に制御したとき、 G_0 の整数倍の値を示す金ナノメートル接点は安定であった。ナノメートル接点の断面が小さくなる程、その安定性は増加することがわかった。 G_0 の整数倍の値を示す金ナノメートル接点を保持するためには張力が必要であり、これはバルクと異なるナノメートル接点特有の構造安定化条件であることが見出された。帰還制御を用いた実験の結果、異なる断面幅と長さをもつ複数の構造のナノメートル接点が、同じコンダクタンスを示すことが明らかになった。これは、構造とコンダクタンスの関係を与えるシャーピンの式で考えられていた、コンダクタンスと断面積が一对一で対応するという従来の認識と異なっていた。つまり、本研究により、コンダクタンスを決めるナノメートル接点の構造的な要素は断面積だけでなく、接点の収束角や収束部の長さなども考慮する必要があることが示された。引っ張り変形過程の金ナノメートル接点に振幅10mVの交流電圧を印加して、電流-電圧曲線を測定した結果、金ナノメートル接点の太さが小さくなるほど、電流-電圧特性の非線形性が増加することがわかった。

金ナノメートル接点のエレクトロマイグレーションは、電圧が約 80mV、電流が約 60 TA/m² のときに発生した。エレクトロマイグレーションによって金原子は負極から正極に移動し、ナノメートル接点に集積した。このときカンチレバーが反り、この復元力が作用してナノメートル接点に圧縮応力が作用して、エレクトロマイグレーション発生中でもすべり変形が生じた。

パラジウムナノメートル接点の引っ張り変形過程では、試料の回転をとまなう {111} <110> すべり変形が生じた。また、双晶境界が導入されたパラジウムナノメートル接点では、接点の最もくびれた領域のある双晶境界をすべり面としてすべりが生じた。複数のすべり系ですべりが生じた結果、引っ張り方向に垂直な方向に太さが均一な柱状構造のナノメートル接点（ナノメートルワイヤー）が形成された。引き離し変形が進行し、ナノメートル接点がさらに細くなると、一つの {111} をすべり面としてすべりが生じ、原子ワイヤーが形成された。パラジウムナノメートル接点の弾性限界歪みは 0.01 - 0.16、強度は 1.0 - 1.8 GPa、ヤング率は 3.4 - 28 GPa、および臨界せん断応力は 0.3 - 0.4 GPa であった。強度とヤング率をバルクパラジウムの値と比較すると、それぞれ 500 - 1000% および 5-14% であった。パラジウムナノメートル接点の臨界せん断応力の値から、金属ナノメートル接点のすべり変形は転位機構に基づくすべりではなく、同時すべりであることが示された。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文では、金ナノメートル接点とパラジウムナノメートル接点の構造と物性を明らかにすることを目的にして、実験研究が実施された。用いられた手法は、ナノメートル接点研究のために、独自に開発された、その場高分解能透過電子顕微鏡法であり、他の手法では不可能なナノメートル接点の原子ダイナミクス観察と物性評価がなされている。特に、電流帰還法を用いた、同一コンダクタンスを示すナノメートル接点構造の連続観察によって、従来、ナノメートル接点研究で中核的な問題であったコンダクタンスが量子化するときの構造が明らかにされた。すなわち、本研究で得られた成果は、従来の実験手法の限界により停滞していたナノメートル接点の研究の発展を促進し、ナノメートル接点に関わる物理現象の一般側を導くきっかけを与えている。本研究で得られた構造や各物性値は、金属ナノメートル接点が最先端デバイスへ応用されるとき基礎になると期待される。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。