

氏名	山田 浩平
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博 甲 第 7674 号
学位授与年月日	平成 28 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	

ジルコニウムとモリブデンナノメートル接点の構造と物性

主査	筑波大学教授	工学博士	木塚 徳志
副査	筑波大学教授	工学博士	金 熙榮
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	近藤 剛弘
副査	筑波大学講師	博士(理学)	柏木 隆成

論 文 の 要 旨

透過電子顕微鏡にコンダクタンス測定機能を組み入れた複合機能型透過電子顕微鏡を用いて、ナノメートルサイズのジルコニウム接点とモリブデン接点を引っ張り変形し、その過程をその場で観察し、同時に接点のコンダクタンスを測定した。動的に記録した構造観察結果を動画像の1フレームごとに原子配列レベルで解析した。各接点のコンダクタンスについては、測定した各時間-コンダクタンス関係からヒストグラムを作成して解析した。これらからナノ接点変形の原子ダイナミクスと機構、および変形の各段階で現れる構造の特徴とコンダクタンスの関係を明らかにした。また、ナノ接点が破断する前に現れる原子ワイヤーについて形成するときの条件と機構を調べた。

ジルコニウムナノ接点およびモリブデンナノ接点が数原子分にまで微細化すると、いずれの変形過程においても、粗大粒金属結晶や面心立方構造のナノ接点の変形を担うすべり変形ではなく、固体金属であっても液体状に原子が拡散的に移動して生じる塑性流動的変形が観察された。ジルコニウムナノ接点の変形では、接点サイズがこの臨界サイズよりも大きいときには、ジルコニウムの結晶構造である六方稠密構造に典型的な主すべり系に沿った底面すべり変形が生じて接点が微細化していった。その後、すべりが継続して接点両側の領域が反対方向にずれると、接点両側に隣接する半無限大の固定部に作用する復元力が大きくなり、すべり変形が抑制された。このために、接点が臨界サイズよりも小さくなったときに、六方稠密構造の主すべり系と必ずしも同じ方向にない引っ張り力が作用する方向に原子が拡散的に移動して変形せざるを得なくなった。面心立方構造金属の等価な主すべり系の数が 12 であるのに対して、六方稠密構造をもつジルコニウムの等価な主すべり系の数は 3 にすぎない。このために六方稠密構造の主すべり系と必ずしも同じ方向ではない方向にはすべり変形は起きにくく、その上、微細化によって転位機構が無効化して、最終的に塑性流動的な変形が生じると解釈された。これに対してモリブデンは体心

立方構造をもち、その主すべり系の多重度は面心立方構造金属のそれと同じである。しかし、金属の中でヤング率が高い(329 GPa)モリブデンのナノ接点の変形では、弾性歪みの量が小さいため、弾性変形して主すべり系に沿ったすべりが生じる条件が実現しにくく、その結果、塑性流動的な変形が生じたと解釈された。ジルコニウムとモリブデンのナノ接点の時間-コンダクタンス関係から作成されたヒストグラムには、ピークが現れたが、その位置は非周期であり、コンダクタンスの量子化は示さなかった。それらのピークに対応するコンダクタンス値は塑性流動的な変形によって形成させた構造のときに測定された。ナノ接点のコンダクタンスヒストグラムに現れるピークは、そのピークのコンダクタンス値に対応する複数の安定構造に起因する。つまり、塑性流動的な変形で形成される安定構造は不規則であり、これがコンダクタンスヒストグラムのピーク位置が非周期になる原因になっていると解釈された。また、Mo ナノ接点への印加電圧が150 mVまでのとき、接点の引っ張りによって原子ワイヤーが形成される平均的な確率は約5%であった。これらの結果から、Mo 原子ワイヤーの形成には、銀などの融点が比較的低い貴金属ナノ接点とは異なり、アンジップ過程や電子風力などのエレクトロマイグレーションではなく、機械的な引っ張り力の作用によって生じる原子の引き出しが主な要因になっていることがわかった。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

トランジスタやダイオードなどの電子素子サイズが数ナノメートルに達して、素子自体の微細化が限界を迎えている現在、電子回路や微細電気機械システムの究極的な集積化や微細化を実現する上で必要な構造要素が金属ナノ接点や原子ワイヤーである。従来、ナノ接点と原子ワイヤーの研究では、主にコンダクタンスの量子化が観察される面心立方構造をもつ貴金属のナノ接点に研究・開発の対象が集約した。このためナノ接点や原子ワイヤー研究の基礎となる接点の形成過程と機構、構造、機械的特性や電気伝導特性などの諸特性は、貴金属ナノ接点に関するものに限定されていた。本研究は、この問題を指摘し、結晶構造、融点や機械的性質等が異なる金属のナノ接点では、貴金属ナノ接点にはない機構で変形が生じて特異な構造が実現し、それに関連する新たな特性や機能が得られることを期待して行われた。具体的には、論文の要旨に記載したように、主すべり系の数が面心立方金属のそれに比べて4分の1しかない六方稠密構造金属であるジルコニウムと体心立方構造金属で融点とヤング率が高いモリブデンを材料種としたナノ接点に焦点を当てて研究を進めた。これらのナノ接点の変形過程では、従来の貴金属ナノ接点研究で知られていた転位運動を介在とする格子面すべりや、転位運動を介在しない高い臨界剪断応力が作用するときに現れる同時すべりとは異なる機構である塑性流動的な変形が初めて見出された。この特異な機構による変形では、結晶構造から大きく乱れた原子配列が形成されることを示した。さらに、この乱れた構造が、貴金属ナノ接点の電気伝導とはことなる電気伝導をもたらすことを明らかにした。こうした成果は、これまでのナノ接点と原子ワイヤー研究の欠落を補うだけでなく、これらの研究と開発に関する新たな分野を開拓する基礎になり、関係するナノ物質工学の発展に大きく貢献するものである。以上のことから、本論文は、著者に学位を与えるに十分な内容を含んでいると判断された。

〔最終試験結果〕

平成28年2月18日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、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。