

氏名(本籍)	樋口誠司(京都府)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第2569号
学位授与年月日	平成23年12月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	数理工学物質科学研究科
学位論文題目	走査マルチプローブトンネル顕微鏡システムのチューニングフォークプローブ利用による原子間力顕微鏡化に関する研究

主査	筑波大学教授	工学博士	重川秀実
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	小林伸彦
副査	筑波大学教授	理学博士	関口隆史
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	中山知信

論文の内容の要旨

我が国が技術立国で在り続けるためには、ナノテクノロジー分野での国際競争力を維持し、さらに高めていかねばならない。本学位論文は、この国際競争力の維持・強化に欠かすことのできないナノテクノロジー基盤技術の開発に関して、樋口誠司氏(以下、著者と略す)が筑波大学大学院数理工学物質科学研究科ならびに(株)堀場製作所において行なってきた研究の成果をまとめたものである。

著者は、年々進歩し続ける電子デバイスが近く直面するであろう2つの課題、原子・分子スケールの精緻な技術を利用して電子デバイスが作製されねばならないこと、そして現在の半導体シリコンに立脚したデバイス技術からの脱却が進まねばならないと指摘する。すなわち、原子・分子スケールの構造や材料、有機分子や生体材料をも含めた多様な材料などを活用して構築されるデバイスへの移行が今後の持続的な技術発展には必要であるが、これらの多様なナノ構造・ナノ材料の特性計測に関して確立した計測装置・方法論が存在していないことを説く。そこで、現段階において有力な解決策を与えると考えられる「走査マルチプローブ顕微鏡」を、汎用性の高いナノスケール計測技術に発展させることを研究目的とした(第1章)。この目的達成のために、著者は、走査マルチプローブ顕微鏡システム全体を統合的に制御する制御装置の開発(第2章)、走査マルチプローブ顕微鏡を用いた計測において必要不可欠な複数プローブ間の距離計測技術の開発(第3章)、走査マルチプローブ顕微鏡への原子間力顕微鏡機能付与に必要な新規プローブの開発(第4章)、さらに開発したプローブを用いた走査マルチプローブ顕微鏡の原子間力顕微鏡化とそれを用いた計測実例(第5章)を系統的に論述し、得られた成果を統括して本論文を締めくくる(第6章)。

走査マルチプローブ顕微鏡システムにおいて欠かすことができない制御装置に関しては、その雛形が既に存在していたが、電気信号処理部への改良を加えるのみならず、全体を一括制御するソフトウェアを完全に新規開発した。これにより、新しいユーザーインターフェースを通じて、複雑な各種操作を簡便に制御・管理できる環境が整った(第2章)。開発したソフトウェアに組み込まれた「プローブ間の相対的な位置認識機能」は、走査マルチプローブ顕微鏡によって得られる複数の画像に含まれる共通の特長を自動的に抽出し、複数のプローブが計測対象としている試料の上でどのような位置関係にあるかを瞬時に判定するものである。これは、多探針(多端子)計測を実施する上で、計測の精度や信頼性を確保するために必要不可欠な支

援ツールであり、走査プローブ顕微鏡関連装置の機能としては世界で初めて実現した（第3章）。

続いて、論文は、走査マルチプローブ顕微鏡によって多様な材料を取り扱うために避けて通ることのできない原子間力顕微鏡機能の付与について説明する。走査マルチプローブ顕微鏡で無ければ実現し得ない計測は、ナノスケール領域に複数のプローブを導入しての電気特性計測である。この場合、複数のプローブ先端が近接できるような幾何学的配置を実現しなければならないが、この目的に沿った原子間力顕微鏡用のプローブは存在していなかった。そこで、著者は新しい原子間力顕微鏡プローブを開発し、これを Angled-Long-Tip Tuning Fork Probe (AltTFP) と命名した。この AltTFP は、周波数変調モードで使用できるチューニングフォーク（音叉）タイプの振動型プローブであり、これまでは性能的に不利と考えられていた幾何学的構造を採用している。しかし、振動シミュレーションと実際の振動状態の観察を併用した構造の最適化によって、原子間力顕微鏡用プローブとして問題なく利用できることを実証した。興味深いことに、AltTFP を用いることによって、一般的に困難であると言われている、液中での周波数変調型原子間力顕微鏡観察が実現している。これは、水のダンピング低減効果が AltTFP プローブの採用によって得られたためであり、AltTFP の優れた特徴が示されている（第4章）。

第5章では、上で開発した走査マルチプローブ制御装置、AltTFP、独自開発した制御ソフトウェア、プローブ間の相対位置認識機能を組み上げて、所望の走査マルチプローブ顕微鏡の原子間力顕微鏡化を完成した。さらに、その性能をプローブの位置決め動作を駆使したマルチプローブ電気特性計測を通じて検証した。マルチプローブ電気特性計測が実現していることを示すために、著者は、既存の電子デバイス（MOS-FET）と今後の電子デバイス材料として注目されるグラフェン薄片を用い、それらの電気伝導計測を行なった。すなわち、従来型の電子デバイスがより微細になった場合のナノスケール特性検査のみならず、新しい電子デバイスのためのナノスケール材料開発という、ナノ材料研究の異なる場面で、走査マルチプローブ顕微鏡が活躍できる能力を獲得したことを実証した。

本論文は、走査マルチプローブ顕微鏡システムを原子間力顕微鏡化することによって、我が国のナノテクノロジーが世界に先駆けて新しい計測装置と手法を獲得したことを宣言している（第6章）。しかしながら、この成果が終着点ではなく、さらに多様な発展の余地が残されていることを指摘して論文を締めくくっている。

審査の結果の要旨

平成23年11月25日、審査委員が全員出席の上、一般聴衆にも審査を公開して数理工学科学研究科学学位論文審査委員会を開催した。著者による、論文内容の説明が行われ、活発な議論が行われた。質問内容は多岐にわたり、装置の安定性、計算機能を活用した場合の誤差、著者が開発した新規プローブの駆動モードと試料表面との相互作用の詳細、計測事例として説明したグラフェンの電気伝導度の妥当性、類似装置との優劣比較に関する自己評価、今後の方向性などに関して著者の知識と見解に基づいた回答を求めた。例えば、著者が開発した装置の制御ならびに計測結果の精度に関して、具体的な計測事例がない場合を想定して投げかけられた。これに対して著者自身が研究開発した装置の詳細な内容を踏まえて、想定される場合に対処する方法が説明された。また、時間の制約から、説明を省略した内容についても、質問者の意図に沿う内容で、適切な補足内容の説明があった。およそ30分間に渡り、審査委員ならびに出席した聴衆からの質問に対して真摯な質疑応答が行われ、公聴会を終了した。

公聴会終了後に審査委員全員が出席の上判定会議を行い、本論文に論述された研究の内容と質、ならびに公聴会における質疑応答などを再確認して、下記の結論に至った。

平成23年11月25日、数理工学科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、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。

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。