

審査の結果の要旨

氏名 郭 登極

近年、ナノスケールの構造体が発現する特異な現象、特性を活用した超微小デバイスの研究開発が活発に行われている。これらの研究開発において必要となるのが、任意の形状を達成するための共通性の高い作製技術基盤である。特に、高い構造自由度が要求される可動部を有するナノメカニカル素子や 3 次元電磁波制御が要求されるフォトニックデバイスに関する研究では、任意形状の立体ナノ・マイクロ構造作製が必要とされる。これを達成する微細加工技術の一つに、集束イオンビーム励起表面反応を利用した化学気相成長法 (focused-ion-beam chemical vapor deposition: FIB-CVD)がある。FIB-CVD は、ガス雰囲気下で FIB の照射位置・照射時間を高精度制御し、ナノ・マイクロスケールの立体構造体をボトムアップ形成する技術である。しかしながら、この FIB-CVD 技術は、数 μm 以下の寸法の構造体であれば任意の立体構造を構造形成可能であったものの、数 μm 以上の寸法の構造体、デバイス作製では、加工領域内で均一な堆積レートを維持できず、長尺立体構造の形成が困難であるという課題があった。

本論文では、上記課題を解決すべく、原料ガス濃度の不均一さ、熱や電荷の蓄積、イオンビーム偏向による収差の影響などの FIB-CVD において長尺水平オーバーハング構造の形成が困難である要因を整理するとともに、それらの要因に依存しない長尺オーバーハング構造の成長形状補正技術を提案した。長尺オーバーハング構造は、立体構造の基礎となる構造体である。本論文が提案する成長形状補正技術は、成長角度のその場計測技術と成長角度制御技術からなる。まず、成長角度のその場計測については、解析的アプローチによりその計測原理について詳細に説明している。成長途中の構造体へ FIB を照射することにより発生する二次電子放出量を計測し、その放出量から成長途中の構造体成長角度を判別するというのが、本論文で提案されたその場計測手法である。本論文では、これまで不明瞭であった FIB 照射位置と構造体成長端の幾何的關係、それに伴う二次電子放出量の変化について、イオンの固体内散乱、二次電子放出に関する理論を基礎として、オーバーハングナノワイヤ構造形成過程を解析的

に検証することで明らかにしている。また、その結果の妥当性についても実験事実に基づき確認している。

また、本論文では、構造成長途中にリアルタイムに FIB 照射量を変化させ成長角度を制御する手法が提案されている。本手法についても、成長角度のその場計測についての研究と同様に、イオンの固体内散乱、二次電子放出に関する理論を基盤とするとともに、これらにイオン照射量と堆積収率の関係性を加え、オーバーハングナノワイヤの成長角度を FIB の照射量によりリアルタイムに制御可能であることを解析的に示した。これにより二次電子放出が成長角度の決定にどのように寄与しているか等の構造成長における基礎的メカニズムを解明した。また、実験的にも、成長角度の FIB 照射量依存性や、上方斜め成長と下方斜め成長を組み合わせたオーバーハング Zigzag ナノワイヤの作製を示すことで、照射量による成長角度制御が可能であること実証している。

最終的に、上記のように構築した技術を水平長尺オーバーハング構造作製のための成長形状補正技術（描画装置）としてシステム化した。成長角度に依存する二次電子放出量を基板電流を介して計測し、その値に応じて単位時間当たりの FIB 照射量をフィードバック制御するというのが、構築された技術である。本論文では、FIB のアナログ走査方式、及び立体構造描画装置（3D-CAM）へ応用可能なドットスキャン方式について本技術の適用を図っている。アナログ走査方式へ本手法を適用することにより、これまで数 μm 程度に留まっていた水平ナノワイヤ形成を 30 μm 以上の長さで実行できることを示した。また、ナノメカニカル素子作製への応用を狙い、ナノワイヤの組成、機械的特性（ヤング率、密度）を明確にした。密度に関しては、加工条件とその特性の関係性をモデル化し、任意材料設計への指針を示した。加えて、ドットスキャン方式については、幅 300 nm の片持ち梁構造の作製において有効性を実証し、3D-CAM を用いた様々な形状の立体構造作製応用へのポテンシャルを示した。

本論文により提案された FIB-CVD における長尺構造形成のためのリアルタイム形状補正技術は、加工試料に特別な工夫が不要であり、走査速度の制御（描画装置）のみで実行可能であることに特徴がある。汎用性という点で様々なデバイス研究開発への応用が期待される。また、学術的には、FIB-CVD によるオーバーハング構造の成長機構、特にその形成過程における二次電子放出と堆積への寄与を明確にしたという点で意義が高い。技術的には、FIB-CVD 技術の構造作製自由度の向上に貢献しているとともに、独自に蓄積した学術的知見・アイデアを加工技術へ応用したという点で独創性が高いと評価できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。