

博士論文（要約）

集束イオンビーム化学気相成長法による
立体ナノ長尺構造形成に関する研究

郭 登極

1. 研究の背景と目的

近年、集束イオンビーム励起表面反応を用いた化学気相成長法(Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition: FIB-CVD)によりさまざまな三次元ナノ・マイクロスケールの機能デバイスを創製する研究が多く行われている。多様な立体ナノ構造を形成するのに、オーバーハング構造の形成が必要である。しかし、従来のFIB-CVDによる構造形成は一定の照射量にて行っており、通常オーバーハング構造の成長は数 μm になると、原料ガス密度の不均一、FIBの偏向による収差の影響、作製途中の電荷蓄積や熱蓄積などの原因により成長角度が徐々に下方になり、立体ナノ長尺構造を形成することができなかった。本研究では、FIB-CVDによる立体ナノ構造形成の自由度と精度を向上することを目的とし、オーバーハング構造の形成メカニズムを明らかにするとともに、立体ナノ長尺構造形成のための成長補正技術の構築を行った。

2. 研究の内容

2. 1 立体ナノ長尺構造の形成のための基礎技術

立体ナノ長尺構造を形成するために、構造の成長を制御する技術と成長角度を計測する技術が必要である。つまり、構造形成において、実時間に成長角度を計測し、成長角度が水平から外れた場合に構造成長を制御する技術が必要となる。

構造成長制御の可能性を探るために、FIB照射量制御による構造成長のシミュレーションを行った。(1) イオンの一点での入射、(2) Gaussian分布のFIBの照射、(3) 固体表面から2次電子の放出、(4) 2次電子によるデポジションの発生といった構造形成過程をモデル化した。結果として、異なる走査速度にてFIBを走査すると、異なる成長角度のオーバーハングナノ構造を得られた。また、上記シミュレーション結果の妥当性を実験的に確認した。ナノピラーの頂点から異なる走査速度にてFIBを走査すると、シミュレーション結果と同様に、オーバーハングナノ構造は異なる成長角度に成長した。従って、FIBの走査速度、つまりFIB照射量を制御することによって、構造の成長角度を制御することができることはわかった。

成長角度計測技術については、先行研究で報告されていた構造形成時における基板電流の成長角度依存性を基礎とし、基板電流から成長角度を判断する原理とした。これを解析的に証明するために、上記のシミュレーションを用い、異なる走査速度にてFIBを走査し、構造が異なる成長角度に成長する時の2次電子発生量を計算した。成長角度が下方になるにつれ、2次電子発生量は増加していった。基板電流の変化傾向は2次電子と同様に、成長角度が下方になればなるほど増加していくこととなる。この傾向は先行研究の実験結果と一致し、基板電流が成長角度に依存することがわかった。

以上のように、走査速度による成長角度の制御性と、成長角度モニタに対する基板電流計測の有効性を、シミュレーションと実験によって確認した。これにより、立体ナノ構造を形成する時に、基板電流の計測によって実時間に成長角度を計測し、基板電流の値から成長角度を判断し、成長角度が水平から外れた場合にFIB照射量を実時間制御することによ

って成長角度を水平に戻すことにより、オーバーハング構造の長尺形成が可能と考えた。

2. 2 アナログスキャン実時間照射量制御技術による長尺ナノワイヤの形成

ナノワイヤの形成に用いられているアナログスキャンに実時間照射量制御技術を組み込み、長尺オーバーハングナノワイヤの形成を試みた。

実時間照射量制御を行うために、3つのパラメータ：FIBの初期走査速度、基板電流の許容範囲、走査速度の調整値を決定する必要がある。ワイヤが $2\ \mu\text{m}$ 水平に成長させ、その時の走査速度と基板電流値から参照し、FIBの初期走査速度と基板電流の許容範囲をそれぞれ $80\ \text{nm/s}$ と $1.10\pm 0.10\ \text{pA}$ と決定した。決定した制御パラメータを用い、長さが $15\ \mu\text{m}$ と $30\ \mu\text{m}$ の長尺オーバーハングナノワイヤを形成することができた。図1(a)は制御なしの形成結果であり、数 μm 程度しか水平に形成できなかった。図1(b)は制御ありの形成結果であり、ナノワイヤが目標長さまで水平に成長した。この結果から、実時間照射量制御技術は、長尺オーバーハングナノワイヤの形成を可能としたことがわかった。

図2(a)と図2(b)にそれぞれ、制御なしと制御ありの場合のナノワイヤ形成における基板電流と走査速度をプロットした。制御なしの場合、基板電流は成長角度の変化につれ大きく変化した。一方、制御ありの場合、基板電流は設定した許容範囲内に収まっており、制御が機能していることを確認した。また、形成途中において走査速度が減少しており、これは水平成長になる適切な走査速度が減少したことを意味する。すなわち、ワイヤの形成に

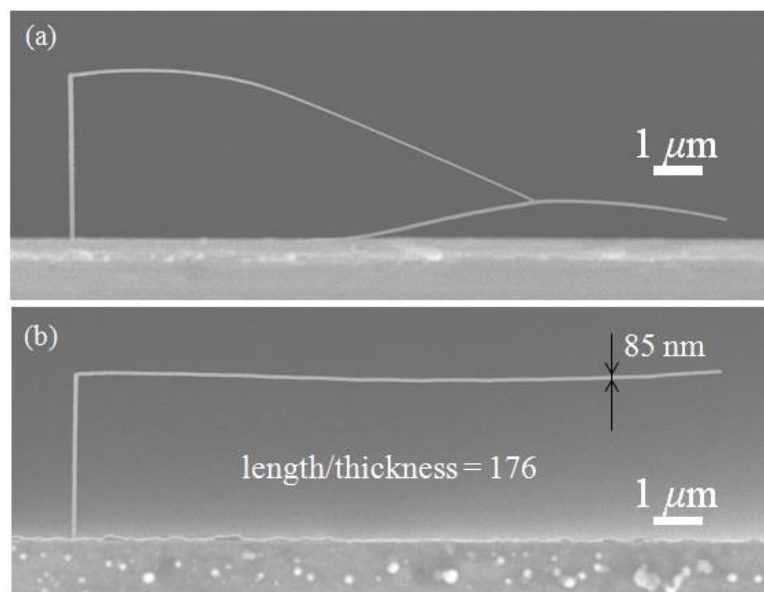


図1 長尺オーバーハングナノワイヤの形成結果，(a) 制御なし，(b) 制御あり

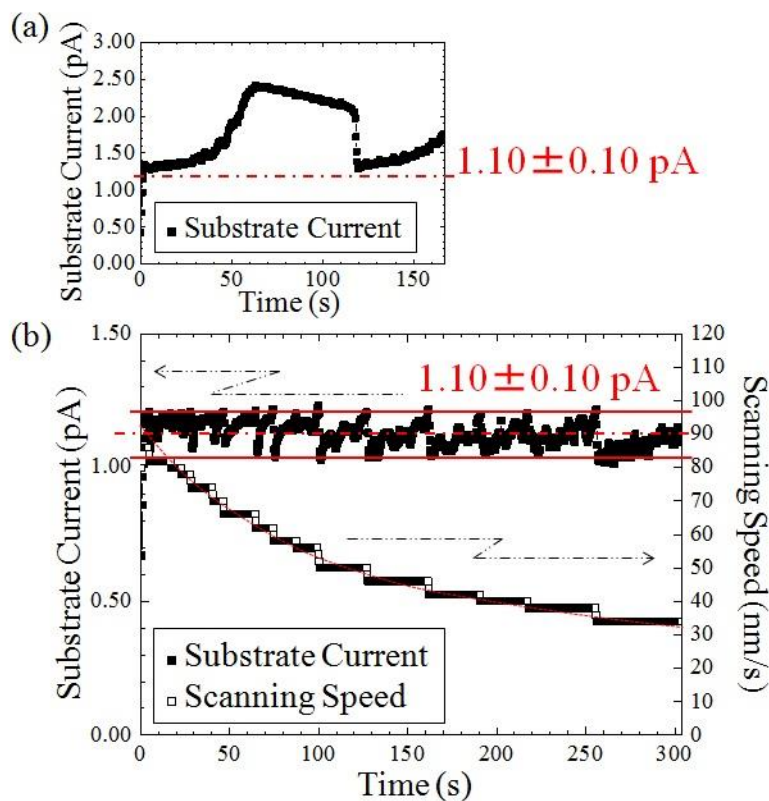


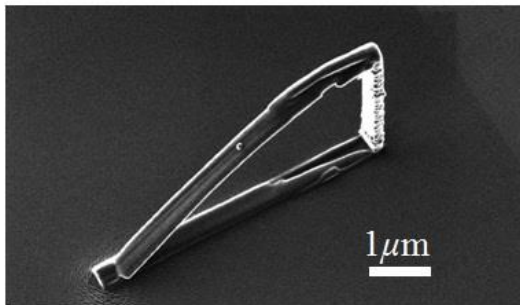
図2 長尺オーバーハングナノワイヤの形成における基板電流と走査速度
(a) 制御なし, (b) 制御あり

伴い構造の堆積レートが減少していったことがわかった。

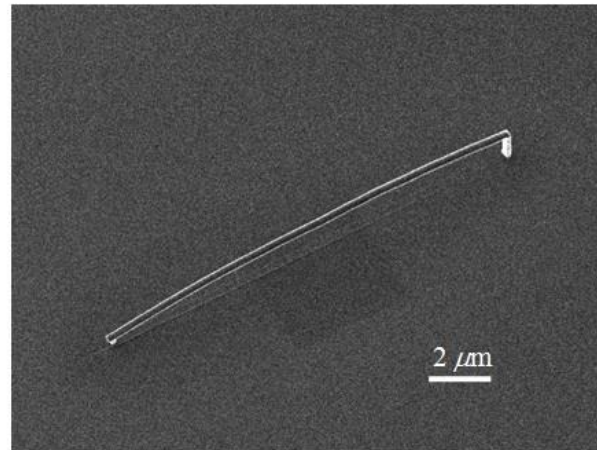
2. 3 ドットスキャン実時間照射量制御技術による立体ナノ長尺構造の形成

より複雑な立体ナノ構造を形成するために、ドットスキャン方式である3次元コンピュータ支援製造(3D-CAM: three-Dimensional Computer Aided Manufacturing)が用いられてきた。立体ナノ構造の長尺形成を達成するには、実時間照射量制御技術を3D-CAMに組み込む必要がある。

長尺オーバーハングナノワイヤの形成と類似に、3つのパラメータ:FIBの初期Dwell Time, 基板電流の許容範囲, Dwell Timeの調整値を決定する必要がある。ナノ構造が3 μm 水平に成長させ、その時のDwell Timeと基板電流値から参照し、FIBの初期Dwell Timeと基板電流の許容範囲をそれぞれ20 nm/sと 1.70 ± 0.10 pAと決定した。決定した制御パラメータを用い、長さが15 μm のオーバーハングナノ長尺構造を形成することができた。図3(a)は制御なしの形成結果であり、数 μm 程度しか水平に形成できなかった。図3(b)は制御ありの形成結果であり、ナノ構造が目標長さまで水平に成長した。この結果から、実時間照射量制御技術は、立体ナノ長尺構造の形成を可能としたことを確認した。



(a)



(b)

図3 立体ナノ長尺構造の形成, (a) 制御なし, (b) 制御あり

3. 研究成果のまとめ

本研究は、ナノ・マイクロデバイスの作製ツールであるFIB-CVDによる立体ナノ構造形成の高自由度化・高精度化を目的とし、オーバーハング構造の形成メカニズムを明らかにし、実時間照射量制御技術を開発することによって立体ナノ構造の長尺形成を達成した。実時間照射量制御技術は、基板電流の構造成長角度依存性を利用し、構造成途中において実時間に基板電流を計測して照射量を制御する方法である。従来はオーバーハングナノ構造が数 μm 程度しか形成できなかったことに対し、 $30\ \mu\text{m}$ 以上のオーバーハングナノワイヤと $15\ \mu\text{m}$ 以上のオーバーハングナノ構造を形成したことによって、FIB-CVDの実時間照射量制御技術の、高自由度・高精度のナノ・マイクロデバイス作製への有用性を実証した。