

外-96-57

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

原子間力顕微鏡によるナノ構造計測と
そのデバイス・プロセスへの
応用に関する研究

申 請 者

永瀬 雅夫

Masao Nagase

1996 年 12 月

今日の情報化社会を支えているLSIに代表される電子デバイスは、その構造サイズの微細化により、年を追う毎に性能の向上が図られている。2000年には0.2 μm 程度の最小構造長をもつデバイスが実用化される見通しで、その後もさらに微細化が進むことが予測されており、現状のトレンド通りに微細化が進むと2010年頃には0.1 μm 以下、すなわち、100 nmを切るデバイスが実用化されることになる。現状でも研究レベルではサイズが100 nm以下のデバイスの試作がなされており、このようなサイズのデバイスを一般的にはナノデバイスと呼ぶ。ナノデバイスの実現には、リソグラフィ技術を中心とした作製技術に関しても解決すべき問題が多いが、実際に作製したナノ構造の評価技術も重要である。即ち、多くのナノデバイスではその構造サイズ・形状が直接的に電気特性に反映される為である。従って、構造評価技術の確立なしにナノデバイスの実現もあり得ないと言っても良い状況にある。

従来、微細な構造評価に用いられている透過電子顕微鏡 (TEM)、走査電子顕微鏡 (SEM) は原子～ナノオーダーの分解能があり評価手段として十分であるかのように思われる。しかし、実際のナノ構造評価の上では各種の問題点があり、特に構造の定量評価が非常に困難である現状がある。さらに、ナノ構造は一般的にはその高さが水平方向の大きさと同程度になるため3次元形状把握が重要となるが、これらの従来の顕微鏡法では2次元の形状情報しか得ることができない。これに対して、比較的新しい顕微鏡法である走査プローブ顕微鏡法 (SPM) の1種である原子間力顕微鏡法 (AFM) では、高さ情報の2次元像を原理的には原子オーダーの分解能で得ることが出来る。そこで、筆者はナノ構造の定量的かつ3次元的な把握のためには、AFMが有効ではないかと考え、以下のような目標を掲げて各種の検討を行ってきた。

1. ナノ構造のサイズの定量的評価 (SEMを越える高精度が目標)
2. 3次元構造把握 (AFMの高さ方向感度の高さの活用)
3. AFMによるナノ構造観察により得られた知見のナノデバイスへの応用

筆者が検討を開始した当時はナノ構造の評価にはAFMはほとんど適用されていなかった。これは、AFMである程度の高さがある構造を観察する場合、探針の影響による像歪みが大きくなるため、実像の把握が困難になることが主要因であった。探針の形状を正確に知ればその影響は除去することが可能である。そこで、まず、探針の先端形状を正確に把握する手段を考案すると共に、構造サイズの定量評価手法自体の確立を行う必要があった。

また、デバイスの微細化によりナノデバイスを支える各種の材料に対する要求条件も厳しいものとなる。特に、構造サイズ揺らぎに繋がる各種のプロセス上の揺らぎは、それを明確化し低減する必要がある。これにはAFMの3次元構造把握の能力が有効であった。特に、SIMOX基板の平坦化に関してはAFM観察の結果に依るところが大きく、この成果がナノデバイス開発を支えた。

実際のナノデバイス (単電子トランジスタ [SET]) 構造形成に関しては、AFMによるナノ構造観察により見いだされたパターン依存酸化法という手法を適用した結果、非常に再現性の良いデバイス作製を行うことが可能となった。このSETデバイスは従来のSETに比べて、高い温度で極めて安定に動作することが特徴であり、今後のナノデバイス開発の中核を担うものである。

本論文 (全6章) では、AFMを用いたナノ構造評価技術の確立を目指して行われた研究の成果を述べる。そのすべてはNTTで行われた先駆的なSi系のナノデバイス・プロセス研究の過程で行われたもので、計測技術自体の基礎的検討 (第二章) から、実際のプロセスへの適用 (第三章、第四章)、デバイス開発 (第五章) までを視野に含む。ナノ構造計測技術の確立が、プロセス・デバイスの開発に大きく貢献したことを示し、最終的には世界で初めてのSETの常温動作を実現した経緯について述べる。以下、各章の概略を示す。

第一章では、ナノデバイス開発の全体的動向を簡単に述べ、その中でのナノ構造評価技術の位置づけを明らかにする。

第二章ではAFMによるナノ構造評価手法の内、筆者が開発した構造長計測法に関して述べる。その理論的背景から、その有効性の確認、精度評価まで述べる。AFMのプローブは比較的大きな構造体であるために、ある程度の高さ (10 nm以上) のある構造の評価をする場合、プローブ形状に由来する像歪みが観察対象の大きさと同程度も生じてしまい、その実像の把握が困難となる。この問題に対し、筆者は、プローブの影響を除去し真の構造長を計測する手法を開発した。計測対象の構造の形状、及び、AFM探針形状をモデル化し、そこから解析的に導いたAFM像情報を構造長をパラメータとして含む形で定式化し、これを実際に測定した像情報にフィッティングさせることにより構造長をフィッティングパラメータとして抽出する手法である。その有効性を検証する目的でAFM用標準試料を独自に考案し、実際に作製した。この標準試料は、Si (110) 基板上にKOHによる結晶異方性エッチング利用して形成した<112>方向細線で、完全に矩形の断面を有することが特徴である。標準試料を用いることによりAFM探針形状の正確な把握、他の計測手法であるTEM, SEMの定量的な比較が初めて可能となった。さらに、その計測精度の評価を行い、ナノオーダーの構造長計測に精度的にも十分適用可能であることを明らかにした。さらに、本手法を通常のプロセスで現れる一般的な加工形状に適用できるように拡張した。

第三章では実際のナノデバイスプロセスにおける各種の転写工程の評価に第二章で述べたAFMによる構造長計測を適用してその有効性を確認した結果を示す。評価対象は、3つの代表的な転写工程 (EBリソグラフィ工程、パターン反転工程、パターン幅細らせ工程) である。これらはナノプロセスの中でも特に高い定量性を要求する工程であり、AFMによるナノ構造計測がそのプロセス確立に大きく貢献していることを述べる。

第四章では、ナノデバイスプロセス開発において重要な課題である、構造サイズ揺らぎの評価結果について述べる。ナノデバイスにおいては、従来のデバイス以上に構造サイズの揺らぎがデバイス電気特性に及ぼす影響が大きくなる。その評価にも従来よりも高精度で定量評価が可能な手法が必要である。筆者は、評価法としてフラクタル理論に基づくスケーリング解析手法を適用し、ナノ構造サイズ揺らぎの定量評価を行った。ナノデバイス作製に一般的に用いられているS I M O X基板の表面ラフネス、及び、E B露光法で形成したレジストパターンの幅揺らぎを評価対象とした。

まず通常の作製法のS I M O X基板では正形状の界面構造がありラフネスが大きくナノデバイス作製には不適当であることを明らかにした。この問題を解決するために高温（1350℃程度）長時間熱処理法を開発し、ラフネスが小さくナノデバイス作製に好適な基板を実現した。さらに、平坦化後の表面界面には原子オーダーのステッパテラス構造が現れることを見いだした。ラフネスの低減、ステップ構造の発現はいずれも高温処理によりS i /酸化膜界面で大規模な物質移動が起こっていることを示すものであり、A F M観察により初めて明らかにされた現象である。

レジストパターンの揺らぎの評価では、スケーリング解析手法を利用して露光のレジスト表面とレジストパターン側壁のモロロジーが一致することを定量的に明らかにした。さらに、レジスト表面のA F M観察からレジスト膜中の粒状構造が幅揺らぎの原因であることを見いだした。この構造は、レジスト高分子の分子径に比べるとはるかに大きな構造で、このような構造がレジスト膜中の存在することはこれまでまったく知られていなかった。この粒状構造を制御することによりパターン幅揺らぎは改善されると思われ、今後のナノリソグラフィの高精度化に大きな指針を与えたことになる。

第5章では第3章、第4章で確立したナノプロセスを適用して実際に作製したナノデバイスの構造評価と電気特性の対応について述べる。主に、世界で初めて常温での動作を達成した単電子トランジスタの構造解析、及び、電気特性について述べる。このデバイスは形状依存酸化現象という酸化膜上のS i 薄膜に特有な酸化現象を利用して作製されている。その構造はA F M以外では確認できない構造であり、A F Mナノ構造評価技術がなければ実現出来なかったデバイスであるといえる。まず、その作製の要のプロセスであるパターン依存酸化の詳細をA F M計測結果から明らかにする。次に、デバイスの電気特性の統計的揺らぎに関して、4章の評価したS I M O X基板のS i 層厚揺らぎ、レジストパターン幅揺らぎとの対応を定量的に議論し、パターン幅揺らぎが支配的であることを示す。

第6章では全体の総論的総括を行う。