

## 論文の内容の要旨

論文題目 高スループットと高解像度を両立する局所陽極酸化型側壁電極  
ナノリソグラフィ

氏名 李 永芳

本博士論文では、次世代リソグラフィ技術として高スループットと高解像度を両立する局所陽極酸化型(Local anodic oxidation: LAO)側壁電極ナノリソグラフィ(Thin-film edge electrode lithography: TEEL)の確立を目的として行った研究について記している。

第1章は序論であり、本研究の背景および既存研究による問題点について記述し、これらの内容を踏まえて本研究の目的と目標を設定している。まず、半導体の微細化を牽引してきた根幹技術の一つである光リソグラフィは、光の回折限界により加工限界が近づいている問題を提起している。次に、この問題を解決する候補とされた次世代リソグラフィの現状と課題について解説している。その後、R&D領域で高分解能リソグラフィ技術として有望とされている走査探針型リソグラフィグラフィ(SPL)と量産技術として期待されているナノインプリントリソグラフィグラフィ(NIL)の現状および課題について分析している。SPLでは低装置コストで簡便に微細パターンの描画ができるが、プローブ先端摩耗の抑制やスループットの向上などの課題が残っている。一方、NILでは高スループットでナノパターンの一括転写ができるが、膜厚が不均一である点、および転写分解能がモールドのパターンサイズに依存する点などの問題がある。そこで、本論文ではプローブ耐久性やSPLのスループット向上、およびNILの高分解能化を博士論文研究の目的に設定している。

第2章では、新規側壁電極タイプのマルチプローブを確立することにより、SPLの描画安定性とスループットの向上について記述している。特に、プローブの先端部にマイクロスケールの機械的な接触部とナノスケールの電気的な接触部(側壁電極)を有する新規耐摩耗プローブの構造を提案している。マイクロスケールの機械的接触部では、プローブへの荷重を分散することでプローブの先端の摩耗を大幅に抑えることができるとともに、ナノスケールの電気的接触部では、従来プローブと同様の高分解能が実現できている。また、プローブ先端は均一な断面形状であることから、プローブ先端が摩耗した後でも、露出した電極の幅は常に一定であるため、これによりプローブの長手方向で安定な電気的接触を維持できる。作製した耐摩耗プローブは、同じ電気的接触部を有する市販プローブ(直径:30 nm)と同等な描画分解能(描画線幅:50 nm)と描画能力を

実現しつつ、耐久性が3桁以上に向上している。また、描画した酸化パターンをマスクとしてRIEでシリコンのエッチングを行い、その結果として、酸化パターンが深さ数100 nmのSiのエッチングマスクとして使用可能であることを確認している。さらに、SPLのスループットを向上するため、ウェハレベルでの加工が可能なマルチ耐摩耗プローブを構築している。製作したマルチプローブを用いて任意パターンの並列描画に成功し、SPLのスループットがプローブの本数に比例して向上することを確認している。本研究で確立したプローブは、半導体向けの描画技術として用いる際に必要となる10 mm角内での安定描画を可能にしている。以上の結果により、SPLが当該研究開発分野において先端デバイスの描画技術として用いられる可能性が示された。

第3章では、NILで用いられているモールドに替えて、絶縁性モールドの凹凸部の側壁に極薄電極薄膜を形成した側壁電極モールドを使用することにより、側壁ナノ電極に対応したパターンを電気化学反応により対象物に転写するモールドベースのTEELの確立と、転写原理の解明および転写条件の最適化および転写パターンの有用性検証について述べている。本リソグラフィ手法の転写分解能は、モールド上の凹凸部のサイズに依存せず、その側壁に形成する側壁電極の幅（電極の厚さ）のみに依存する。側壁電極の厚さは簡単に調整できるため、従来のリソグラフィの解像度に依存することなく、高分解能が実現できる。また、描画にはレジストが不要なため、残膜の問題を回避し、高スループットでナノパターン転写が実現できる。原理検証および課題抽出のため、MEMS技術を用いて側壁電極幅70 nmのモールドを作製し、転写実験を行っている。その結果、電極の幅と形に対応した酸化パターンがほぼ1:1で転写されることを確認している。しかし、高湿度雰囲気の場合側壁電極端部と基板をつなぐ水メニスカスが広がり、転写分解能が劣化する問題が生じている。メニスカスの広がりを抑えるため、モールド凸部の表面に絶縁性と疎水性を併せ持つサイトップ膜を付加している。その結果転写分解能、転写均一性および再現性が向上している。次に、転写条件を最適にするため、実験計画法を用いて各転写パラメータの転写線幅への影響を調べている。その結果、バイアスを小さく、湿度を低く、また転写時間を短くすることにより、転写分解能が向上できることがわかる。この指針に基づき、電極幅約20 nmの側壁電極モールドによる線幅約25 nmパターンの転写に成功している。しかし、サイトップモールドは高精度で作製するのが困難であったため、転写パターンのラフネスが大きい。転写パターンのラフネスを低減するため、高精度で作製可能な酸化膜付モールドと、自己組織化単分子膜HMDSによるモールド表面の疎水性処理を用いることにしている。その結果、転写パターンのラフネスを大幅に改善している。マスクとしての有用性を検証するため転写パターンのエッチング耐性の検証を行い、深さ150 nm程度のSiのエッチングに耐えることを確認している。なお、フレキシブルモールドを用いることで、数cm角以上のエリアでの均一転写が実現できている。確立したモールドベースのTEELにより、ナノパターンの大面積での均

一転写が可能となり、高スループットで高分解能の次世代量産技術としての可能性を示唆した。

第4章では、本研究で得られた結果について考察し、実用技術として確立するための課題を論じる。

第5章では、本研究で得られた主要な知見をまとめ、本論文の総括とする。