

John Paul Pineda, Charles Kim, Cathy Lee,  
Byong Kim, and Keibock Lee  
Park Systems Inc., Santa Clara, CA USA  
Translated by Cherie Jung, Chie Goto

## 原子間力顕微鏡ナノリソグラフィーによる ナノスケール材料のパターニング

### はじめに

ナノテクノロジーは、エレクトロニクスからバイオメディカル技術まで、さまざまな分野で応用されており、科学界でも注目を集めています[1]。これらの応用分野での進歩は、主に、ポリマーや半導体などのナノ構造材料を形成する能力に依存しています[2, 3]。ナノ構造の形成にはいくつかの方法が導入されていますが、代表的なものとして、電子ビームリソグラフィーと集束イオンビームリソグラフィーが挙げられます。しかし、これらの方法は一筋縄ではいかず、操作コストも高いのが現実です。これらの問題を克服するために考案された強力な方法の一つが、原子間力顕微鏡（AFM）によるナノリソグラフィーです[1-3]。この技術はシンプルでコストも低いです[2]。AFMナノリソグラフィーは、その機構的・操作的原理に基づいて、バイアスアシストAFMリソグラフィーとフォースアシストAFMリソグラフィーという二つの一般的なグループに分けられます[2]。バイアスアシスト手法では、金属や半導体の基板の上に酸化膜パターンを形成するために、チップにバイアス電圧を印加します[4, 5]。一方、フォースアシスト手法は、チップ先端に大きな力を加え、鋭利なチップで表面の原子や分子を機械的に引っ掻いたり、押したり、引っ張ったりすることで、ポリマーなどの試料の表面に微細な溝を形成するもので、チップと試料間の相互作用は主に機械的なものとなります[2, 3]。

このテクニカルノートでは、Park NX10原子間力顕微鏡を用いて、ナノパターンを作るナノリソグラフィーの機能を説明します。チップバイアスモードを用いて、シリコン基板の上に酸化膜パターンを形成しました。パターン形成が成功したことは、水平間力顕微鏡（LFM）で確認されました。リソグラフィーとLFMモードをAFMと統合することで、ナノパターンを作製し、トポグラフィーと摩擦のデータを同時に取得することができます。この実験で得られた結果は、形成された酸化膜ナノパターンが正常に実行されていることを示しています。

### 実験内容

Park NX10 AFMを用いて、AFMナノリソグラフィーを行い、シリコン基板の上にナノパターンを描画しました。リソグラフィー工程後にLFMイメージングを行い、表面に酸化膜パターンが正常に形成されたことを確認するとともに、酸化膜層とシリコン基板の表面の違いを識別しました。実験には、公称バネ定数 ( $k=0.2\text{N/m}$ ) と共振周波数 ( $f=25\text{kHz}$ ) を持つPPP-CONTSCPtカンチレバーを使用しました。

### 結果と考察

#### バイアスアシストAFMナノリソグラフィー

バイアスアシストAFM ナノリソグラフィーは、AFMチップにバイアス電圧をかけて材料を酸化させる技術です。チップにバイアスをかけると、チップと試料の間に電界が発生します。この電界により、チップと試料の間に形成された水分子がイオン化され、局所的な陽極酸化（LAO）が起こり、表面にナノスケールの酸化膜が形成されます。リソグラフィープロセスでは、チップは電流を流し、また検出するためのナノスケールの電極として機能します[1, 2]。表面に形成される酸化膜の量は、印加されるバイアスの大きさと湿度に依存します。これまでの研究[2]では、チップ電圧の増加に伴い、予め設計されたデバイスの酸化膜パターンの厚さが増加することが報告されています。したがって、チップ電圧が表面に形成される酸化膜の量に影響を与えると結論づけました。

図1は、バイアスアシストAFMナノリソグラフィーの概略図です。本研究では、Parkリソグラフィーソフトウェアを用いて、試料表面にナノリソグラフィーを設計・応用しました。試料にはシリコン基板を用いました。10Vを印加すると、チップの周囲に高電界が発生し、水分子が分解されたH<sup>+</sup>、OH<sup>-</sup>およびO<sup>-</sup>になります[5]。その後、OH<sup>-</sup>イオンとO<sup>-</sup>イオンは、バイアスのかかったチップから押しやられ、シリコンと反応してSiO<sub>2</sub>を形成します。リソグラフィースキャンのスキャンエリアに沿って、シリコン基板の表面にナノスケールの酸化物パターンが形成されます。

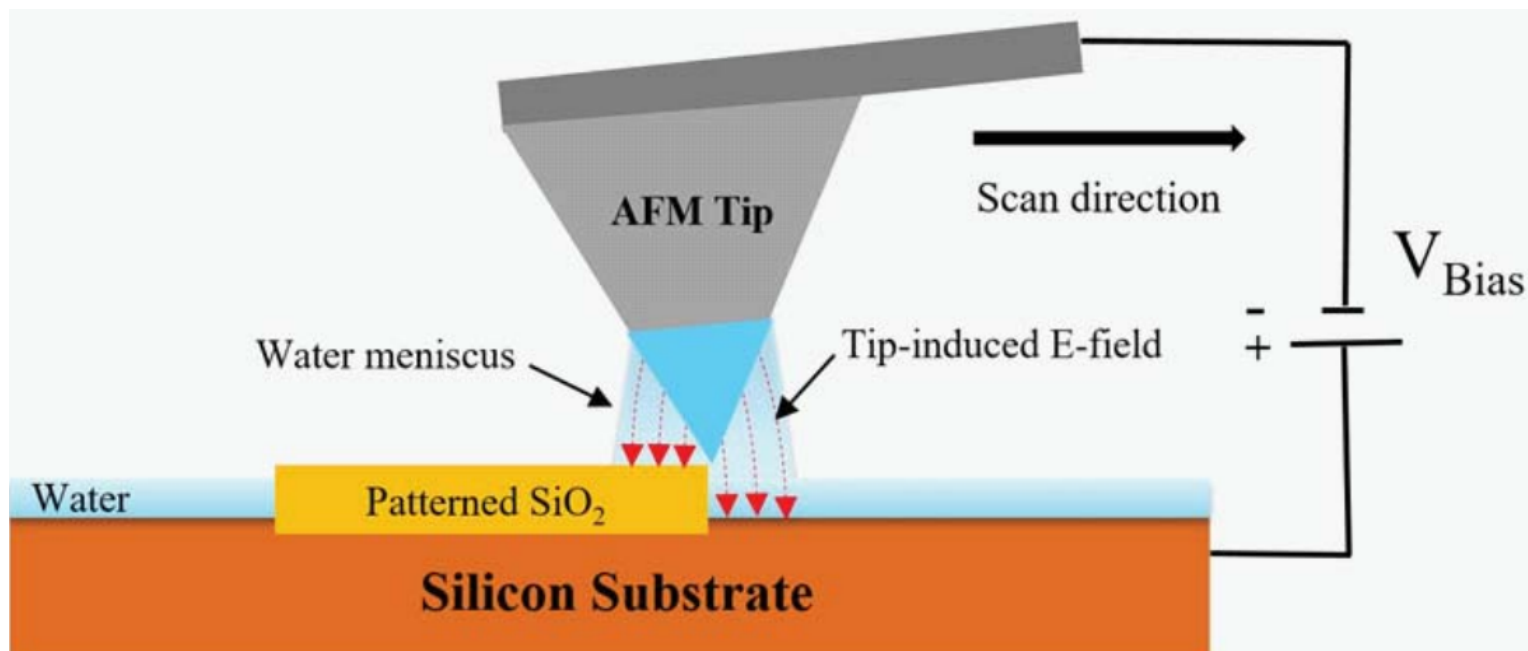


図1. バイアスアシストAFMナノリソグラフィー[4, 5]の模式図。

## 水平力顕微鏡

水平力顕微鏡 (LFM) モードでは、カンチレバーの垂直方向のたわみとねじれを測定し、試料のトポグラフィーと表面摩擦特性を取得します。カンチレバーの上下方向の動きとねじれは、図2に示す4つのドメイン (クワッドセル) で構成された位置検出器 (PSPD) を介してトラッキングされます。表面のトポグラフィー情報と摩擦情報は、式1と式2を用いて得られます。

$$\text{式1: トポグラフィー情報} = (A+C) - (B+D)$$

$$\text{式2: 摩擦情報} = (A+B) - (C+D)$$

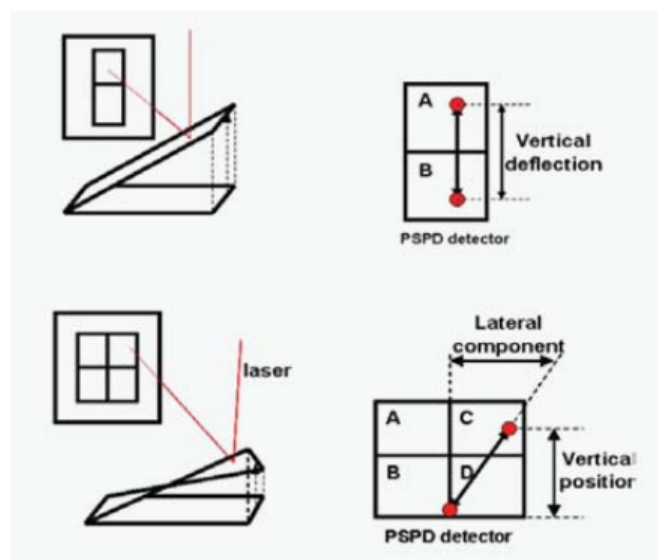


図2. AFM(上)とLFM(下)の動作におけるPSPD上のレーザー位置の模式図。

図3は、リソグラフィー工程後の画像のトポグラフィー、摩擦データ、等価のラインプロファイルを示したものです。イメージはLFMモードで測定したものです。LFMはコンタクトモードであるため、トポグラフィーと摩擦のデータを同時に取得することができ、それらの特性の相関をとることができます。AFMトポグラフィー画像（図3b）を見ると、このデザインは、直径が約17 $\mu\text{m}$ のクリスマスボールのデザインで、高さが0.2~1.5nmの複数の小さな構造体で構成されていることがわかります。図3eは、Park XEIソフトウェアを使用して解析したラインプロファイルを表しており、より直接的な信号の比較が可能です。LFMのフォワードスキャン（緑線）とバックワードスキャン（青線）で得られたラインプロファイル进行分析することで、試料の摩擦特性を把握することができます。順方向のスキャンでは、LFM信号が上方にシフトしており、チップが酸化層を通過する際の摩擦力の変化により、カンチレバーの動きが妨げられていることがわかります。これは、カンチレバーと表面の間の摩擦が大きくなったために、カンチレバーが表面に引きずられた結果です。その結果、酸化膜の摩擦係数は、シリコン基板の摩擦係数よりも高いと判断できます。

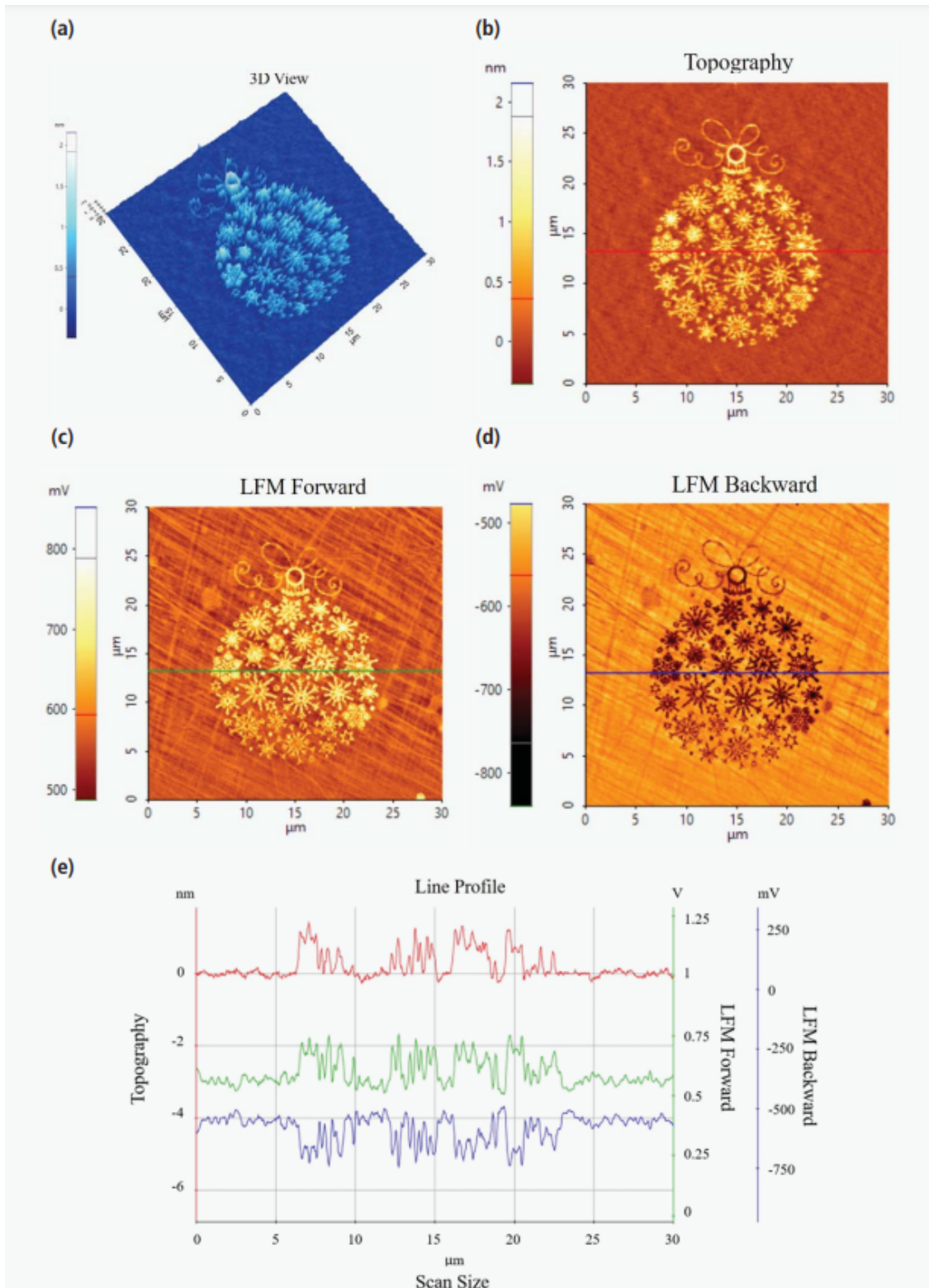


図3. (a)3Dビュー、(b)トポグラフィー画像、(c)LFMフォワードスキャン、(d)LFMバックワードスキャン。  
(e) 3bの赤線、3cの緑線、3dの青線に沿ってプロットされたラインプロファイル。

## おわりに

ここでは、Park NX10システムを用いて、AFMナノリソグラフィーによりシリコン基板にナノスケールの酸化物パターンを生成することを実証しました。AFMナノリソグラフィプロセスでは、電圧バイアスモード技術が使用されました。チップに-10Vの電圧バイアスをかけることで、表面にナノスケールの酸化物の構造を作ることに成功しました。また、LFMモードも実施し、その結果、酸化物パターンの作製に成功したことを確認しました。本研究で紹介したAFMナノリソグラフィーは、ナノスケールの特徴を持つ次世代の材料やデバイスを製造するための効果的な方法です。

## 参考文献

1. A. Pimpin, et al.,  
Review on Micro- and Nanolithography Techniques and their Applications. Engineering Journal.
2. S. Hutagalung, et al.,  
Nanoscale Patterning by AFM Lithography and its Application on the Fabrication of Silicon Nanowire Devices. SainsMalaysiana 43(2), (2014): 267-272.
3. R. Garcia, et al., Advanced scanning probe lithography.  
Nature Nanotechnology 9, 577-587 (2014); doi:10.1038/nnano.2014.157
4. J. Voves, Nanoelectronics and nanolithography.  
[https://www.researchgate.net/publication/228859246\\_Nanoelectronics\\_and\\_nanolithography](https://www.researchgate.net/publication/228859246_Nanoelectronics_and_nanolithography)
5. A. Bernal et al., LOCAL ANODIC OXIDATION ON SILICON (100) SUBSTRATES USING ATOMIC FORCE MICROSCOPY.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v79n174/v79n174a08.pdf>

詳しくは [parksystems.co.jp](http://parksystems.co.jp) まで

### Park Systems Corporate Headquarters

KANC 15F, Gwanggyo-ro 109, Suwon 16229, S.Korea  
Tel : +82-31-546-6800 / [psc@parksystems.com](mailto:psc@parksystems.com)

### Park Systems Japan

1-17-1 Kanda Nishiki-cho, Chiyoda, Tokyo 101-0054, Japan  
Tel : +81-3-3219-1001 / [psj@parksystems.co.jp](mailto:psj@parksystems.co.jp)

### Park Systems Americas

3040 Olcott St., Santa Clara, CA 95054, USA  
Tel : +1-408-986-1110 / [inquiry@parksystems.com](mailto:inquiry@parksystems.com)

### Park Systems Europe

Schildkröstrasse 15, 68199 Mannheim, Germany  
Tel : +49 (0) 621 490896-50 / [pse@parksystems.com](mailto:pse@parksystems.com)

### Park Systems China

Room 518, Tianchuang Science and Technology Building,  
No.8 Caihefang Road, Haidian District, Beijing, China  
Tel : +86-10-6254-4360 / [pscn@parksystems.com](mailto:pscn@parksystems.com)

### Park Systems Taiwan

4F-1, No.8, Taiyuan 1st Road, Zhubei City,  
Hsinchu County 302, Taiwan  
Tel : +886-3-5601189 / [pst@parksystems.com](mailto:pst@parksystems.com)

### Park Systems South East Asia

10 Science Park Rd, #01-07 The Alpha,  
Science Park 2, Singapore, 117684  
Tel : +65-66347470 / [pss@parksystems.com](mailto:pss@parksystems.com)

