

走査型近接場光学顕微鏡



研究ノート

片岡俊彦*

Scanning Near-field Optical Microscope

Key Words : Near-field Optics, Scanning Probe Microscope, Evanescent Wave

1. はじめに

原子オーダーの空間分解能を持つ走査型トンネル顕微鏡 (STM) が報告されて以来、原子間力、静電力、磁力など、プローブと試料との間に働くさまざまな相互作用を使った走査型プローブ顕微鏡の開発が行われている。このうち光の近接場を使ったものが走査型近接場光学顕微鏡 (Scanning Near-field Optical Microscope : SNOM) であるが、電子のトンネル顕微鏡に対応させてフォトン STM とも呼ばれている。近接場とは、物質の近傍に存在する電磁場のことであり、近接場に他の物質を近づけるとこの領域から放射される光の強度が大きく変化する。そのため、プローブ走査により生じる光の強度変化を検出することで表面形状の測定を行うことができる。この顕微鏡は、プローブの大きさや形により分解能が決まり、光の回折限界をはるかに上回る横分解能を得ることができる。また、光を媒体にしているため試料の導電性に関係せず絶縁体の測定も行えるという特徴を持つ。

SNOM の形態として今まで多くの報告がなされている。初期には、微小穴の周りの近接場をプローブとして利用し、穴の直径を小さくす

ることで分解能を上げる方法¹⁻³⁾が報告された。その後、表面プラズモン顕微鏡の発想から金属を蒸着した球状微小突起を用い、その周りに発生する局所的プラズモンを使った方法⁴⁾が報告された。一方、基板上に置かれた透明な試料を基板の側からの全反射光を利用して照明し、試料の周りにできるエバネセント波を先端の尖ったファイバーを利用して検出する方法⁵⁻⁸⁾も報告されている。

ここでは、我々の行っている研究⁹⁾を中心に SNOM の実例を紹介し、それが従来の光学顕微鏡に比べていかに優れた性能を有したものであるかを示したい。我々の開発した顕微鏡は、上に述べた報告例と比較して試料の材質に対する制限が少なく、またシグナル強度が大きくとれるという特徴を持っている。これは、微小突起周りの近接場をプローブとして利用するもので、微小突起型近接場光学顕微鏡と称している。

2. 装置の構成

2.1 プローブ部

プローブ部を図1に示す。透明な石英基板に直径 500 nm のポリスチレンラテックス球を付け、基板の内側から全反射条件で光を入射させることによりエバネセント波で球を照明する。

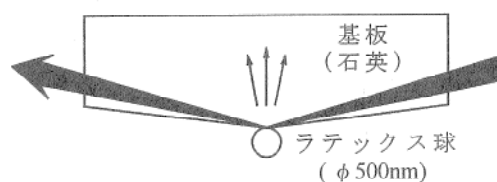


図1 プローブ部の構成

* Toshihiko KATAOKA

1945年10月7日生

1973年大阪大学大学院・工学研究科・精密工学専攻博士課程修了
現在、大阪大学大学院工学研究科、精密科学専攻、教授、工学博士、
光物性・光計測

TEL 06-879-7276

FAX 06-878-3819



球からの光を真上方向から基板を通して検出する。基板の形状は下に凸の四角錐型をしており、その先端角は入射光が全反射条件を満たし得る程度の大きさになっている。さらに、その頂点は半径1mm程度の球面状に丸められ、そこでの光散乱を防ぐために精密研磨を施してある。

2.2 測定システム

測定システムは図2に示すように、大きく分けてプローブ周りに近接場を形成する光照射系と、プローブからの光を集光して感知する検出系、および試料をプローブに近づけて平面走査するxyz駆動系、さらに検出信号を処理し表面形状として表示する信号処理系の4つで構成されている。

出力5mW、波長632.8nmのHe-Neレーザー光をレンズで集光してプローブ部に入射し、このうち、プローブによって散乱される光を光学顕微鏡で集光する。光学顕微鏡の撮影用像面に設置したピンホールによってプローブからの光のみを抽出し、光電子増倍管により検出する。プローブに試料を近づけたときに放射される光の強度変化からプローブ-試料間距離の変化量が得られるので、試料の平面走査時における光強度測定によって、あるいは、光強度が一定となるようにプローブ-試料間距離一定のフィー

ドバック制御を行うことによって形状測定を行うことができる。

試料表面に平行なxy方向への走査は、位置検出機能付きのピエゾ素子により行う。この素子は、全ストローク15 μm という範囲で位置決め精度が1nmという性能を有している。試料表面に垂直なz方向の移動には、粗動用としてインチワーム、微動用として円筒型ピエゾ素子を用いている。このピエゾ素子のストロークはおよそ1 μm で、プローブ-試料間の位置制御用として用いられる。これらのxyzステージは全体がもう一つの3軸メカニカルステージの上に載せられており、xyz方向に自由に移動できる。試料表面は透明四角錐基板を通して上部の光学顕微鏡で観察することができるので、メカニカルステージにより試料の観察したい部分にプローブ位置を持ってくることができる。

3. プローブ-試料間距離による検出光強度の変化

図3はプローブを石英ガラスの表面に近づけたときの光強度の変化である。横軸はプローブ-試料間距離、縦軸は検出光強度を表す。この結果では、各試料に対して、プローブ-試料間距離を近づけてゆくと、最初は周期的な変化を繰り返すが、これは、プローブでの散乱光とそれが試料表面で反射して戻ってきた光の干渉に

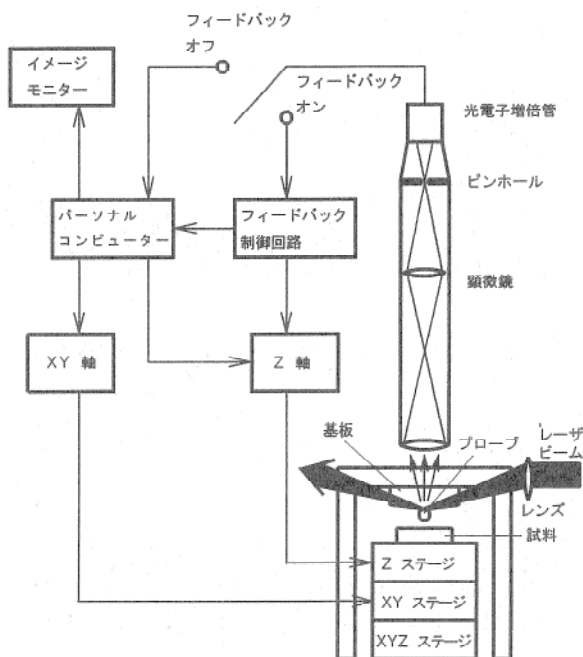


図2 SNOMのシステム構成

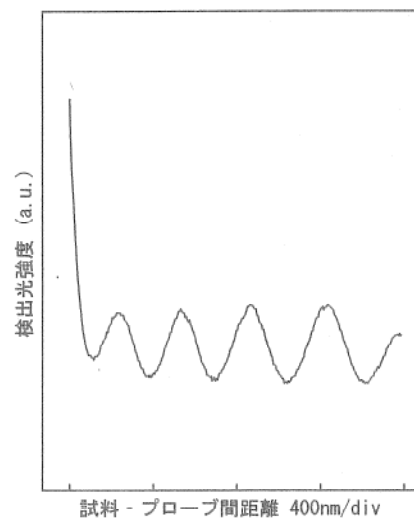


図3 検出光強度のプローブ-試料間距離による変化
試料：石英ガラス(屈折率1.46)、
プローブ：ポリスチレン(屈折率1.59)

よるものであり、その周期は波長の1/2になっている。さらにプローブを試料に近づけると、検出強度が急激に増大する領域が現れる。これが、プローブ周りに形成された近接場によって放射される光であり、SNOMではこの近接場領域での検出光強度変化を利用して形状測定を行う。近接場での検出強度の変化の仕方は試料材質により異なり、変化の大きさは試料の屈折率と関係することが判っている。すなわち、プローブ材質の屈折率に比べて試料材質の屈折率が小さいほど近接場での検出光強度の増加が激しくなる。このことから、プローブとしては高屈折率、試料としては低屈折率の材質を用いたほうが検出光強度を大きくすることができ、そのためSNOMによる形状測定においてより高い分解能が得られると考えられる。

4. SNOMによる表面形状計測

4.1 標準試料の作製

本装置の分解能について検討するため、標準試料を作製し、形状測定を行った。標準試料の作製方法を図4に示す。まず、Ag薄膜基板を作っておいてその上に直径約100nmのアクリル球を測定領域内に数個入るぐらいの密度でばらまく。その上からAgを厚さ約10nm蒸着すると、アクリル球の影になる部分には蒸着されないため、Ag薄膜のステップが形成される。基板上的アクリル球も下半分には蒸着されていないので、有機溶剤により溶かして除去することができる。このようにして直径約100nm、深さ約10nmの円柱状のくぼみを持つ標準試料が得られる。くぼみ部分のエッジは、蒸発源の大きさや蒸発源—試料間距離から幾何学的に

考えて5nm程度の幅を持っていると考えられる。

4.2 測定結果

深さ10, 5, 2nmのくぼみを持つ3つの標準試料を本装置で測定した結果を三次元表示したのが図5である。検出光強度が一定となるように、プローブ—試料間距離一定のフィードバック制御を行って測定した。走査領域はいずれも200nm四方を選び、その時の測定点の数は50×50点とした。走査方向はx方向であり、一面の測定に要する時間は約20分である。画面の表示はコンピューターグラフィックスによって陰影をつけ見やすくしてある。表面に見える凹凸は、Ag薄膜の表面粗さと測定装置の雑音の両方を含んでおり、現段階ではまだこれらを分離することはできていない。くぼみの形はきれ

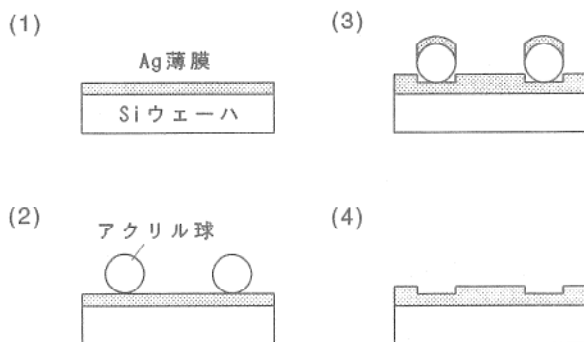


図4 標準試料の作製方法

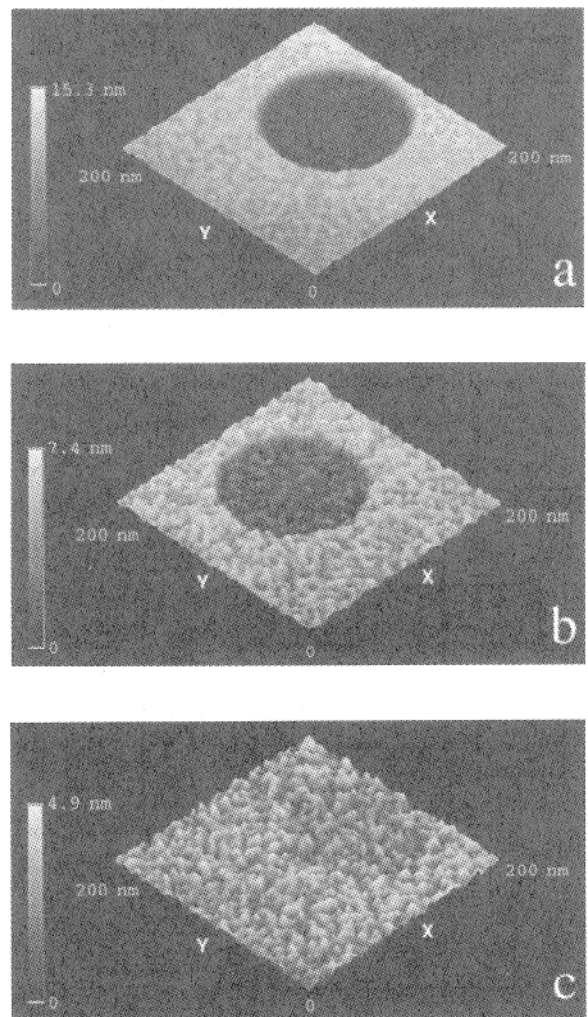


図5 標準試料のSNOM像
深さ (a) 10nm (b) 5nm (c) 2nm

いな円形として測定できており、その直径と深さは、標準試料作成の際に設定した値にほぼ一致している。エッジ部分のだれ幅から見て測定の横分解能は10 nm程度であると考えられる。また、深さ2 nmの標準試料でもくぼみを判別できることから、縦分解能は1 nm程度であると判断した。

ここでは、数多くの実験の中で最も高い分解能で測定できた結果のみを示した。測定結果の良否は使用したプローブとしてのラテックス球の状態によって大きく左右される。多くの場合、図3で示したように近接場領域での検出光の増加は見られるけれども、実際に形状を測定してみると標準試料のくぼみを観察できないほど分解能が良くない。ラテックス球の取り替えによって観察に成功する率は5 %程度である。このことから考えると、ラテックス球の表面にある微小突起が本当のプローブの役割を果たしており、鋭い突起がラテックス球の直下にきた場合のみ高い分解能が得られているのであろう。今後、再現性のあるプローブの作製が必要となる。

5. お わ り に

光の回折限界を越える分解能をもつ顕微鏡としてSNOMを試作した。走査のためのプローブとして、透明基板に付けた直径500 nmのポリスチレン球を用いることにした。このプローブを用いる方法は、今までに報告された方法とは異なる、新しいタイプのSNOMである。これによって横分解能10 nm、縦分解能1 nmという結果を得た。

分解能に対する理論的な限界が明らかでない以上、どこまで分解能を高めることができるかは、プローブ作成のための技術にかかっている。今後、できる限り小さな先端曲率半径をもった微小突起を再現性よく作る方法を開発することが重要になる。

参 考 文 献

- 1) U. Ch. Fischer : Optical Characteristics of $0.1\mu\text{m}$ Circular Apertures in a Metal Film as Light Sources for Scan-

- ning Ultramicroscopy, J. Vac. Sci. Technol. B, 3, 1, (1985) 386.
- 2) A. Harootunian, E. Betzig, M. Isaacson and A. Lewis : Super-resolution Fluorescence Near-field Scanning Optical Microscopy, Appl. Phys. Lett., 49, 11, (1986) 674.
- 3) U. T. Durig, D. W. Pohl and F. Rohner : Near-field Optical-scanning Microscopy, J. Appl. Phys., 59, 10, (1986) 3318.
- 4) D. W. Pohl, U. Ch. Fischer and U. T. Durig : Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM) : Basic Principles and some Recent Development, SPIE, 897, Scanning Microscopy Technologies and Applications (1988) 84.
- 5) R. C. Reddick, R. J. Warmack and T. L. Ferrell : New Form of Scanning Optical Microscopy, Phys. Rev. B, 39, 1, (1989) 767.
- 6) D. Courjon, K. Sarayedine and M. Spajer : Scanning Tunneling Optical Microscopy, Opt. Commun., 71, (1989) 23.
- 7) S. Jiang, N. Tomita, H. Ohsawa and M. Ohtsu : A Photon Scanning Tunneling Microscope Using an AlGaAs Laser, Jpn. J. Appl. Phys., 30, 9A, (1991) 2107.
- 8) F. de Fornel, L. Salomon, P. Adam, E. Bourillot, J. P. Goundonnet and M. Nevriere : Resolution of the Photon Scanning Tunneling Microscope : Influence of Physical Parameters, Ultramicroscopy, 42-44, (1992) 422.
- 9) 片岡俊彦, 遠藤勝義, 井上晴行, 稲垣耕司, 森 勇藏, 広瀬喜久治, 高田和政 : 球状微小突起をプローブとした走査型近接場光学顕微鏡の開発, 精密工学会誌, 60, 8(1994) 1122.