

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3942785号

(P3942785)

(45) 発行日 平成19年7月11日(2007.7.11)

(24) 登録日 平成19年4月13日(2007.4.13)

(51) Int. Cl.

G O 1 N 13/14 (2006.01)

F I

G O 1 N 13/14

B

請求項の数 23 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2000-16806 (P2000-16806)
 (22) 出願日 平成12年1月26日(2000.1.26)
 (65) 公開番号 特開2001-208671 (P2001-208671A)
 (43) 公開日 平成13年8月3日(2001.8.3)
 審査請求日 平成16年8月24日(2004.8.24)

(73) 特許権者 503460323
 エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社
 千葉県千葉市美浜区中瀬1丁目8番地
 (74) 代理人 100079212
 弁理士 松下 義治
 (72) 発明者 伊與木 誠人
 千葉県千葉市美浜区中瀬1丁目8番地 セ
 イコーインスツルメンツ株式会社内

審査官 野田 洋平

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバークラウドおよび微小開口付カンチレバーと、それらの開口形成方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光ファイバークラウドの先端部を先鋭化する工程と、
 前記先端部を光ファイバークラウドの軸方向に対して曲げる工程と、
 前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、
 前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を
 形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバークラウドの開口形成方法において、
 前記先端部を通る光ファイバークラウドの軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸か
 ら±45°以内になるように前記光ファイバークラウドを配置し、
 サンプル面と直交する面内で前記先端部を上下方向に加振して光ファイバークラウドの
 振幅量をモニターしながら、サンプルに対して、前記先端部とサンプル間に原子間力が作
 用する距離以下の領域まで光ファイバークラウドの前記先端部を近接または接触させた後
 に、

さらに前記光ファイバークラウドの振幅の減衰量をパラメータとして、前記先端部に形
 成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバークラウドの開口形成方法。

【請求項2】

光ファイバークラウドの先端部を先鋭化する工程と、
 前記先端部を光ファイバークラウドの軸方向に対して曲げる工程と、
 前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、
 前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を

10

20

形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように前記光ファイバプローブを配置し、

サンプル面と直交する面内で前記先端部を上下方向に加振して光ファイバプローブの位相をモニターしながら、

サンプルに対して、前記先端部とサンプル間に原子間力が作用する距離以下の領域まで光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、

さらに光ファイバプローブの位相をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項3】

光ファイバプローブの先端部を先鋭化する工程と、前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、

前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、

前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように光ファイバプローブを配置し、

サンプル面と平行な面内で前記先端部を横方向に加振して光ファイバプローブの振幅量をモニターしながら、サンプルに対して、前記先端部とサンプル間にシアフォースが作用する距離以下の領域まで光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、

さらに光ファイバプローブの振幅の減衰量をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項4】

光ファイバプローブの先端部を先鋭化する工程と、

前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、

前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、

前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように光ファイバプローブを配置し、

サンプル面と平行な面内で前記先端部を横方向に加振して光ファイバプローブの位相をモニターしながら、サンプルに対して、前記先端部とサンプル間にシアフォースが作用する距離以下の領域まで光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、

さらに光ファイバプローブの位相をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項5】

光ファイバプローブの先端部を先鋭化する工程と、

前記先端部を光ファイバプローブの軸方向に対して曲げる工程と、

前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、

前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、

前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように光ファイバプローブを配置し、

サンプル面と平行な面内で光ファイバプローブをねじれ方向に加振して、カンチレバーのねじれ角をモニターしながら、サンプルに対して、前記先端部とサンプル間にシアフォースが作用する距離以下の領域まで光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、

さらに光ファイバプローブのねじれ角の変化をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項6】

光ファイバプローブの先端を先鋭化する工程と、
前記先端部を光ファイバプローブの軸方向に対して曲げる工程と、
前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、
前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、
前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように光ファイバプローブを配置し、
サンプル面と平行な面内で光ファイバプローブをねじれ方向に加振して、カンチレバーの位相をモニターしながら、サンプルに対して、前記先端部とサンプル間にシアフォースが作用する距離以下の領域まで光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、
さらに光ファイバプローブの位相の変化をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

10

【請求項 7】

光ファイバプローブの先端を先鋭化する工程と、
前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、
前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、
前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように光ファイバプローブを配置し、
サンプルと前記先端部の金属膜の間にバイアス電圧を印加し、サンプル表面と前記光ファイバプローブ間に流れる電流をモニターしながら、サンプルに対して、前記先端部とサンプル間にトンネル電流が流れる距離以下の領域まで光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、
さらに前記トンネル電流の大きさをパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

20

【請求項 8】

光ファイバプローブの先端が光ファイバの軸に対して曲げられていることを特徴とする請求項 7 に記載の光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項 9】

光ファイバプローブの先端を先鋭化する工程と、
前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、
前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、
前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように光ファイバプローブを配置し、
サンプル表面にエバネッセント場を形成し、エバネッセント場が前記先端部で散乱される領域まで光ファイバプローブを近接または接触させた後に、
さらに前記先端部で散乱されたエバネッセント光の強度をモニターし、該エバネッセント光強度をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

30

【請求項 10】

光ファイバプローブの先端が光ファイバの軸に対して曲げられていることを特徴とする請求項 9 に記載の光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項 11】

光ファイバプローブの先端を先鋭化する工程と、
前記先端部付近を金属膜で覆う工程と、
前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に開口を形成する工程と、を少なくとも実施する光ファイバプローブの開口形成方法において、
前記先端部を通る光ファイバプローブの軸がサンプルに対して垂直または垂直軸から

50

±45°以内になるように光ファイバプローブを配置し、
前記光ファイバプローブの導波路部分に光を導入し、

サンプルに対して前記光ファイバプローブの前記先端部を近接または接触させた後に、

さらに前記先端部にエバネッセント場が形成される大きさまで開口を形成させた後、サンプル表面で散乱されたエバネッセント光の強度をモニターしながら、該エバネッセント光強度をパラメータとして、前記先端部に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項12】

前記光ファイバプローブの先端部が光ファイバの軸に対して曲げられていることを特徴とする請求項11に記載の光ファイバプローブの開口形成方法。

10

【請求項13】

前記光ファイバプローブの先端部にあらかじめ開口部を形成しておき、請求項1乃至請求項12のいずれか1項記載の方法により、前記先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して、前記開口部の大きさを整えることを特徴とする光ファイバプローブの開口形成方法。

【請求項14】

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該探針付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記カンチレバー先端部に開口を形成する工程とからなる微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、

20

前記カンチレバーの長手方向と直交し、前記探針の先端を通る軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から±45°以内になるように前記カンチレバーを配置し、

サンプル面と直交する面内でカンチレバーを上下方向に加振して、カンチレバーの振幅をモニターしながら、サンプルに対して、前記探針の先端とサンプル間に原子間力が作用する距離以下の領域まで前記カンチレバーを近接または接触させた後に、

さらに前記カンチレバーの振幅の減衰量をパラメータとして、前記探針の先端に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項15】

30

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該探針付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記カンチレバー先端部に開口を形成する工程とからなる微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、

前記カンチレバーの長手方向と直交し、前記探針の先端を通る軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から±45°以内になるように前記カンチレバーを配置し、

サンプル面と直交する面内でカンチレバーを上下方向に加振して、カンチレバーの位相をモニターしながら、サンプルに対して、探針先端とサンプル間に原子間力が作用する距離以下の領域まで前記探針を近接または接触させた後に、

40

さらにカンチレバーの位相をパラメータとして、前記探針の先端に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項16】

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該探針付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記カンチレバー先端部に開口を形成する工程とからなる微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、

前記カンチレバーの長手方向と直交し、前記探針の先端を通る軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から±45°以内になるように前記カンチレバーを配置し、

50

サンプル面と平行な面内で前記カンチレバーをねじれ方向に加振して、前記カンチレバーのねじれ角をモニターしながら、サンプルに対して、前記探針の先端部とサンプル間にシアフォースが作用する距離以下の領域まで前記探針を近接または接触させた後に、

さらに前記カンチレバーのねじれ角の変化をパラメータとして、前記探針の先端に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項 17】

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該探針付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記カンチレバー先端部に開口を形成する工程とからなる微小開口付カンチレバーの開口形成方法

10

において、
前記カンチレバーの長手方向と直交し、前記探針の先端を通る軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように前記カンチレバーを配置し、

サンプル面と平行な面内で前記カンチレバーをねじれ方向に加振して、前記カンチレバーの位相をモニターしながら、サンプルに対して、前記探針の先端とサンプル間にシアフォースが作用する距離以下の領域まで前記探針を近接または接触させた後に、

さらに前記カンチレバーの位相の変化をパラメータとして、前記探針の先端に形成する開口の大きさを制御することを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項 18】

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該探針付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記カンチレバー先端部に開口を形成する工程とからなる微小開口付カンチレバーの開口形成方法

20

において、
前記カンチレバーの長手方向と直交し、前記探針の先端を通る軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように前記カンチレバーを配置し、

サンプルと探針先端の金属膜の間にバイアス電圧を印加し、サンプル表面と探針先端間に流れるトンネル電流をモニターしながら、サンプルに対して、探針先端とサンプル間にトンネル電流が流れる領域までカンチレバーを近接または接触させた後に、

さらに前記トンネル電流をパラメータとして、形成する開口の大きさを制御することを

30

【請求項 19】

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該先端部付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記先端部に開口を形成する工程とからなる微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、

前記カンチレバーの長手方向と直交し、前記探針の先端を通る軸がサンプル面に対して垂直または垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるように前記カンチレバーを配置し、

サンプル表面にエバネッセント場を形成し、エバネッセント場がプローブ先端で散乱される領域までカンチレバーを近接または接触させた後に、

40

さらに探針先端で散乱されたエバネッセント光の強度をモニターし、該エバネッセント光強度をパラメータとして、形成する開口の大きさを制御することを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項 20】

カンチレバーの先端部に微小な探針を形成する工程と、

該先端部付近を金属膜で覆う工程と、

該探針の先端部分がサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して前記先端部に開口を形成する工程を少なくとも実施する、微小開口付カンチレバーの開口形成方法

において、
前記カンチレバーの長手方向と直交し、探針先端を通る軸がサンプル面に対して垂直ま

50

たは垂直軸から $\pm 45^\circ$ 以内になるようにカンチレバーを配置し、

前記探針に設けられた開口部分に光を導入し、サンプルに対して探針先端を近接または接触させた後に、

さらにエバネッセント場が形成されるまで開口を形成させた後、サンプル表面で散乱されたエバネッセント光の強度をモニターし、該エバネッセント光強度をパラメータとして形成する開口の大きさを制御することを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項 2 1】

前記探針先端にあらかじめ開口部を形成しておき、請求項 1 4 乃至請求項 2 0 のいずれか 1 項記載の微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、前記探針先端にサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して、前記開口部の大きさを整えることを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

10

【請求項 2 2】

請求項 1 4 乃至請求項 2 1 のいずれか 1 項記載の微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、前記カンチレバーの背面から、該カンチレバーの長手方向と直交し、探針先端を通る軸上に沿って、あらかじめ光導波用の穴を形成する工程が含まれることを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

【請求項 2 3】

請求項 1 4 乃至請求項 2 2 のいずれか 1 項記載の微小開口付カンチレバーの開口形成方法において、前記探針の先端に光を導入するための光導波路を設ける工程が含まれることを特徴とする微小開口付カンチレバーの開口形成方法。

20

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、走査型近接場顕微鏡に用いられる光ファイバプローブおよび微小開口付カンチレバーと、それらの開口形成方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来の走査型近接場顕微鏡の光ファイバプローブは、以下に述べるような方法で製造されていた。

30

(1) 先端の先鋭化工程

1 熱引き法：光ファイバにレーザなどで熱を加え、軸方向に光ファイバを引っ張り先鋭化を行う。

【0003】

2 エッチング法：エッチング液の中に光ファイバを浸し、所定のエッチング条件により先端を先鋭化する。

【0004】

(2) 開口形成工程

1 斜め蒸着法：先鋭化されたプローブの最先端部の開口部分を残して、開口以外の部分が金属膜で覆われるように斜め方向から金属を蒸着する。

40

【0005】

2 押付け法：先端部も含め金属膜を蒸着した後、サンプル表面に先端部を押し付けて開口部を形成する方法である。この方法の場合、プローブをシリコン製の光ディテクタ面にシアフォースを利用して距離制御を行いながら接触させ、接触後は外部からの衝撃力などにより、ディテクタ出力をモニターしながら所望の出力が得られるまで先端を破壊していた。

【0006】

また、光ファイバプローブをベント型に加工する場合には(1)と(2)の工程の間に、曲げ工程が行われる。曲げ工程は先鋭化されたプローブにレーザ光を当て、熱的作用により光ファイバを軟化させる。このとき軟化した光ファイバ材料の表面張力の作用によ

50

りプローブが曲げられる。

【0007】

以上のような製造工程は、例えば近接場ナノフォトニクスハンドブック,23~28および42~48,オプトロニクス社に記載されている。また、光ファイバプローブを押し付けて開口を形成する方法は、照山、斎木：近接場光学顕微鏡用ファイバプローブの開口制御方法、第46回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、1030に述べられている。

【0008】

一方、走査型近接場顕微鏡では微小開口付カンチレバーも用いられる（例えば、H.Zhou,A .Midha,L.Bruchhaus,G.Mills,L.Donaldson,and J.M.R.Weaver:Novel SNOM/AFM Probes by combined Micromachining and Electron-Beam Nanolithography,Preliminary Proceeding of STM '99, 459）。微小開口付カンチレバーは窒化シリコンやシリコンなどの材料により半導体プロセスを利用してカンチレバー部と探針を形成し、探針先端に微小開口を設け、微小開口を貫通穴として、カンチレバーの背面に対物レンズなどでビームを集光し貫通穴を通してレーザー光を導入する構成となっている。微小開口付カンチレバーにおいても、通常、先端部は金属膜で覆われている。

10

【0009】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、従来の開口形成方法では、下記の問題があった。

(1) 斜め蒸着方法の場合、再現性良く開口を作るためには蒸着条件の最適化を行う必要があった。この最適化には多くの時間を要し、さらに、プローブの形状が変わった場合にはもう一度最適化をやり直す必要がある。また、最適化をした後も、開口径のばらつきは避けられない。更に、一旦開口を形成した後は修正が不可能で不良品として破棄せざるを得なかった。

20

(2) 押し付け方法の場合、開口形成時に光出力をモニターしているので所望の開口が得られるという利点がある。しかしながら従来の方法では押し付け力の制御が難しく、開口径の微妙な調整は困難であった。このため、押し付け力が強すぎて、開口径が所望径よりも大きくなったり、あるいは先端が破壊されて形状がいびつになることが多かった。

【0010】

そこで、本発明の目的は、従来のこのような問題を解決するため、再現性良く所望の開口径が得られ、先端を塑性変形または破壊するための力の微調が可能な光ファイバプローブおよび微小開口付カンチレバーと、それらの開口形成方法を提供することである。

30

【0011】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するために、本発明の光ファイバプローブおよび微小開口付カンチレバーでは、光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーの探針先端とサンプル間に働く原子間力やシアフォース、またはトンネル電流、エバネッセント光を利用してプローブ先端とサンプルを近接または接触させ、これらいずれかの物理量をパラメータとして探針先端に掛かる力を制御し、探針先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に所望の径の開口を形成するような手段を用いた。

【0012】

40

【作用】

以下に探針先端に掛かる力の制御を行うためのパラメータごとに動作原理を説明する。

(1) 原子間力を利用する場合(コンタクトモード)

この方法は、ベント型の光ファイバプローブおよび微小開口付カンチレバーに用いられ、コンタクトモード原子間力顕微鏡(以下、コンタクトモードAFMと呼ぶ)の原理を用いた方法である。図8(a)に探針とサンプルを近接させた場合のフォースカーブを、図8(b)に図8(a)のフォースカーブ中の番号に対応した、探針とサンプルとの状態図を示す。図8(a)において、横軸はサンプルの動いた距離を示し、左に動いた場合にはサンプルは探針に近づいている。縦軸はカンチレバーの撓み量を示し、上側がカンチレバーに斥力が働く方向で、下側がカンチレバーに引力が働く方向である。

50

【 0 0 1 3 】

一般的なコンタクトモードAFMでは、カンチレバーの撓み量を設定し、撓み量が一定となるように探針とサンプル間の距離をフィードバック制御している。この撓み量はフックの法則により、探針先端に掛かる力に対応する。したがって、撓み量のパラメータを変更することにより、図 8 (a)のフォースカーブから明らかなように原子間力が作用する近接場領域内での探針先端に掛かる力の微調が可能となる。

【 0 0 1 4 】

ここで、サンプルは平面で、探針先端は弾性体で曲率半径Rの球とすると、ヘルツの弾性接触論より、探針先端の接触面積Aと探針先端に掛かる押圧力Fの間には、 $A=KF^{2/3}R^{2/3}$ (Kは定数)の関係が成立する。このとき先端が塑性変形するか破壊されれば開口部の面積が概ねAの微小開口部が形成される。すなわち、押圧力Fにより所望の径を持つ開口が形成される。

10

(2) 原子間力を利用する場合 (振動モード)

この方法も、ベント型の光ファイバプローブおよび微小開口付カンチレバーに用いられ、振動モード原子間力顕微鏡 (以下、振動モードAFMと呼ぶ) の原理を用いた方法である。図 9 に探針をサンプル表面と直交する面内で垂直方向に振動させながら、探針とサンプルを近づけた場合のフォースカーブを示す。横軸はサンプルと探針間の距離を示し、左に動いた場合にはサンプルと探針が近づいている状態である。縦軸はカンチレバーの初期の振幅量に対する振幅の減衰率を示し、0のときカンチレバーは自由振動状態が維持されており、振幅の減衰がない状態で、マイナス側になると探針に外力が作用し、振幅の減衰が生じている状態である。ここで、振幅減衰を生じさせる外力のうち最も寄与率の高いものは、探針とサンプル間距離が離れている場合には原子間力であり、探針とサンプル間の距離を更に近づけていった場合には、間欠的なサンプル表面との接触力である。

20

【 0 0 1 5 】

一般的な振動モードAFMでは、振幅の減衰率を設定し、初期の振動状態から一定量だけ減衰した振幅を保つように探針とサンプル間の距離をフィードバック制御している。この減衰率は、探針先端に掛かる押圧力に対応する。したがって、減衰率のパラメータを変更することにより、図 9 のフォースカーブから明らかなように原子間力が作用する近接場領域内での探針先端に掛かる力の微調が可能となる。

【 0 0 1 6 】

この探針先端の押圧力で先端を塑性変形または破壊することにより所望の径をもつ微小開口部が形成される。

30

【 0 0 1 7 】

また、振動モードAFMでは振幅の減衰率の代わりにカンチレバーの位相の変化によりフィードバックを掛ける場合もある。すなわち、カンチレバーを共振周波数近傍で加振しながら探針とサンプル間の距離を近接させた場合、探針先端に掛かる外力によりカンチレバーの振動の位相が変化する。この位相の変化量を設定すれば、減衰率をパラメータとした場合と同様に探針先端の押圧力をコントロールすることができ、その結果、先端が塑性変形または破壊され所望の径を持った開口が形成される。

(3) シアフォースを利用する場合

40

この方法は、主にストレート型の光ファイバプローブに用いられる。また、ベント型の光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーにも適用可能である。ここで、ストレート型の光ファイバプローブの場合には、プローブの振幅量をモニターし、ベント型の光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーの場合には、ねじれ角をモニターしている。図 10 に探針をサンプル表面と平行な面内で振動させながら、探針とサンプルを近づけた場合のフォースカーブを示す。横軸はサンプルと探針間の距離を示し、左に動いた場合にはサンプルと探針が近づいている状態である。縦軸は光ファイバプローブの初期の振幅量 (ベント型光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーの場合にはねじれ角が振幅に対応する) に対する振幅の減衰率を示し、0のときプローブは自由振動状態が維持されており、振幅の減衰がない状態で、マイナス側になると探針に外力が作用し、振幅の減衰

50

が生じている状態である。ここで、振幅減衰を生じさせる外力はサンプル表面の吸着水によるキャピラリフォース、探針とサンプル間の摩擦力、原子間力などに起因したものである。

【0018】

シアフォース制御では、振幅の減衰率を設定し、初期の振動状態から一定量だけ減衰した振幅を保つように探針とサンプル間の距離をフィードバック制御している。この減衰率は、探針先端に掛かる力に対応する。この力の成分は振動方向に働くシアフォース力と振動方向と垂直方向に働く押圧力である。図10のフォースカーブから明らかなように、減衰率のパラメータを変更することにより、シアフォース力が作用する近接場領域内での探針先端に掛かるシアフォース力の微調が可能となり、またサンプルと探針間の距離が変わることにより押圧力も変化する。これらの力により探針先端が塑性変形または破壊することにより所望の径をもつ微小開口部が形成される。

10

【0019】

また、シアフォース制御の場合も振動モードAFMと同様に、振幅の減衰率の代わりに光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーの位相の変化によりフィードバックを掛けることも可能である。すなわち、光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーを共振周波数近傍で加振しながら探針とサンプル間の距離を近接させた場合、探針先端に掛かる外力によりプローブの振動の位相が変化する。この位相の変化量を設定すれば、減衰率をパラメータとした場合と同様に探針先端のシアフォース力と押圧力をコントロールすることができ、その結果、先端が塑性変形または破壊され所望の径を持った開口が形成される。

20

(4) トンネル電流を利用する場合

この方法は、先端に導電性薄膜が形成されたストレート型およびベント型の光ファイバプローブ、微小開口付カンチレバーに用いられ、走査型トンネル顕微鏡(以下、STMと呼ぶ)の原理を用いた方法である。図11に探針とサンプル表面との間にバイアス電圧を印加した状態での探針とサンプル間距離とトンネル電流値の関係を示す。横軸はサンプルと探針間の距離を示し、左に動いた場合にはサンプルと探針が近づいている状態である。縦軸はトンネル電流値を示す。

【0020】

STM制御では、トンネル電流値を設定し、トンネル電流値が一定を保つように探針とサンプル間の距離をフィードバック制御している。トンネル電流値をパラメータとして探針とサンプル間の距離を近接させていくと、原子間力やサンプル表面の吸着層やコンタミ層などとの相互作用により、探針先端に押圧力が生じる。この押圧力は探針とサンプル間の距離を近づけるほど増大する。したがって、トンネル電流値のパラメータを変更することにより、図11から明らかなように探針とサンプル間の距離が近接しトンネル電流が作用する近接場領域内での探針先端に掛かる押圧力の微調が可能となる。この押圧力で先端を破壊することにより所望の径をもつ微小開口部が形成される。

30

(5) エバネッセント光を利用する場合

この方法は、ストレート型およびベント型の光ファイバプローブ、微小開口付カンチレバーに用いられる。エバネッセント光制御を行う方式には、1 サンプル表面にエバネッセント光を形成する方式と、2 探針先端にエバネッセント光を形成する方式、に分類される。

40

1 サンプル側の表面にエバネッセント光を形成する方式

図12に示すように、プリズムにより構成される透明サンプル101の裏面から全反射条件で光102を入射した場合、サンプル表面にはエバネッセント場103が形成される。このエバネッセント場に探針先端104を近接させると、エバネッセント光が散乱され、伝播光に変換される。エバネッセント光強度はサンプル表面からの距離に依存する。図14にこのときの探針-サンプル表面間と散乱光強度の関係を示す。図14において横軸は探針-サンプル間距離を示し、右に動いた場合に探針とサンプルが近づいている状態である。図14から分かるようにサンプル表面に近づくほど強度が増大する。したがって、探針先端で散乱された光強度により探針とサンプル間の距離制御が可能となる。探針とサンプル間の距離

50

の微調が可能となれば、STM制御の場合と同様に探針先端が塑性変形または破壊され開口部が形成される。

2 探針先端にエバネッセント光を形成する方式

図13に示すように、探針201の先端にあらかじめ所望の開口よりも小さい開口部202を形成しておき、該開口部に光203を導入すれば探針先端にエバネッセント場204が形成される（ただし、開口の大きさは波長よりも小さいものとする）。この状態で探針201とサンプル205を近接させると、サンプル表面でエバネッセント光が散乱され、伝播光に変換される。エバネッセント光強度は開口部からの距離に依存し、図14に示すようにサンプル表面に近づくほど強度が増大する。したがって、探針先端で散乱された光強度により探針とサンプル間の距離制御が可能となる。探針とサンプル間の距離の微調が可能となれば、STM制御の場合と同様に探針先端が破壊され開口部が形成される。

10

【0021】

なお、本方式の場合には開口部を塞いだ状態で、サンプルに探針を接触させて、先端を塑性変形または破壊することにより開口を形成した後、その開口部からのエバネッセント光により制御を掛け、所望の径を持った開口を作製することも可能である。

【0022】

【発明の実施の形態】

以下に、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。

【0023】

図15に光ファイバプローブの押付け法による開口形成前までの製造工程を示す。

20

1 先鋭化工程

光ファイバの先鋭化工程は種々の方法が提案されているが、ここでは熱引き法とエッチング法の代表的な手法について説明する。

【0024】

図15(a1)に熱引き法による光ファイバの先鋭化工程を示す。熱引き法の場合には光ファイバ301に張力を掛けた状態で、CO₂レーザなどのレーザビーム302を光ファイバ301に集光する。このときレーザ光によるエネルギーが集光された部分において熱エネルギーに変わり、局所的な融解がおこる。このとき、光ファイバの両端からさらに張力を掛け続けると、光ファイバがペンシル型に引き伸ばされて、最後に破断する。照射するレーザビームの強度と照射面積、張力の大きさによって破断面の形状とテーパ角度を調整

30

【0025】

次に、エッチング法による先鋭化工程のうち、代表的な2相エッチング法について説明する。図15(a2)に示すように、2相エッチング法ではエッチング液として高濃度のフッ酸溶液303を使用し、フッ酸の気化による濃度変化の防止と、界面におけるプローブ表面の平滑化のため、フッ酸溶液の上に有機溶媒（ヘプタン）304を展開して2相状態とし、その界面より下のフッ酸溶液中でエッチングを行う。光ファイバ305の材料はコアはGeO₂がドープされたSiO₂、クラッドはSiO₂である。

【0026】

このときのエッチング液の混合比（NH₄F(50重量%)：HF(50重量%)：H₂Oの混合比）を変えて

40

【0027】

本発明は、以上、説明した熱引き法、エッチング法に限定されず、一般に使用されている先鋭化工程はすべて本発明に含まれる。

2 曲げ工程（ベントタイプのみ）

図15(b)にベント型の光ファイバプローブの曲げ工程を示す。ベント型の光ファイバプローブとする場合、先鋭化された光ファイバプローブ306の先端付近にCO₂レーザなどのレーザビーム307を集光する。集光された部分は、熱エネルギーの作用によりSiO₂が軟化し、レーザビームが集光されている側と、その逆側との間の表面張力の差によりプロ

50

ープが曲げられる。

【0028】

なお、ベント型プローブをAFM制御で用いる場合には通常プローブ背面にレーザ光を当てて、光てこ法によりプローブの変位を検出する。このレーザ光用の反射面を作製するため、図15(c)に示すように、プローブ背面306aを砥石308で機械的に研磨した。

3 膜付け工程

光ファイバースプローブの先端に微小開口部を作製するため、図15(d)に示すような方法で、Alの膜を蒸着する。

【0029】

先鋭化された光ファイバースプローブ309を真空蒸着器内に固定し、Alを蒸着する。このとき蒸着源310に対するプローブの取り付け角度は、先端部にはAlが蒸着されないように設定し、光ファイバースプローブ309を回転させて先端部の周囲にAlを蒸着した。なお、この段階では、この後の工程で先端開口部を押し広げるため、厳密に開口を作製する必要はなく、開口の大きさが所望の開口径よりも小さく作製されていれば、開口の一部、または全部が金属膜により塞がっている状態でも問題ない。

【0030】

ここで、膜付けに使用する金属はAlに限定されず、AuやCrなど任意の材料が使用できる。また、膜付け方法も上記の方法に限定されない。

【0031】

次に、微小開口付カンチレバーの押付け法による開口形成前までの製造工程を示す。

1 探針付カンチレバー作製工程

探針付カンチレバーの作製方法には種々の方式が使用されているが、ここでは代表的な窒化シリコン製カンチレバーの製造方法の実施形態例を説明する。

【0032】

窒化シリコン膜製のカンチレバーの製造方法を図16に示す。図16(a)に示すように、シリコン基板401上に、カンチレバーの探針部の型となる四角錐状の穴401aを形成する。次に、図16(b)に示すように、シリコン基板上にカンチレバーと探針部を作製するための窒化シリコン製の膜402を堆積する。次に、図16(c)に示すように、この窒化シリコン膜をカンチレバーの形状に選択エッチングすることにより、カンチレバーパターン403を形成する。次に、図16(d)に示すように、カンチレバーの末端に支持部404を接合する。最後に、図16(e)に示すように、シリコン基板401をエッチングにより除去し、カンチレバーを作製する。

【0033】

カンチレバーとしては、本実施形態例の他にも、シリコン膜や酸化シリコン膜により構成されるカンチレバーなど他の形態のカンチレバーも使用されており、いずれも本発明に含まれる。

2 穴あけ工程

カンチレバー501への穴あけは、図17(a)に示すように、カンチレバーの背面側から探針先端に掛けて、集積イオンビーム(FIB)502により貫通穴501aを加工する。このときの穴径は任意であるが、本実施形態例では穴の直径は100nmとした。穴あけ工程はFIB加工に限定されず、電子ビーム加工やレーザ加工による方法なども本発明に含まれる。

3 膜付け工程

図17(b)に示すように、穴あけされたカンチレバーを真空蒸着器内に固定し、Al膜504を蒸着する。このとき蒸着源503に対するカンチレバー501の取り付け角度は、先端部にはAlが蒸着されない様に設定した。カンチレバーの場合も光ファイバースプローブと同様に、この後の工程で先端開口部を押し広げるため、厳密に開口を作製する必要はなく、開口の大きさが所望の開口径よりも小さく作製されていれば、開口の一部、または全部が金属膜により塞がっている状態でも問題ない。膜付けに使用する金属はAlに限定されず、AuやCrなど任意の材料が使用できる。

【0034】

10

20

30

40

50

次に、押付け法による開口形成工程について説明する。

【0035】

図1は、本発明の第一の実施形態例である、コンタクトAFMを用いてベント型光ファイバースプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0036】

本装置は、サンプル2をプローブ1に近づけるための粗動機構3と、サンプル2とプローブ1間の距離の微調を行うZ微動機構4aと、サンプルを2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構4bと、サンプルを載置するためのサンプルホルダ5と、プローブ1を固定するためのプローブホルダ5と、プローブの変位量を測定するための変位検出装置6と、システム全体の制御を行う制御装置7から構成される。ここで、粗動機構3はモータで送りネジを駆動する方式を用い、XYおよびZ微動機構には円筒型圧電素子4を用いた。また、変位検出手段は半導体レーザー6aをプローブ背面に設けられた反射面1aに当て、4分割のディテクタ6bによりプローブの変位量の測定を行う光てこ方式の光学ヘッドを用いた。

10

【0037】

ベント型の光ファイバースプローブ部分の開口部1bはあらかじめAlの金属膜がコートされほとんど塞がれた状態で、最終的に必要とされる微小開口径（ここでは50nm）よりも小さなピンホールが僅かに残っているのみである。

【0038】

本装置を使用して、ベント型光ファイバースプローブ1の撓み量をモニターしながら、粗動機構3によりサンプル2をプローブ1に近接させる。プローブ1とサンプル2間に原子間力が作用する領域まで近づけ、あらかじめ設定した撓み量になると粗動機構3をストップさせ、Z微動機構4aにより、この撓み量が一定となるようにフィードバックを掛ける。この撓み量の初期設定値でのプローブ先端が受ける押圧力は先端が破壊されない程度の力である。その後、制御装置の撓み量のパラメータを変えていき、プローブとサンプル間の距離をZ微動機構4aにより徐々に近接させて先端に掛かる押圧力を増していき先端を破壊し、開口部を形成する。本実施形態では、あらかじめ開口径と撓み量の関係を実験により定量化しているため、撓み量を設定することにより任意の径を持つ開口部を形成することができる。

20

【0039】

本方式の、撓み量をパラメータとする方式は微小開口付カンチレバーにも適用できる。

30

【0040】

図2は本発明の第二の実施形態例である、振動モードAFMを用いて微小開口付カンチレバーの先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0041】

本装置は、サンプル11を探針10aに近づけるための粗動機構3と、サンプル11と探針10a間の距離の微調を行うZ微動機構4aと、サンプル1を2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構4bと、サンプル1を載置するためのサンプルホルダ15と、カンチレバー励振用の圧電素子12が付いたカンチレバーホルダ13と、カンチレバーの振幅量を測定するための振幅検出装置6と、システム全体の制御を行う制御装置14から構成される。ここで、粗動機構3はモータで送りネジを駆動する方式を用い、XYおよびZ微動機構には円筒型圧電素子4を用いた。また、振幅検出手段は半導体レーザー6aをカンチレバー背面に設けられた反射面10bに当て、4分割のディテクタ6bによりカンチレバーの振幅量の測定を行う光てこ方式の光学ヘッド6を用いた。

40

【0042】

微小開口付きカンチレバー10はあらかじめFIB加工により探針部分に穴が空けられているが、先端開口部10cは初期の状態ではAlの金属膜がコートされ塞がれた状態である。

【0043】

本装置を使用して、カンチレバー10を共振周波数近傍で励振し、振幅量をモニターしながら、粗動機構3によりサンプル11を探針10aに近接させる。サンプル11と探針10a間に原子間力が作用する領域まで近づけ、あらかじめ設定した量だけ振幅が減衰すると粗動機構

50

3をストップさせ、Z微動機構4aにより、この振幅量が一定となるようにフィードバックを掛ける。この振幅量の初期設定値での探針先端が受ける押圧力は先端が破壊されない程度の力である。この後、制御装置14の振幅減衰率のパラメータを変えていき、探針とサンプル間の距離をZ微動機構4aにより徐々に近接させて先端に掛かる押圧力を増していき先端を破壊し、開口部を形成する。本実施形態においても、あらかじめ開口径と振幅減衰率の関係を実験により定量化しているため、振幅減衰率を設定することにより任意の径を持つ開口部を形成することができる。

【0044】

本実施形態では探針とサンプル間の距離制御のパラメータとして振幅の減衰率を用いたが、位相の変化により制御を掛ける方式も考えられる。

10

【0045】

振動モードAFMによる制御方式はベント型光ファイバプローブにも適用できる。

【0046】

図3は本発明の第三の実施形態例である、シアフォース制御を用いて、ストレート型光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0047】

本装置は、サンプル21をプローブ20に近づけるための粗動機構3と、サンプル21とプローブ20間の距離の微調を行うZ微動機構4aと、サンプル21を2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構4bと、サンプルを載置するためのサンプルホルダ26と、プローブ励振用の圧電素子22が付いたプローブホルダ23と、プローブ20の振幅量を測定するための振幅検出手段24と、システム全体の制御を行う制御装置25から構成される。ここで、粗動機構3はモータで送りネジを駆動する方式を用い、XYおよびZ微動機構には円筒型圧電素子4を用いた。また、振幅検出手段は圧電体24aにプローブ20を固着し、プローブ先端に働く力の変化を圧電体の電荷量の変化に変換して、振幅量を測定する方式とした。

20

【0048】

光ファイバプローブの開口部20aはあらかじめAlの金属膜がコートされ、ほとんど塞がれた状態で、最終的に必要とされる微小開口径（ここでは50nm）よりも小さなピンホールが僅かに残っているのみである。

【0049】

本装置を使用して、プローブ20をサンプル表面と平行な面内で共振周波数近傍で加振し、振幅量をモニターしながら、粗動機構3によりサンプル21をプローブ20に近接させる。サンプル21とプローブ20間にシアフォース力が作用する領域まで近づけ、あらかじめ設定した量だけ振幅が減衰すると粗動機構3をストップさせ、Z微動機構4aにより、この振幅量が一定となるようにフィードバックを掛ける。この振幅量の初期設定値でのプローブ先端が受ける押圧力とシアフォース力は先端が破壊されない程度の力である。この後、制御装置の振幅減衰率のパラメータを変えていき、プローブとサンプル間の距離をZ微動機構4aにより徐々に近接させて先端に掛かる押圧力とシアフォース力を増していき先端を破壊し、開口部を形成する。本実施形態においても、あらかじめ開口径と振幅減衰率の関係を実験により定量化しているため、振幅減衰率を設定することにより任意の径を持つ開口部を形成することができる。

30

40

【0050】

本実施形態ではプローブとサンプル間の距離制御のパラメータとして振幅の減衰率を用いたが、位相の変化により制御を掛ける方式も考えられる。

【0051】

振幅量の検出方式は、圧電方式の他にも、レーザを用いて光学的に振幅量を測定する方式なども使用可能である。

【0052】

また、シアフォース制御は、ストレート型の光ファイバプローブに限らず、微小開口付カンチレバーやベント型の光ファイバプローブでも適用可能である。これらの場合、カンチレバーまたはベント型のプローブ先端の探針部が、サンプルと平行な面内で振動する

50

ように、カンチレバーまたはベント型プローブをねじり振動させる。このとき、プローブ先端に掛かる力によるねじれ角の変化量をモニターする。このねじれ角はストレート型光ファイバプローブを用いた場合の振幅量に対応し、探針とサンプル間の距離制御が可能である。したがって、第三実施形態例と同じ原理により探針先端に開口を形成することが可能である。

【0053】

図4は本発明の第四の実施形態例である、STM制御を用いて、ストレート型光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0054】

本装置は、導電性のサンプル31をプローブ30に近づけるための粗動機構3と、サンプル31とプローブ30間の距離の微調を行うZ微動機構4aと、サンプル31を2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構4bと、導電性のサンプルを固定するための導電性サンプルホルダ36と、プローブ固定用のプローブホルダ32と、プローブ30とサンプル31間にバイアス電圧を印加するための電圧印加装置33と、プローブ30とサンプル31間に流れるトンネル電流値を測定するための電流測定手段34と、システム全体の制御を行う制御装置35から構成される。ここで、粗動機構3はモータで送りネジを駆動する方式を用い、XYおよびZ微動機構には円筒型圧電素子4を用いた。また、サンプル31はガラスにAuコートをして導電性を持たせたサンプルを用い、サンプルホルダ36を介して、サンプルホルダにバイアス電圧を掛けた。

【0055】

光ファイバプローブは開口部を含めプローブ全体に、Auの金属膜がコートされ、開口部はほとんど塞がれた状態である。このようにプローブ自体も導電性被膜で覆われているため、プローブ30とサンプル31の距離が近接すると両者の間にトンネル電流が流れる。

【0056】

本装置を使用して、電流量をモニターしながら、粗動機構3によりサンプル31をプローブ30に近接させる。プローブ30とサンプル31間にトンネル電流が流れる領域まで近づけ、トンネル電流値があらかじめ設定した量になると、粗動機構3をストップさせ、Z微動機構4aにより、このトンネル電流値が一定となるようにフィードバックを掛ける。このトンネル電流値の初期設定値でのプローブ先端が受ける押圧力は先端が破壊されない程度の力である。この後、制御装置35のトンネル電流のパラメータを変えていき、プローブ30とサンプル31間の距離をZ微動機構4aにより徐々に近接させて先端に掛かる押圧力を増していき先端を破壊し、開口部30aを形成する。本実施形態においても、あらかじめ開口径とトンネル電流値の関係を実験により定量化しているため、トンネル電流値を設定することにより任意の径を持つ開口部を形成することができる。

【0057】

STMによる制御方式は、先端に導電性の金属膜が形成されたベント型光ファイバプローブや微小開口付カンチレバーにも適用できる。

【0058】

図5は本発明の第五の実施形態例である、エバネッセント光制御を用いて、微小開口付カンチレバー先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0059】

本装置は、サンプルとして用いられるプリズム41を探針40aに近づけるための粗動機構3と、プリズム41と探針40a間の距離の微調を行うZ微動機構4aと、プリズム41を2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構4bと、カンチレバー40固定用のカンチレバーホルダ42と、プリズム41の下方から全反射条件でレーザー光を入射するように構成されたレーザー光学系43と、カンチレバー先端で散乱された光強度を検出するための光検出装置44と、システム全体の制御を行う制御装置45から構成される。ここで、粗動機構3はモータで送りネジを駆動する方式を用い、XYおよびZ微動機構には円筒型圧電素子4を用い、光検出装置44は光電子増倍管44aを用いた。

【0060】

10

20

30

40

50

微小開口付きカンチレバー40はあらかじめFIB加工により探針部分に貫通穴が空けられているが、先端開口部4bは初期の状態ではAlの金属膜がコートで塞がれた状態である。

【0061】

本装置を使用して、開口を形成する場合、レーザビームをプリズム41の下方から全反射条件で入射させ、プリズム表面にエバネッセント場を形成する。次に粗動機構3によりプリズム41を探針40aに近接させる。探針40aがエバネッセント領域まで近づくと、探針先端で、エバネッセント光が散乱され、伝播光に変換される。この伝播光はエバネッセント場発生領域の斜め上方に設置された集光レンズ46により集光され光電子増倍管44aにより強度が測定される。エバネッセント光強度はプリズム表面からの距離に依存するため、この散乱光強度が一定となるようにフィードバックを掛ければ、探針とプリズム表面間の距離制御が可能となる。散乱光強度があらかじめ設定した量になると、粗動機構3をストップさせ、Z微動機構4aにより、この散乱光強度が一定となるようにフィードバックを掛ける。この散乱光強度の初期設定値での探針先端が受ける押圧力は先端が破壊されない程度の力である。この後、制御装置の散乱光強度のパラメータを変えていき、探針40aとプリズム41間の距離をZ微動機構4aにより徐々に近接させて先端に掛かる押圧力を増していき先端を破壊し、開口部を形成する。本実施形態においても、あらかじめ開口径と散乱光強度の関係を実験により定量化しているため、散乱光強度を設定することにより任意の径を持つ開口部を形成することができる。

10

【0062】

エバネッセント光による制御はベント型光ファイバースプロブやストレート型の光ファイバースプロブにも適用できる。

20

【0063】

また、散乱光検出はプロブ先端で集光された光をプロブの開口部で集光し、光ファイバーで伝播された光の強度を光ファイバーの末端で検出する方式も考えられる。

【0064】

図6は本発明の第六の実施形態例である、エバネッセント光制御を用いて、ストレート型の光ファイバースプロブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0065】

本装置は、サンプル51をプロブ50に近づけるための粗動機構3と、サンプル51とプロブ50間の距離の微調を行うZ微動機構4aと、サンプル51を2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構4bと、サンプルを載置するためのサンプルホルダ56と、プロブ固定用のプロブホルダ52と、光ファイバースプロブにレーザ光を入射するためのレーザ光学系53と、散乱光強度を検出するための光検出装置54と、システム全体の制御を行う制御装置55から構成される。ここで、粗動機構3はモータで送りネジを駆動する方式を用い、XYおよびZ微動機構には円筒型圧電素子4を用い、光検出装置54は光電子増倍管54aを用いた。

30

【0066】

光ファイバースプロブの開口部50aはあらかじめAlの金属膜がコートされほとんど塞がれた状態で、最終的に必要とされる微小開口径（ここでは50nm）よりも小さなピンホールが僅かに残っているのみである。

【0067】

40

本装置を使用して、開口を形成する場合、レーザビームを集光レンズ58により集光して、光ファイバースプロブの末端50bから入射させ、プロブ先端に設けられた微小開口部50a近傍にエバネッセント場を形成する。次に粗動機構3によりサンプル51をプロブ50に近接させる。サンプル51がプロブ50の先端まで近づくと、サンプル表面で、エバネッセント光が散乱され、伝播光に変換される。この伝播光はプロブ先端の斜め上方に設置された集光レンズ57により集光され光電子増倍管54aにより強度が測定される。エバネッセント光強度はサンプル表面からの距離に依存するため、この散乱光強度が一定となるようにフィードバックを掛ければ、プロブとサンプル表面間の距離制御が可能となる。散乱光強度があらかじめ設定した量になると、粗動機構3をストップさせ、Z微動機構4aにより、この散乱光強度が一定となるようにフィードバックを掛ける。この散乱光強度の初期設

50

定値でのプローブ先端が受ける押圧力は先端が破壊されない程度の力である。この後、制御装置の散乱光強度のパラメータを変えていき、プローブ50とサンプル51間の距離をZ微動機構4aにより徐々に近接させて先端に掛かる押圧力を増していき先端を押し広げ、所望の径を持つ開口部を形成する。本実施形態においても、あらかじめ開口径と散乱光強度の関係を実験により定量化しているため、散乱光強度を設定することにより任意の径を持つ開口部を形成することができる。

【0068】

本方式も、ベント型光ファイバースプローブや、微小開口付カンチレバーなどに適用可能である。

【0069】

図7は本発明の第七の実施形態例である、開口の大きさを光学顕微鏡像や開口からの光強度により見積もりながら、コンタクトAFM制御によりベント型の光ファイバースプローブ60の先端に開口を形成する装置の概略図である。

【0070】

本装置は、サンプル61をプローブ60に近づけるための粗動機構3と、サンプル61とプローブ60間の距離の微調を行うZ微動機構68aと、サンプルを2次元平面内でスキャンするためのXY微動機構68bと、サンプルを載置するためのサンプルホルダ71と、プローブ60を固定するためのプローブホルダ75と、プローブの変位量を測定するための変位検出装置6と、システム全体の制御を行う制御装置70とサンプルの下側からサンプル表面を観察可能な倒立型の顕微鏡76から構成される。このとき、サンプル61は透明ガラスとし、サンプル下方 20
に対物レンズ62を配置しプローブ先端60aの光学像を全反射ミラー72と結像レンズ73およびハーフミラー64からなる光学系を介してCCDカメラ63で観察可能にするとともに、ハーフミラー64により光路を2分割して光電子増倍管65により光強度の測定も可能な構成とする。また、ここで使用されるZ微動機構68aとXY微動機構68bは対物レンズ62を取り囲むように配置された3本の円筒型圧電素子68から構成され、これらを同一方向に駆動することにより、これらの円筒型圧電素子上に設けられたサンプルホルダ71を動作させる。

【0071】

本装置により、レーザ光学系69の光を集光レンズ74でプローブ末端60bに入射し、対物レンズ62の焦点をフォーカシング機構66によりサンプル表面に合せた状態で粗動機構3により、サンプル61をプローブ60に近づけていき、原子間力が作用する領域まで近づくと、CCDカメラ63の像によりモニター67上に開口形状が観察されるとともに、プローブ先端60aに形成されたエバネッセント光がサンプル表面で散乱され、サンプル61を透過した光が対物レンズ62で集光され、光電子増倍管65により強度が測定される。このときのプローブの撓み量を光てこ方式を用いた光ヘッド6により計測し、撓み量をパラメータとしてZ微動機構68aによりフィードバックを掛けながら更に制御装置70により撓み量を増加させ、プローブ先端に掛かる押圧力を増加させると、先端開口部60aが塑性変形または破壊し押し広げられる。このときの開口径はCCDカメラ63の像により先端からの漏れ光を観察するか、あるいは光電子増倍管65により光強度を測定することにより見積もることができ、所望の開口径が得られるまで撓み量を増大させる。この方法は、撓み量をパラメータとする場合に限定されず、他の距離制御方式にも適用される。また、ストレート型の光ファイバースプローブにも適用できる。 40

【0072】

開口付カンチレバーについても、CCDカメラによる光学像や光電子増倍管による光強度を目安にして、前述の距離制御方式により開口形成が可能である。この場合、レーザ光の導入はカンチレバーの上側に対物レンズを配置し、カンチレバーに空けられた開口部に背面から光を集光する。また、カンチレバー上に光導波路を形成し、光ファイバーや対物レンズなどで光導波路にレーザ光をカップリングさせ開口部に光を導く方式も適用できる。

【0073】

【発明の効果】

本発明は、以上説明したように、光ファイバースプローブや微小開口付カンチレバーの探針 50

先端とサンプル間に働く原子間力やシアフォース、またはトンネル電流、エバネッセント光を利用してプローブ先端とサンプルを近接または接触させ、これらいずれかの物理量をパラメータとして探針先端に掛かる力を制御し、探針先端部をサンプル表面から受ける力により塑性変形または破壊して先端部に所望の径の開口を形成するような手段を用いて、光ファイバプローブまたは微小開口付カンチレバーの開口形成を行うようにした。

【0074】

このような方法を用いることにより、従来からの蒸着による開口の際に行っていた蒸着条件の最適化を行う必要が不要となり、光ファイバプローブまたは微小開口付カンチレバーの種類や形状が変わっても再現性よく開口を形成することが可能となった。また、開口を形成した後に開口径を修正することも可能になった。

10

【0075】

さらに、光ファイバプローブまたは微小開口付カンチレバーの探針をサンプルに押付けて開口を形成する場合、従来の方法よりも押し付け力の微調が可能となり、開口径が大きくなりすぎたり、あるいは開口形状がいびつになるなどの失敗が少なくなり、容易に開口が形成できるようになった。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第一の実施形態例である、コンタクトAFM制御方式によりベント型光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【図2】本発明の第二の実施形態例である、振動モードAFM制御方式により微小開口付カンチレバーの先端に開口を形成する装置の概略図である。

20

【図3】本発明の第三の実施形態例である、シアフォース制御によりストレート型光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【図4】本発明の第四の実施形態例である、STM制御によりストレート型光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【図5】本発明の第五の実施形態例である、エバネッセント光制御により微小開口付カンチレバー先端に開口を形成する装置の概略図である。

【図6】本発明の第六の実施形態例である、エバネッセント光制御によりストレート型の光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

【図7】本発明の第七の実施形態例である、開口の大きさを光学顕微鏡像や開口からの光強度により見積もりながら、コンタクトAFM制御によりベント型の光ファイバプローブ先端に開口を形成する装置の概略図である。

30

【図8】コンタクトAFM制御のフォースカーブと探針の状態図である。

【図9】振動モードAFM制御のフォースカーブである。

【図10】シアフォース制御のフォースカーブである。

【図11】STM制御の探針-サンプル間距離と電流値の関係を示したグラフである。

【図12】エバネッセント光制御方式を説明するための模式図である。

【図13】エバネッセント光制御方式を説明するための模式図である。

【図14】エバネッセント光制御の探針-サンプル間距離とエバネッセント光強度の関係を示したグラフである。

【図15】従来の光ファイバプローブの作製方法を説明するための模式図である。

40

【図16】カンチレバーの作製方法を説明するための模式図である。

【図17】従来の微小開口付カンチレバーの開口形成方法を説明するための模式図である。

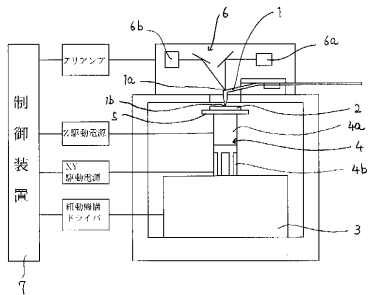
【符号の説明】

- 1 ベント型光ファイバプローブ
- 2 サンプル
- 3 粗動機構
- 4 スキャナ
- 6 光学ヘッド
- 10 微小開口付カンチレバー

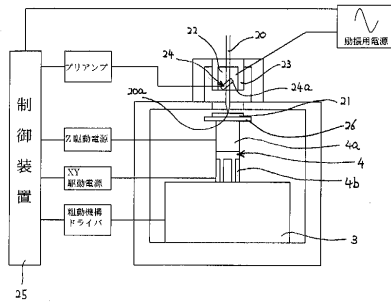
50

1 1	サンプル	
1 2	励振用圧電素子	
1 3	カンチレバーホルダ	
2 0	ストレート型光ファイバークローブ	
2 1	サンプル	
2 2	励振用圧電素子	
2 3	クローブホルダ	
2 4	振幅検出装置	
3 0	ストレート型光ファイバークローブ	
3 1	サンプル	10
3 2	クローブホルダ	
3 3	電圧印加装置	
3 4	トンネル電流検出装置	
4 0	微小開口付カンチレバー	
4 1	プリズム	
4 2	カンチレバーホルダ	
4 3	レーザ光学系	
4 4	光検出装置	
5 0	ストレート型光ファイバークローブ	
5 1	サンプル	20
5 2	クローブホルダ	
5 3	レーザ光学系	
5 4	光検出装置	
6 0	ベント型光ファイバークローブ	
6 1	サンプル	
6 2	対物レンズ	
6 3	CCDカメラ	
6 5	フォトマル	
6 8	スキャナ	
6 9	レーザ光学系	30
7 5	クローブホルダ	
7 6	倒立型顕微鏡	

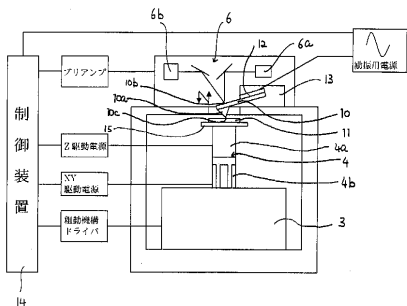
【図1】



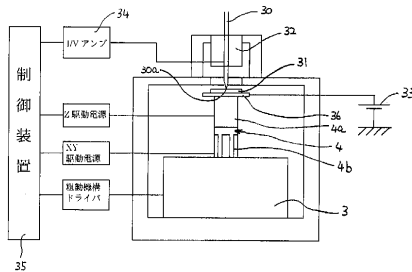
【図3】



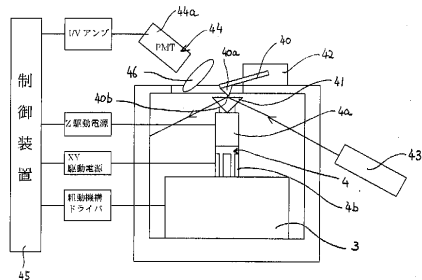
【図2】



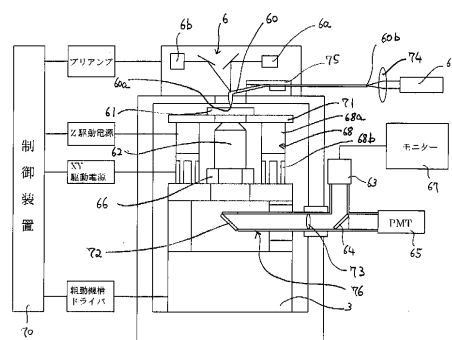
【図4】



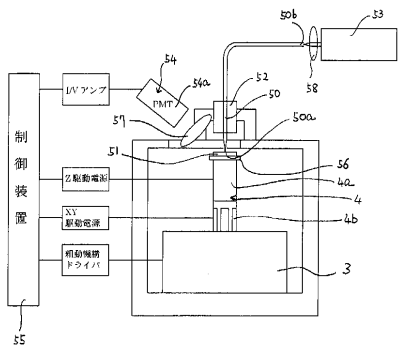
【図5】



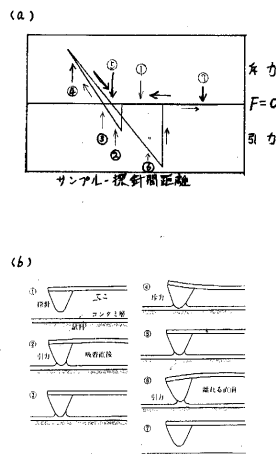
【図7】



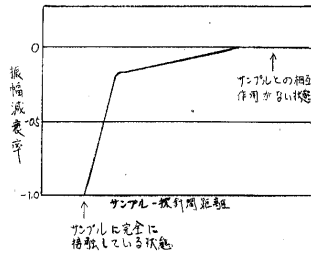
【図6】



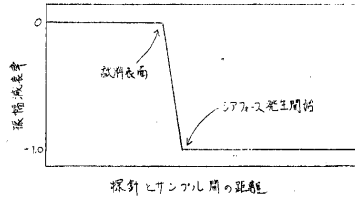
【図8】



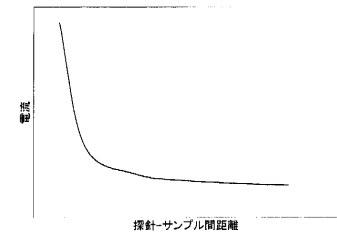
【 図 9 】



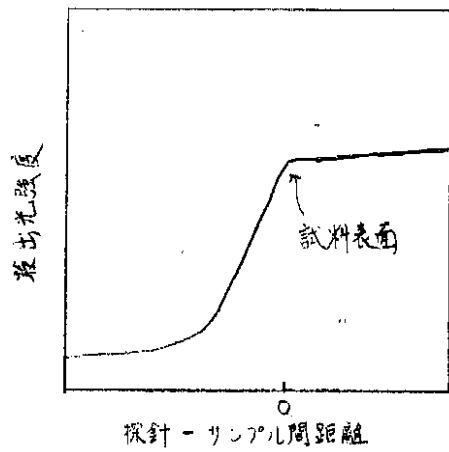
【 図 10 】



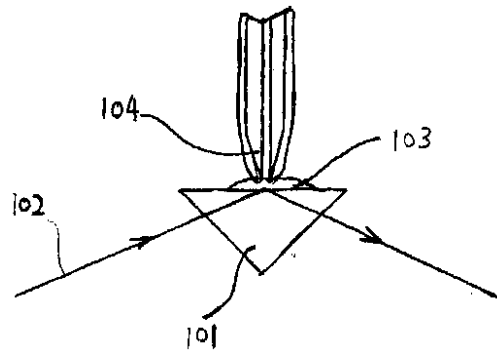
【 図 11 】



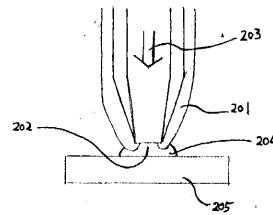
【 図 14 】



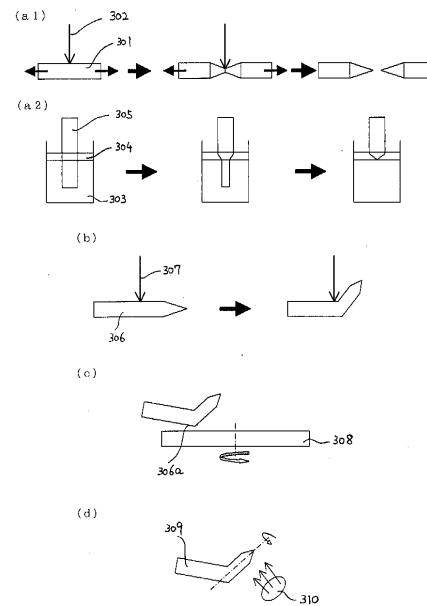
【 図 12 】



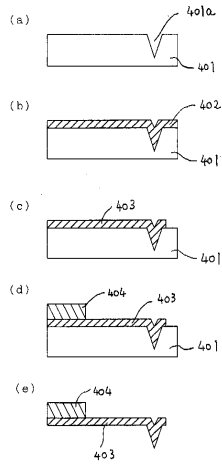
【 図 13 】



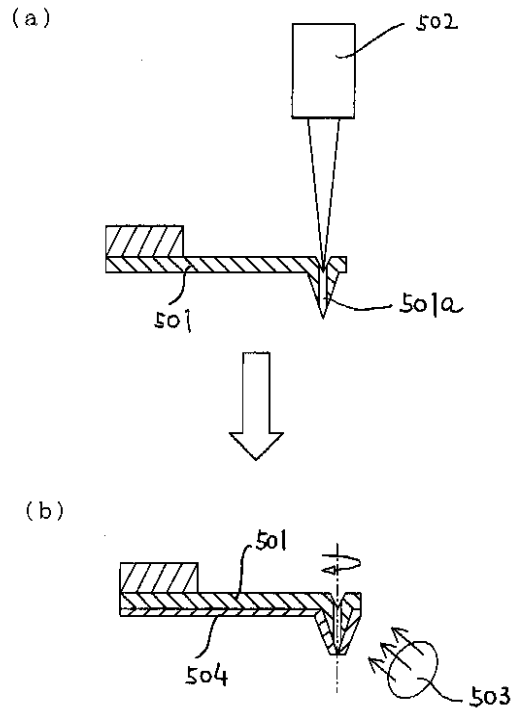
【 図 15 】



【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 国際公開第99/031514(WO, A1)
特開平09-269329(JP, A)
特開昭59-121302(JP, A)
特開平11-281658(JP, A)
特開平11-295327(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N 13/10-13/24
JSTPlus(JDream2)