

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2008-506118

(P2008-506118A)

(43) 公表日 平成20年2月28日(2008.2.28)

(51) Int.Cl.

GO1N 13/16 (2006.01)

F 1

GO1N 13/16 101G
GO1N 13/16 101D

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2007-520499 (P2007-520499)
 (86) (22) 出願日 平成17年7月7日 (2005.7.7)
 (85) 翻訳文提出日 平成19年3月2日 (2007.3.2)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2005/024098
 (87) 国際公開番号 WO2006/014542
 (87) 国際公開日 平成18年2月9日 (2006.2.9)
 (31) 優先権主張番号 10/887,608
 (32) 優先日 平成16年7月8日 (2004.7.8)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

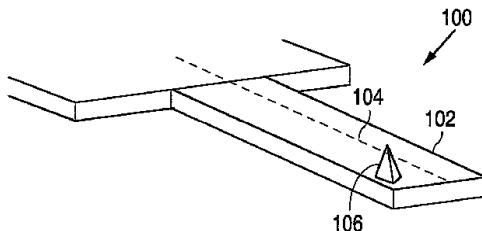
(71) 出願人 599108976
 ザ・ボード・オブ・トラスティーズ・オブ
 ・ザ・レランド・スタンフォード・ジュニ
 ア・ユニバーシティ
 THE BOARD OF TRUSTE
 ES OF THE LELAND ST
 ANFORD JUNIOR UNIVE
 RSITY
 アメリカ合衆国 カリフォルニア 943
 06, パロ アルト, エル カミノ リア
 ル 1705
 (74) 代理人 100082005
 弁理士 熊倉 賢男
 (74) 代理人 100067013
 弁理士 大塚 文昭

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】原子間力顕微鏡で高周波力成分を検出するためのねじれ調波片持ち梁

(57) 【要約】

原子間力顕微鏡に使用するための片持ち梁は、ベース部材に取り付けられた固定端、及び自由端を有する片持ち梁アームであって、第1形状及び該第1形状に関連したねじれ軸を有するような片持ち梁アームと、自由端付近で片持ち梁アームから突出するプローブ尖端であって、ねじれ軸からオフセット変位で配置されているプローブ尖端と、を備えている。或いは又、片持ち梁アームは、選択されたねじれモードのねじれ共振周波数又は基本的モードの基本的撓み共振周波数を、このねじれ共振周波数及び基本的撓み共振周波数が整数比を有するよう、同調させるよう選択された第1形状を有する。このように、ねじれ調波片持ち梁の、その調波周波数におけるねじれ運動は、主として、それに対応するねじれ共振により改善される。



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

原子間力顕微鏡に使用するための片持ち梁において、
ベース部材に取り付けられた固定端、及び自由端を有する片持ち梁アームであって、第1形状及び該第1形状に関連したねじれ軸を有するような片持ち梁アームと、
前記自由端付近で前記片持ち梁アームから突出するプローブ尖端であって、前記ねじれ軸からオフセット変位して配置されているプローブ尖端と、
を備えた片持ち梁。

【請求項 2】

前記プローブ尖端は、前記ねじれ軸から少なくとも約2μmに配置される、請求項1に記載の片持ち梁。

【請求項 3】

前記プローブ尖端は、前記ねじれ軸から離れて前記片持ち梁アームの外縁付近に配置される、請求項1に記載の片持ち梁。

【請求項 4】

前記片持ち梁アームは、選択されたねじれモードのねじれ共振周波数又は基本的モードの基本的撓み共振周波数に同調するように選択された第1形状を有し、前記ねじれ共振周波数及び前記基本的撓み共振周波数が整数比を有するようにする、請求項1に記載の片持ち梁。

【請求項 5】

前記整数比は、全数と、最も近い全数より若干大きいか又は小さい端数とを含み、片持ち梁が、前記基本的共振周波数又はそれより若干低いか若干高い駆動周波数において駆動されたときに、前記ねじれ共振周波数がその駆動周波数の整数倍となるようにする、請求項4に記載の片持ち梁。

【請求項 6】

前記整数比は、全数と、最も近い全数の2.0%以内の端数とを含む、請求項5に記載の片持ち梁。

【請求項 7】

前記片持ち梁アームは、開口で分離された第1アーム部分及び第2アーム部分を備え、前記開口は、前記固定端と自由端との間に少なくとも部分的に延びる、請求項1に記載の片持ち梁。

【請求項 8】

前記片持ち梁アームは、第1形状を有し、そして前記第1及び第2のアーム部分の各々は、ねじれ共振周波数を、前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数の整数倍に同調するよう選択された巾を有する、請求項7に記載の片持ち梁。

【請求項 9】

前記片持ち梁アームの開口は、延長されると共に、前記第1アーム部分と第2アーム部分との間に分離を与える、前記延長及び分離は、ねじれ共振周波数を、片持ち梁の基本的撓み共振周波数の整数倍に同調するよう選択される、請求項7に記載の片持ち梁。

【請求項 10】

前記片持ち梁アームは、1つ以上の対応する開口により分離された複数のアーム部分を備え、各開口は、前記固定端と自由端との間の場所に配置され、そして前記固定端と自由端との間に延長され、各開口は、一対の隣接するアーム部分に対して分離を与える、請求項4に記載の片持ち梁。

【請求項 11】

各開口の場所、又は各開口の延長、又は各対の隣接アーム部分間の分離は、ねじれ共振周波数を、前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数の整数倍に同調するよう調整される、請求項10に記載の片持ち梁。

【請求項 12】

前記複数のアーム部分は、互いに平行である、請求項10に記載の片持ち梁。

10

20

30

40

50

【請求項 1 3】

前記複数のアーム部分は、互いに逆平行である、請求項 1 0 に記載の片持ち梁。

【請求項 1 4】

前記 1 つ以上の開口の場所は、ねじれ共振周波数を同調するために前記選択されたねじれモードの高角度変位領域にある、請求項 1 0 に記載の片持ち梁。

【請求項 1 5】

前記片持ち梁アームは、前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数を、前記選択されたねじれモードで割り切れる整数の値に同調するように選択された第 1 長さを有する、請求項 4 に記載の片持ち梁。

【請求項 1 6】

前記片持ち梁アームは、実質的に長方形の形状を有し、そして前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数を、前記選択されたねじれモードで割り切れる整数の値に同調するように選択された長さ対巾の比を有する、請求項 4 に記載の片持ち梁。

【請求項 1 7】

前記片持ち梁アームは、基本的モードの高変位領域において、前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数を、前記選択されたねじれモードで割り切れる整数の値に同調するように選択された有効巾又は有効厚みを有する、請求項 4 に記載の片持ち梁。

【請求項 1 8】

前記片持ち梁アームは、基本的モードの高機械的ストレス領域において、前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数を、前記選択されたねじれモードで割り切れる整数の値に同調するように選択された有効巾又は有効厚みを有する、請求項 4 に記載の片持ち梁。

【請求項 1 9】

前記片持ち梁アームは、前記片持ち梁の基本的撓み共振周波数を前記選択されたねじれモードで割り切れる整数の値に同調するために拡大自由端をもつ実質的に長方形の形状を含む、請求項 4 に記載の片持ち梁。

【請求項 2 0】

片持ち梁の尖端とサンプルとの間の相互作用の高周波の力を測定する方法において、片持ち梁アーム、及び該片持ち梁アームの自由端に形成されたプローブ尖端を有する片持ち梁を用意するステップであって、前記片持ち梁アームは、第 1 形状、及び該第 1 形状に関連したねじれ軸を有し、そして前記プローブ尖端は、ねじれ軸からオフセット変位して配置されるようなステップと、

基本的撓み共振周波数又はその付近において所定の発振振幅で前記片持ち梁を振動させるステップと、

前記サンプル付近へ前記片持ち梁を持って行くステップと、

前記プローブ尖端を使用して前記サンプルの表面を繰り返しタップするステップと、

前記サンプルの表面上の特徴部に応答して前記片持ち梁がそらされるときに前記片持ち梁の高周波振動調波の振幅又は位相の変化を検出するステップと、
を備えた方法。

【請求項 2 1】

前記片持ち梁の高周波振動調波の振幅又は位相の変化を検出する前記ステップは、前記片持ち梁の高周波ねじれ振動調波の振幅又は位相の変化を検出することを含む、請求項 2 0 に記載の方法。

【請求項 2 2】

前記片持ち梁の高周波ねじれ振動調波の振幅又は位相の変化を検出することは、
4 象限に分割された光検出器を用意し、

第 1 象限及び第 2 象限からの信号の和と第 3 象限及び第 4 象限からの信号の和との間の差を使用して、前記片持ち梁の撓み振動を検出し、そして

第 1 象限及び第 3 象限からの信号の和と第 2 象限及び第 4 象限からの信号の和との間の差を使用して、前記片持ち梁のねじれ振動調波を検出する、
ことを含む請求項 2 1 に記載の方法。

10

20

30

40

50

【請求項 2 3】

前記片持ち梁の高周波振動調波の振幅又は位相の変化を検出する前記ステップは、前記片持ち梁の高周波撓み振動調波の振幅又は位相の変化を検出することを含む、請求項 2 0 に記載の方法。

【請求項 2 4】

片持ち梁アーム及びプローブ尖端を有する片持ち梁を用意する前記ステップは、

片持ち梁アーム、及び該片持ち梁アームの自由端に形成されたプローブ尖端を有する片持ち梁を用意することを含み、前記片持ち梁アームは、第 1 形状、及び該第 1 形状に関連したねじれ軸を有し、前記プローブ尖端は、ねじれ軸からオフセット変位して配置され、更に、前記第 1 形状は、前記片持ち梁のねじれ共振周波数又は基本的モードの基本的撓み共振周波数を、そのねじれ共振周波数及び基本的撓み共振周波数が整数比をもつように、同調するよう選択される、請求項 2 0 に記載の方法。

10

【請求項 2 5】

前記片持ち梁が前記サンプルの表面上の特徴部に応答してそらされるときに、ねじれ共振周波数における振幅又は位相の変化を検出するステップを更に備えた、請求項 2 4 に記載の方法。

【請求項 2 6】

片持ち梁の尖端とサンプルとの間の相互作用の高周波の力を測定する方法において、

片持ち梁アーム、及び該片持ち梁アームの自由端に形成されたプローブ尖端を有する片持ち梁を用意するステップであって、前記片持ち梁アームは、第 1 形状、及び該第 1 形状に関連したねじれ軸を有し、そして前記プローブ尖端は、ねじれ軸からオフセット変位して配置されるようなステップと、

20

基本的撓み共振周波数又はその付近において所定の発振振幅で前記片持ち梁を振動させるステップと、

前記サンプル付近へ前記片持ち梁を持って行くステップと、

前記プローブ尖端を使用して前記サンプルの表面を繰り返しタップするステップと、

前記サンプル表面上の特徴部に応答して前記片持ち梁がそらされるときに前記片持ち梁運動のねじれ振動調波を測定するステップと、

前記測定されたねじれ振動調波を使用して尖端 - サンプルの力の時間分解波形を再構成するステップと、

30

を備えた方法。

【請求項 2 7】

前記測定されたねじれ振動調波を使用して尖端 - サンプルの力の時間分解波形を再構成する前記ステップは、尖端 - サンプルの力の時間分解波形を再構成するために重み付けされた和を使用して時間ドメイン内で前記測定されたねじれ振動調波を加算することを含む、請求項 2 6 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0 0 0 1】**

本発明は、片持ち梁、及び片持ち梁を使用した像形成方法に係り、より詳細には、高周波力成分を検出するための片持ち梁、及びこれを使用した像形成方法に係る。

40

【背景技術】**【0 0 0 2】**

走査プローブ顕微鏡 (S P M) とは、通常非常に寸法の小さいプローブでサンプル表面を走査して、サンプル表面のトポグラフ特徴又は材料特性の顕微鏡分析を行なう種類の計器及び像形成方法を指す。尖端をもつ柔軟な片持ち梁を使用してサンプル表面を走査する走査型力顕微鏡 (S F M) とも称される原子間力顕微鏡 (A F M) は、一種の S P M である。

【0 0 0 3】

原子間力顕微鏡 (A F M) は、表面のトポグラフィーをナノスケールでマッピングする

50

ための極めて有用なツールであることが分かっている。AFMにおいては、原子的に先鋭な尖端をもつ柔軟な片持ち梁をサンプル表面付近に持って行き、そして片持ち梁で表面を走査しながら、その尖端とサンプルとの間の吸引力及び反発力の結果として生じる片持ち梁のそりを監視する。片持ち梁は、その尖端がサンプル表面に常時接触する接触動作モードにことができる。尖端とサンプルとの間の連続的接触が使用されるときには、尖端とサンプルとの間の摩擦力が尖端及びサンプルの両方にしばしばダメージを生じさせる。連続的な尖端 - サンプル接触を必要としない動的な像形成技術も導入されている。この動的な像形成モードでは、尖端がサンプル表面から短い距離に維持され、サンプル表面と間欠的に接触させられる。種々の動的像形成技術の中で、タップモードの原子間力顕微鏡(TM-AFM)が最も広く使用されるようになった。このTM-AFMでは、尖端が、サンプル表面付近においてその共振周波数の1つで振動される。動的な原子間力顕微鏡(TM-AFMのような)は、尖端及びサンプルのダメージをほぼ排除し、それ故、原子間力顕微鏡像形成に広く使用されている。

10

20

30

【0004】

原子間力顕微鏡では、尖端とサンプル表面との間の力の相互作用が、尖端及びサンプルの材料特性により左右される。尖端 - サンプルの力を測定することで、材料特性や、サンプル表面にわたる化学的組成の変化のマッピングを調査することができる。片持ち梁がサンプル付近で振動するときには、尖端 - サンプルの力が高調波成分を有することになり、片持ち梁に高周波の振動を発生する。これらの高周波の力成分は、尖端 - サンプルの相互作用に関する情報を保持する。これら高調波での像形成が実証されており、その結果が、材料特性に基づく良好なコントラストを示している。不都合なことに、高調波における慣習的なAFM片持ち梁の振動振幅は、実際的なAFM像形成には小さ過ぎる。より詳細には、高調波の信号は、片持ち梁の駆動周波数の信号より20 - 30dBも低い。従って、高調波信号を使用した像形成の解像度は、甚だしく制限される。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

それ故、サンプル表面付近で片持ち梁を振動させた結果として高周波の尖端 - サンプルの力成分の非破壊測定を可能にする装置又は像形成方法を提供することが要望される。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一実施形態によれば、原子間力顕微鏡に使用するための片持ち梁は、ベース部材に取り付けられた固定端、及び自由端を有する片持ち梁アームであって、第1形状及び該第1形状に関連したねじれ軸を有するような片持ち梁アームと、前記自由端付近で前記片持ち梁アームから突出するプローブ尖端であって、前記ねじれ軸からオフセット変位で配置されているプローブ尖端とを備えている。一実施形態において、プローブ尖端は、ねじれ軸から少なくとも約2μmに位置される。別の実施形態において、プローブ尖端は、ねじれ軸から離れ且つ片持ち梁アームの外縁付近に位置される。

【0007】

一実施形態において、片持ち梁アームは、選択されたねじれモードの共振周波数又は基本的撓み共振周波数を、このねじれ共振周波数及び基本的撓み共振周波数が整数比を有するように、同調させるよう選択された第1形状を有する。このように、ねじれ調波片持ち梁の、その調波周波数におけるねじれ運動は、主として、それに対応するねじれ共振により改善される。

【0008】

本発明の別の態様によれば、片持ち梁の尖端とサンプルとの間の相互作用の高周波の力を測定する方法は、片持ち梁アーム、及び該片持ち梁アームの自由端に形成されたプローブ尖端を有する片持ち梁を用意するステップであって、前記片持ち梁アームは、第1形状、及び該第1形状に関連したねじれ軸を有し、そして前記プローブ尖端は、ねじれ軸からオフセット変位して配置されるようなステップと、基本的撓み共振周波数又はその付近に

40

50

おいて所定の発振振幅で片持ち梁を振動させるステップと、サンプル付近へ片持ち梁を持って行くステップと、プローブ尖端を使用してサンプルの表面を繰り返しタップするステップと、サンプル表面上の特徴部に応答して片持ち梁がそらされるときに片持ち梁の高周波振動調波の振幅又は位相の変化を検出するステップと、を備えている。

【0009】

本発明の更に別の態様によれば、片持ち梁の尖端とサンプルとの間の相互作用の高周波の力を測定する方法は、片持ち梁アーム、及び該片持ち梁アームの自由端に形成されたプローブ尖端を有する片持ち梁を用意するステップであって、前記片持ち梁アームは、第1形状、及び該第1形状に関連したねじれ軸を有し、そして前記プローブ尖端は、ねじれ軸からオフセット変位して配置されるようなステップと、基本的撓み共振周波数又はその付近において所定の発振振幅で片持ち梁を振動させるステップと、サンプル付近へ片持ち梁を持って行くステップと、プローブ尖端を使用してサンプルの表面を繰り返しタップするステップと、サンプル表面上の特徴部に応答して片持ち梁がそらされるときに片持ち梁運動のねじれ振動調波を測定するステップと、前記測定されたねじれ振動調波を使用して尖端 - サンプルの力の時間分解波形を再構成するステップと、を備えている。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

本発明は、添付図面を参照した以下の詳細な説明から良く理解されよう。

本発明の原理によれば、自由端に尖端（チップ）を含む片持ち梁は、この片持ち梁がサンプルの表面付近で振動されたときに尖端 - サンプルの相互作用力の高周波成分に関連した信号を増幅する幾何学的特徴部を組み込むように構成される。片持ち梁が走査プローブ顕微鏡に適用されるときには、片持ち梁は、非直線的な尖端 - サンプル相互作用の高周波力成分に関連した信号の検出及び測定を可能にする広帯域帯及び高感度機械的システムを形成する。一実施形態では、片持ち梁は、片持ち梁アームを含むと共に、この片持ち梁アームの自由端に尖端を含み、これは、片持ち梁アームのねじれ軸からオフセットした場所に配置される。ねじれ軸からオフセットした場所に尖端を配置することで、片持ち梁のねじれ運動が改善される。その結果、尖端 - サンプルの相互作用力の著しい数の高周波力成分に関連した信号を増幅して、テストサンプルの材料特性の新規な像形成モダリティ(modalities or)調査を許すことができる。

20

【0011】

30

本発明の片持ち梁の1つの有益な用途は、片持ち梁を使用してサンプルの材料特性を調査することのできるタップモードAFMである。しかしながら、本発明の片持ち梁は、走査プローブ顕微鏡又はそれ以外の多数の他の用途に適用することもできる。要約すれば、本発明の片持ち梁は、高周波の尖端 - サンプルの相互作用力成分が問題であるときに適用することができる。

【0012】

30

図1は、タップモードの原子間力顕微鏡の一般化された概略図である。図1のTM-AFMでは、片持ち梁は、サンプル表面付近において、その撓み共振の1つに近い周波数、通常は、基本的共振周波数で振動され、従って、先端が、各発振周期に一度、表面に間欠的に接触する（タップする）。表面にわたる走査中に、片持ち梁ベースの高さを調整するフィードバックループを通して振動の振幅が一定値に維持される。より詳細には、光ビーム及び光検出器を使用して、駆動周波数において片持ち梁の運動を測定する。それ故、フィードバック信号は、表面のトポグラフィーを反映する。図1では、フィードバックループは、光学的レバー検出システム及びフィードバックコントローラを備えている。

40

【0013】

50

本発明の片持ち梁は、サンプルと片持ち梁の尖端との間の相互作用の高周波力成分の増幅を実現する幾何学的特徴部を組み込んでいる。この幾何学的特徴部は、信号増幅を達成するように種々の形態で実施することができる。本発明の一実施形態によれば、片持ち梁は、その自由端に尖端を有し、これは、片持ち梁アームのねじれ軸からオフセットした場所に配置される。このオフセットした尖端の配置は、片持ち梁のねじれ運動を向上させる

。より詳細には、オフセットした尖端がサンプル表面に当たると、相互作用力が片持ち梁のねじれモードを励起する。この説明においては、ねじれ運動を向上させるようにオフセットして尖端を配置した片持ち梁は、「ねじれ片持ち梁」と称される。しかしながら、本発明の「ねじれ片持ち梁」は、所与の周波数で駆動されたときに、撓みモード、ねじれモード又は他の振動モードで振動することに注目するのが重要である。「ねじれ」という語の使用は、本発明の片持ち梁の振動モードをねじれ運動のみに限定するものではない。

【0014】

更に、この説明において、「ねじれ軸」という語は、片持ち梁を振動するときに片持ち梁がねじれ振動により変位されない片持ち梁の軸を指す。即ち、片持ち梁は、ねじれモードで動かない。長方形の片持ち梁のような対称的な片持ち梁については、ねじれ軸は、片持ち梁のベースに垂直な片持ち梁アームの中心線である。しかしながら、他の幾何学的形状の片持ち梁については、ねじれ軸は、必ずしも、片持ち梁アームの中心線ではなく、更に、必ずしも、直線ではない。所与の幾何学形状の片持ち梁に対するねじれ軸は、例えば、シミュレーションソフトウェアの使用により決定することができる。従来の片持ち梁では、プローブ尖端が、常に、片持ち梁アームのねじれ軸に配置された。

10

【0015】

図2Aは、本発明の一実施形態による片持ち梁の斜視図である。図2Bは、図2Aの片持ち梁の上面図である。図2A及び2Bを参照すれば、ねじれ片持ち梁100は、長方形片持ち梁であり、ベースから突出する片持ち梁アーム102を備えている。片持ち梁アーム102の自由端付近にプローブ尖端106が配置される。ねじれ片持ち梁100の場合、ねじれ軸は、片持ち梁アーム102の中心線であり、図2A及び2Bにおいて破線104で示されている。プローブ尖端106は、ねじれ軸（線104）に対してオフセットした位置にある。より詳細には、ここに示す実施形態では、プローブ尖端106は、ねじれ軸から距離“d”に配置される。プローブ尖端106をねじれ軸から離して配置することで、プローブ尖端は、片持ち梁がねじれモードで振動されるときに変位される。従って、片持ち梁のねじれ運動が向上され、尖端-サンプルの相互作用力の高周波調波の増幅を生じさせる。

20

【0016】

オフセット変位の量即ち距離“d”は、最小変位（ねじれ軸付近）から最大変位（片持ち梁アームの縁付近）まで変化し得る。オフセットの厳密な量は、設計選択肢に基づいて選択される。ほとんどの場合に、プローブ尖端がねじれ軸から変位されるよう確保するために、通常のプロセス変動又は整列エラーより大きな最小変位を使用しなければならない。例えば、一実施形態では、プローブ尖端がねじれ軸から少なくとも約2μmでなければならない。一般に、プローブ尖端がねじれ軸から遠く離れて変位されるほど、プローブ尖端が経験するねじれ運動が大きくなることが理解されよう。従って、プローブ尖端は、最小ねじれ運動のためにはねじれ軸付近に配置することができ、そして最大ねじれ運動を得るために片持ち梁アームの縁付近に配置することができる。

30

【0017】

図3は、片持ち梁100のねじれモードのモード形状を示す。図3から明らかにのように、ねじれ軸（この場合は中心線）から離れた片持ち梁上の位置は、より大きな変位を示す。尖端オフセット距離がより大きい場合には、尖端-サンプルの力が、より大きなトルクを形成し、ひいては、より大きなねじれ角、及びより良好なねじれモード励起を生じさせる。これは、信号の改善については効果的であるが、全片持ち梁力学に対するねじれモードの影響がより顕著になる。

40

【0018】

本発明の片持ち梁100が、図1のタップモードAFMのような走査型力顕微鏡に適用されるときには、同じそり測定技術を使用して、片持ち梁の撓み運動及びねじれ運動を検出することができる。図4は、分割型光検出器と、この光検出器を使用して撓み及びねじれ運動を検出するためのそり測定技術とを示す。SFMに使用される分割型光検出器は、通常、4つの象限Q1-Q4に分割される。レーザ光ビームが片持ち梁アームから反射す

50

ることで生じる光スポットが、光検出器の象限の中心の周りの円形スポットとして示されている。片持ち梁の尖端の動きは、各象限で検出された光信号の加算及び減算により検出される。図4の例示において、片持ち梁尖端の撓み運動が光スポットの上下運動を生じ、そしてねじれ運動が光スポットの左右運動を生じると仮定する。片持ち梁尖端の撓み状のそりを測定するために、象限Q1及びQ2の信号が加算されると共に、象限Q3及びQ4の信号が加算される。次いで、2つの加算信号の差を使用して、撓み運動を指示する。片持ち梁のねじれ状のそりを測定するために、象限Q1及びQ3の信号が加算されると共に、象限Q2及びQ4の信号が加算される。次いで、2つの加算信号の差を使用して、ねじれ運動を指示する。ホトダイオードと片持ち梁が不整列である場合には、撓み信号とねじれ信号との間のクロストークを考慮しなければならない。

10

【0019】

走査型力顕微鏡に適用したときの本発明のねじれ片持ち梁の1つの効果は、像形成速度の増加にある。ねじれ状のそりを走査型力顕微鏡のフィードバックループに使用するときには、より高い周波数のねじれ調波が像形成信号に対して高速の応答時間を与える。更に、高周波のねじれ調波信号は、好都合にも、尖端-サンプルの係合及び解離の迅速な検出を可能にするように適用できる。

【0020】

従来の片持ち梁では、ねじれ振動又はねじれモードは、基本的撓みモードより高い共振周波数を有する。しかしながら、従来の片持ち梁では、片持ち梁のねじれモードが励起されない。本発明によれば、ねじれ片持ち梁を使用して、ねじれモードを励起し、高周波の力成分の検出を可能にすることができます。本発明のねじれ片持ち梁を動的なAFMオペレーションに適用したときには、ねじれ片持ち梁が撓みモードで発振する一方、尖端-サンプルの相互作用力が片持ち梁のねじれモードを励起する。ねじれモードが励起されるのは、ねじれ片持ち梁の尖端がねじれ軸からオフセットして配置されているからである。プローブ尖端のオフセット配置は、尖端-サンプルの力で片持ち梁にねじれを発生させるのを許す。ねじれアーム(片持ち梁アームの巾)が片持ち梁の長さより短いので、ねじれモードにおける小さな尖端変位が、比較的大きな角度的そりを生じさせる。それ故、片持ち梁の背部から反射されるレーザビームは、片持ち梁のねじれ運動を容易に検出できる。片持ち梁のねじれモードは、高い帯域巾を有するので、尖端-サンプルの力の高周波調波がねじれ振動を効率的に発生する。

20

【0021】

本発明のねじれ片持ち梁は、希望の用途に基づいて多数の形状及び幾何学形状で構成することができる。本発明のねじれ片持ち梁の顕著な特徴は、プローブ尖端をねじれ軸からオフセット配置したことにある。プローブ尖端は、ねじれ軸のいずれかの側に変位することができる。図5は、本発明の第1の別の実施形態による片持ち梁の上面図である。図5を参照すれば、ねじれ片持ち梁120は、拡大自由端をもつ長方形の片持ち梁として構成される。プローブ尖端126は、片持ち梁アームのねじれ軸124からオフセット変位して配置される。一実施例では、片持ち梁120は、基本的撓み共振周波数の16.3倍である第1のねじれ共振周波数を実現することができる。片持ち梁120の広い自由端は、以下に詳細に述べるように、片持ち梁のねじれ共振周波数を同調する作用を有する。

30

【0022】

図6及び7は、基本的撓み共振周波数でサンプル表面をタップする片持ち梁120の、各々、撓み振動及びねじれ振動のスペクトルである。撓みモードの振動スペクトル(図6)及びねじれモードの振動スペクトル(図7)の比較から、良好な信号対雑音比をもつねじれモードでは、より高い調波の力成分が励起されることを観察できる。従って、尖端-サンプル相互作用に関するより多くの情報をねじれ振動スペクトルから検索できる。

40

【0023】

図8-10は、本発明のねじれ片持ち梁の3つの別の実施形態を示す。当業者であれば、この説明を読んだときに、種々の片持ち梁構成及び幾何学形状を使用して本発明のねじれ片持ち梁を実施できることが明らかであろう。図8を参照すれば、ねじれ片持ち梁14

50

0は、テーパー付けされた自由端をもつ長方形片持ち梁として形成される。プローブ尖端146は、ねじれ軸（線144）からオフセットして配置される。図9を参照すれば、ねじれ片持ち梁160は、2本のアーム162A及び162Bが開口168により分離された長方形の片持ち梁として構成される。片持ち梁160の自由端もテーパー付けされている。プローブ尖端166は、ねじれ軸（線164）からオフセットした場所に配置される。更に、図10を参照すれば、ねじれ片持ち梁180は、アーム182A及び182Bを含む三角形片持ち梁として形成される。プローブ尖端186は、ねじれ軸（線184）からオフセットした場所に配置される。

【0024】

本発明のねじれ片持ち梁は、像形成及び材料分析に多数の用途を有する。1つの用途では、サンプル表面の映像を発生するために、ねじれ片持ち梁のねじれ調波（位相及び振幅の両方）が測定される。別の用途では、ねじれ片持ち梁は、多数の振動調波を発生するように適用される。調波の力成分のほとんど又は全部が測定されるときには、調波の力成分を時間ドメインにおいて加算して、尖端-サンプルの力の時間分解波形を再構成することができる。調波の力成分全部を一緒に加算するときには、尖端-サンプル相互作用の力図が構成されることが理解されよう。より詳細には、時間ドメインにおける調波力成分の重み付けされた和を使用して、尖端-サンプルの力の時間分解波形を再構成する。調波の力成分の重み付けされた和は、各調波の振幅に加算前に係数を乗算することにより計算され、この係数は、片持ち梁の周波数応答である。重み付けされた和を使用するのは、2つの異なる周波数における同じ力振幅が異なる振動振幅を生じさせるからである。振動振幅の差は、重み付けされた和の使用により考慮される。本発明のねじれ片持ち梁は、振幅を改善したねじれ調波の発生を可能にし、調波の測定を容易に行えるようにする。従って、本発明のねじれ片持ち梁は、尖端-サンプル相互作用の力/距離関係の測定を可能にする。

【0025】

本発明の別の態様によれば、ねじれ片持ち梁は、片持ち梁が駆動周波数で駆動されたときに片持ち梁の基本的撓み共振周波数の整数倍に一致するねじれ共振周波数を有する。このようなねじれ片持ち梁は、ここでは「ねじれ調波片持ち梁」と称されるが、片持ち梁のねじれ共振に一致するその調波の1つを有する。このように、調波周波数におけるねじれ調波片持ち梁のねじれ運動は、主として、それに対応するねじれ共振により改善される。ねじれ調波片持ち梁のねじれ共振周波数と基本的撓み共振周波数との比は、片持ち梁の適当な幾何学形状を選択することにより同調させることができる。というのは、片持ち梁の幾何学形状が片持ち梁の共振周波数を決定するからである。本発明のねじれ調波片持ち梁は、より高次の調波を像形成信号として使用することにより像形成に改善を与えることができる。同調された共振周波数は、高い信号対雑音比を有するが、片持ち梁振動の他の全ての調波も、ねじれ運動であるために、良好な信号対雑音比を有する。

【0026】

図11は、本発明の一実施形態によるねじれ調波片持ち梁の上面図である。図11を参照すれば、ねじれ調波片持ち梁200は、第1アーム部分202A及び第2アーム部分202Bにより形成された片持ち梁アームを備えている。第1及び第2アーム部分は、開口208により分離されている。プローブ尖端206は、片持ち梁アームの自由端に配置され、片持ち梁のねじれ軸からオフセット変位して配置される。片持ち梁200は、非対称的形状の自由端を含み、自由端の片側にテーパーが付けられている。2つの分離されたアーム部分を片持ち梁200に組み込むことにより、各アーム部分を容易に曲げて、ねじれ共振周波数を下げることができる。ねじれ共振周波数と基本的な撓み共振周波数の比をある整数に同調させるためにアームについて適切な寸法を選択しなければならない。

【0027】

オフセットした尖端配置を使用することで、ねじれ調波片持ち梁200は、尖端-サンプル相互作用の高周波力成分の検出を可能にするようにねじれ運動を改善することができる。一実施例において、片持ち梁200は、基本的撓み共振周波数の9倍である第1のねじれ共振周波数を実現することができる。

10

20

30

40

50

【0028】

片持ち梁200において、片持ち梁の基本的撓み共振周波数の整数倍に一致させるためのねじれ共振周波数の同調は、アーム部分202A及び202Bの巾を変化させるか又は開口208のサイズを変化させることにより実行できる。又、共振周波数に同調するように自由端の形状を構成することもできる。図12は、片持ち梁が基本的共振周波数で表面にタップされる間に生じるねじれ調波片持ち梁200のねじれ振動スペクトルである。図12を参照すれば、この振動スペクトルにおける第1のピークは、基本的共振周波数であり、そして400KHzにおけるピークは、ねじれ共振周波数である。400KHzにおけるねじれ共振周波数は、基本的共振周波数の第9調波であり、信号対雑音比は、40dBより高い。図12の振動スペクトルは、基本的撓み共振周波数の9倍であるねじれ共振周波数を有するために、ねじれ調波片持ち梁200をいかに同調できるか示している。

10

【0029】

図13は、図11のねじれ調波片持ち梁のねじれ振動のモード形状を示している。このモード形状は、片持ち梁アームの縁付近にプローブ尖端を配置することで、尖端がねじれモードにおいて大きな変位を経験し、改善されたねじれ信号を与えることを確認するものである。

【0030】

図5のねじれ片持ち梁120は、ねじれ調波片持ち梁に対する別の構成を表わす。図5のねじれ片持ち梁は、ねじれ共振周波数と基本的共振周波数との比を同調させるために基本的共振周波数をいかに変更できるか示している。図5に戻ると、片持ち梁120の自由端は、片持ち梁アームの他部分より広く作られる。自由端は、基本的共振周波数の高度に変位される部分であるから、自由端をより広く作ることにより、基本的共振周波数に対して質量が追加され、これは、基本的共振周波数を下げるという作用を有する。質量の追加は、ねじれ共振周波数を著しく変化しないが、基本的周波数が下げられ、2つの比が同調される。

20

【0031】

以上の説明において、「ねじれ調波片持ち梁」という語の使用は、本発明の片持ち梁の振動モードをねじれ運動のみに限定するものではない。上述したように、本発明の「ねじれ調波片持ち梁」は、所与の周波数で駆動されたときに、撓みモード、ねじれモード、又は他の振動モードで振動し得る。

30

【0032】

更に、本発明のねじれ調波片持ち梁において、ねじれ共振周波数と、基本的撓み共振周波数は、整数比を有するか、或いは整数比より若干低いか又は若干高い比、例えば、整数比の2%以内の比を有する。従って、整数比は、全数と、最も近い全数より若干大きいか又は小さい端数とを含み、従って、片持ち梁が、基本的共振周波数又はそれより若干低いか若干高い駆動周波数において駆動されたときに、ねじれ共振周波数がその駆動周波数の整数倍となる。

【0033】

ねじれ調波片持ち梁のねじれ共振周波数と基本的撓み共振周波数の比を整数値又はほぼ整数値に同調することは、主として、2つの方法で行うことができる。第1に、この同調は、基本的撓み共振周波数を、選択されたねじれ共振周波数の共振周波数で割り切れる整数に同調することにより、達成できる。第2に、この同調は、選択されたねじれモードの共振周波数を、基本的撓み共振周波数の整数倍に同調することにより、達成できる。或いは又、両方の同調方法を同時に適用して、選択されたねじれ共振周波数の比を、基本的撓み共振周波数の整数倍に同調することもできる。

40

【0034】

ねじれ調波片持ち梁の基本的周波数を、選択されたねじれ共振周波数の共振周波数で割り切れる整数に同調することは、ねじれモードの共振周波数に比して基本的撓み共振周波数を変化させることに主として作用を及ぼす幾何学的特徴部を片持ち梁に組み込むことにより、達成できる。例えば、片持ち梁の自由端に質量を追加し又は除去することにより片

50

持ち梁の長さを増加又は減少することは、周波数比を対応的に増加又は減少させる。

【0035】

或いは又、片持ち梁が、長方形又はそれに近い形状で、テーパー付けされた端をもつたりもたなかつたりするときに、片持ち梁アームの長さと巾の比を調整して、基本的撓み共振周波数を変更することができる。長さと巾の比が大きいほど、ねじれ周波数と基本的周波数の比が大きくなる。長さと巾の正しい値を選択することで、周波数比を整数値又はほぼ整数値に同調する。

【0036】

又、基本的モードの高変位領域において有効巾又は厚みを増加又は減少することにより - これは、基本的共振周波数を減少又は増加させる作用を有する - 基本的共振周波数を同調させることもできる。通常、この質量変更は、片持ち梁の自由端に向かって適用される。基本的共振周波数を減少又は増加することにより、ねじれ周波数と基本的周波数との比が対応的に増加又は減少する。

【0037】

最終的に、高い機械的ストレス領域において有効巾又は厚みを増加又は減少することにより - これは、共振周波数比を減少又は増加する作用を有する - 周波数比を同調することもできる。通常、この質量変更は、片持ち梁のベースに向かって適用される。

【0038】

選択されたねじれモードの共振周波数を、基本的撓み共振周波数の整数倍に同調することは、基本的撓み共振周波数に比してねじれモードの共振周波数を変化させるように主として作用する幾何学的特徴部を片持ち梁に組み込むことにより達成できる。片持ち梁には、多数のねじれ振動モードがある。一般に、関心があるのは、最初の幾つか（2 - 3個）のモードである。

【0039】

第1に、ねじれモードの共振周波数は、開口をもたない片持ち梁の有効巾を維持しながら、片持ち梁の本体に開口をもつアーム部分を形成することにより、同調することができる。このようなねじれ調波片持ち梁の一実施例が図11に示されている。図11を参照すれば、アーム部分及び開口は、片持ち梁の本体に沿った開口（1つ又は複数）の位置、アームの分離度（a）、及び開口の延長度（b）を特徴とすることができる。開口の位置及び延長度、並びにアームの分離度を調整し、例えば、シミュレーションツールを使用して、分離及び延長長さの最適値を見出すことにより、適切な同調を達成することができる。一般に、片持ち梁の本体に開口を伴うアーム部分を設けることで、共振周波数の比が下げる。比が下げる程度は、開口の延長度に比例する。

【0040】

或いは又、アームの分離度（a）を増加すると、アームがその特定のねじれモードにおいて高角度変位領域に配置されている場合には、周波数比を下げる事になる。又、個々のアームの巾を増加して、主として、片持ち梁の有効巾の増加を導くことにより、ねじれモードの共振周波数を同調することもできる。

【0041】

図11において、ねじれ調波片持ち梁は、平行な2つのアーム部分を有する。この幾何学構成は、単なる例示に過ぎず、これに限定されるものではない。本発明のねじれ調波片持ち梁には、多数のアーム部分を設けることができる。更に、アーム部分は、平行である必要がなく、即ち、アーム部分は、逆平行でもよい。例えば、図10は、2つのアーム部分を含むV字型のねじれ調波片持ち梁を示している。

【0042】

以上に述べた詳細な説明は、本発明の特定の実施形態を例示するもので、本発明をこれに限定するものではない。本発明の範囲内で多数の変更や修正が考えられるであろう。従って、本発明は、特許請求の範囲により限定される。

【図面の簡単な説明】

【0043】

10

20

30

40

50

【図1】タップモードの原子間力顕微鏡の一般化された概略図である。

【図2A】本発明の一実施形態による片持ち梁の斜視図である。

【図2B】図2Aの片持ち梁の上面図である。

【図3】図2A及び2Bの片持ち梁のねじれモードのモード形状を示す図である。

【図4】分割型光検出器と、撓み及びねじれ運動を検出するためにこの光検出器を使用する測定技術とを示す図である。

【図5】本発明の第1の別の実施形態による片持ち梁の上面図である。

【図6】図5の片持ち梁がサンプル表面において基本的共振周波数でタップされる間に生じる片持ち梁の撓み振動スペクトルである。

【図7】図5の片持ち梁がサンプル表面において基本的共振周波数でタップされる間に生じる片持ち梁のねじれ振動スペクトルである。

【図8】本発明の第2の別の実施形態による片持ち梁の上面図である。

【図9】本発明の第3の別の実施形態による片持ち梁の上面図である。

【図10】本発明の第4の別の実施形態による片持ち梁の上面図である。

【図11】本発明の一実施形態によるねじれ調波片持ち梁の上面図である。

【図12】図11のねじれ調波片持ち梁が表面において基本的共振周波数でタップされる間に生じる片持ち梁のねじれ振動スペクトルである。

【図13】図11のねじれ調波片持ち梁のねじれ振動のモード形状を示す図である。

10

【図1】

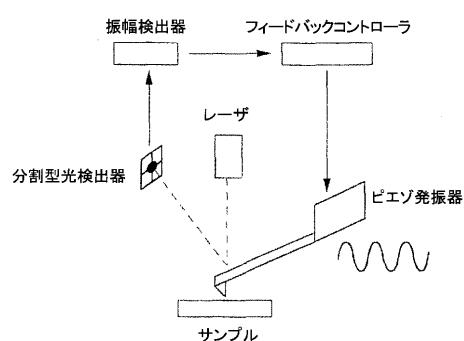


Figure 1

【図2A】

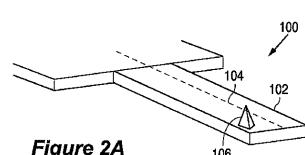


Figure 2A

【図2B】

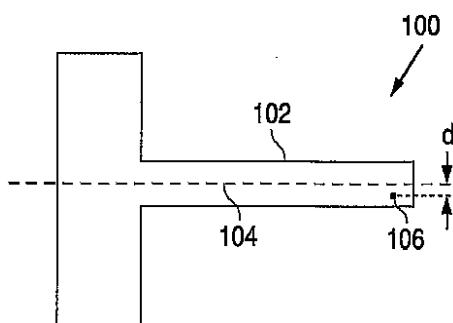


Figure 2B

【図3】

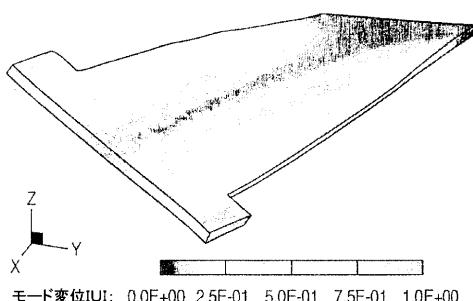


Figure 3

【図4】

片持ち梁のそり

ねじれ運動

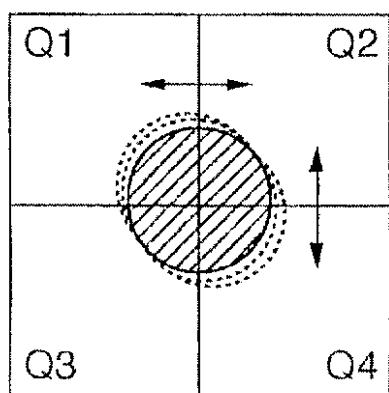


Figure 4

【図5】

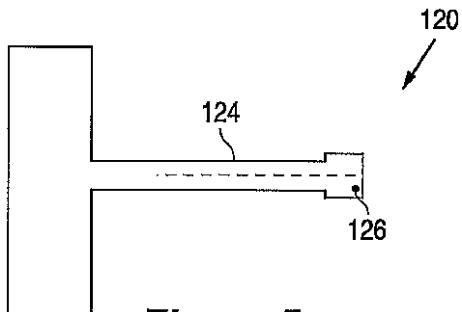


Figure 5

【図6】

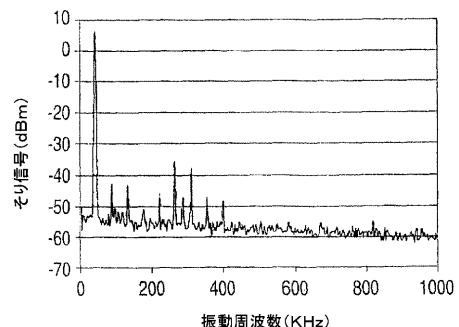


Figure 6

【図7】

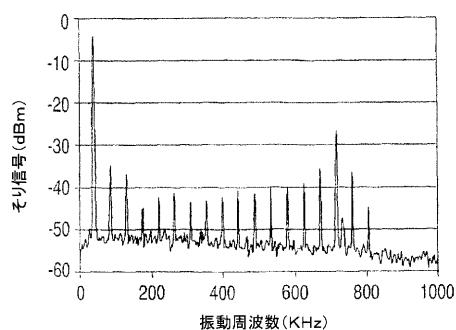


Figure 7

【図9】

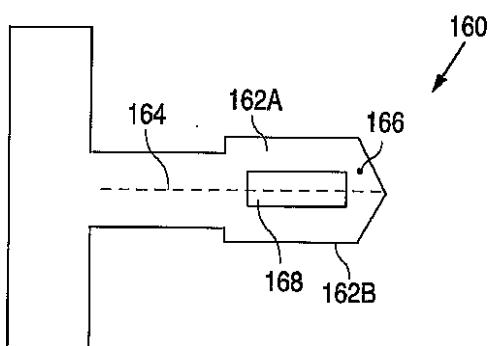


Figure 9

【図8】

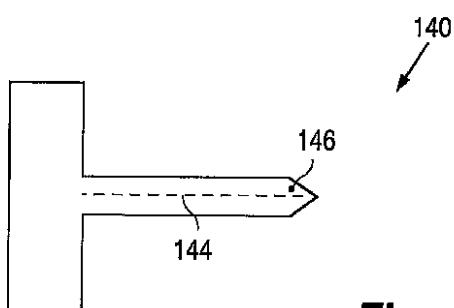
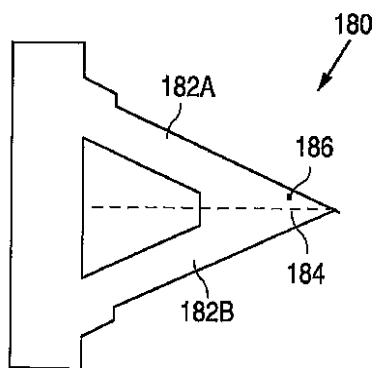
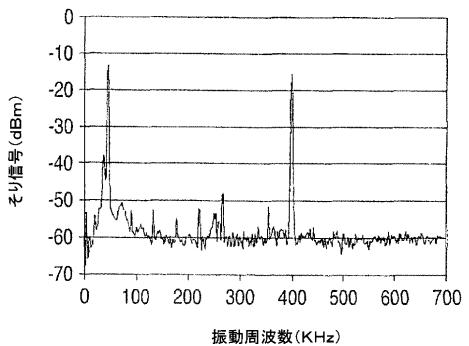


Figure 8

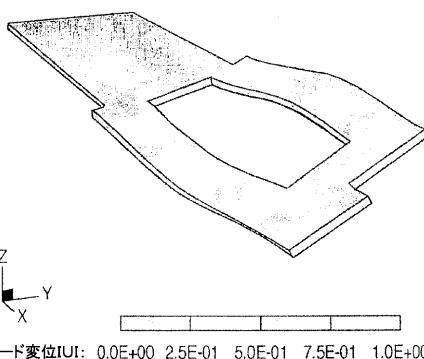
【図 10】

**Figure 10**

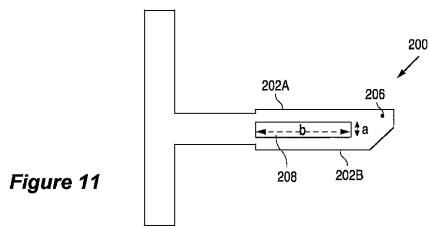
【図 12】

**Figure 12**

【図 13】

**Figure 13**

【図 11】

**Figure 11**

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		Int'l Application No PCT/US2005/024098
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 G12B21/02 G12B21/08		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G12B G01B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, BIOSIS, EMBASE		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category ^a	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 00/46569 A (XIDEX CORPORATION) 10 August 2000 (2000-08-10) figures 5-8,11-19,22,23 page 8, line 27 - page 9, line 17 page 12, line 23 - page 15, line 16 page 17, line 27 - page 18, line 23	1-27
A	US 5 646 339 A (BAYER ET AL) 8 July 1997 (1997-07-08) figures 1-5 column 3, line 43 - column 6, line 24	1-27
A	WO 2004/005845 A (VEECO INSTRUMENTS, INC) 15 January 2004 (2004-01-15) figures 12-15 page 23, line 23 - page 25, line 17	1-27
		-/-
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C.		<input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.
° Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the International filing date but later than the priority date claimed		
"T" later document published after the International filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed Invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed Invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the International search 13 October 2005	Date of mailing of the International search report 26/10/2005	
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 051 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Polesello, P	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/US2005/024098

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 079 255 A (BINNIG ET AL) 27 June 2000 (2000-06-27) figures 1-7 column 7, line 9 - column 9, line 54	1-27

INTERNATIONAL SEARCH REPORT				International Application No PCT/US2005/024098	
Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date	
WO 0046569	A 10-08-2000	AU	2870700 A	25-08-2000	
US 5646339	A 08-07-1997	NONE			
WO 2004005845	A 15-01-2004	AU US US	2003281338 A1 6945099 B1 2005028583 A1	23-01-2004 20-09-2005 10-02-2005	
US 6079255	A 27-06-2000	DE DE EP WO JP	69618627 D1 69618627 T2 0886758 A1 9734122 A1 11512830 T	21-02-2002 12-09-2002 30-12-1998 18-09-1997 02-11-1999	

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW,GH,GM,KE,LS,MW,MZ,NA,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,NL,PL,PT,RO,SE,SI,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KM,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,L,S,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PG,PH,PL,PT,RO,RU,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,SY,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(74)代理人 100086771

弁理士 西島 孝喜

(74)代理人 100109070

弁理士 須田 洋之

(72)発明者 クオート カルヴィン エフ

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94025 メンロ パーク プリンストン ロード 34
0

(72)発明者 サヒン オズグル

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94305 スタンフォード エスコンディード ロード
750 ビルディング 138 - ビー

(72)発明者 ソルガールド オラフ

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94305 スタンフォード パイン ヒル ロード 84
9