

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02010/150756

発行日 平成24年12月10日 (2012.12.10)

(43) 国際公開日 平成22年12月29日 (2010.12.29)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 Q 10/02 (2010.01)	GO 1 Q 10/02 1 1 1	
GO 1 Q 60/32 (2010.01)	GO 1 Q 60/32	
GO 1 Q 60/18 (2010.01)	GO 1 Q 60/18	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 35 頁)

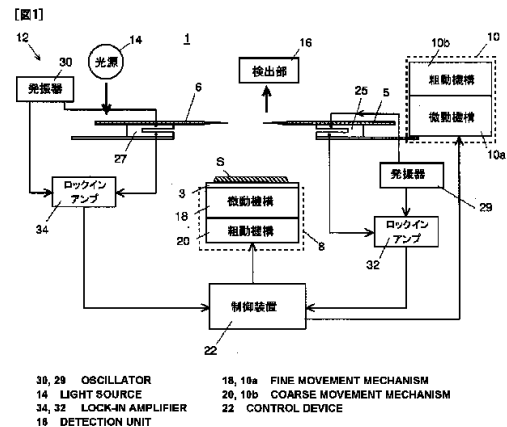
出願番号 特願2011-519892 (P2011-519892)	(71) 出願人 504132272 国立大学法人京都大学 京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(21) 国際出願番号 PCT/JP2010/060494	
(22) 国際出願日 平成22年6月21日 (2010.6.21)	
(31) 優先権主張番号 特願2009-149205 (P2009-149205)	(74) 代理人 110001069 特許業務法人京都国際特許事務所
(32) 優先日 平成21年6月23日 (2009.6.23)	
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(72) 発明者 西村 活人 京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学 法人京都大学大学院工学研究科内
(31) 優先権主張番号 特願2010-25975 (P2010-25975)	(72) 発明者 川上 養一 京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学 法人京都大学大学院工学研究科内
(32) 優先日 平成22年2月8日 (2010.2.8)	
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(72) 発明者 船戸 充 京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学 法人京都大学大学院工学研究科内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 走査型プローブ顕微鏡及びそのプローブ近接検出方法

(57) 【要約】

本発明の走査型プローブ顕微鏡は、試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第1及び第2プローブと、これら第1及び第2プローブをそれぞれ保持する水晶振動子と、各水晶振動子の共振周波数とは異なる特定周波数の振動を前記第1プローブ5に付与する変調用発振器とを備える。制御装置は、前記第1及び第2プローブの特定周波数の振動を監視し、この特定周波数の振動の変化から前記第1プローブと前記第2プローブが互いに近接したことを検出し、第1及び第2プローブの駆動を制御する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡において、

- a) 試料に対して相対的に前記第 1 プローブを走査する第 1 走査手段と、
 - b) 試料に対して相対的に前記第 2 プローブを走査する第 2 走査手段と、
 - c) 前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与する振動付与手段と、
 - d) 前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの前記特定周波数の振動を監視する振動監視手段と、
 - e) 前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの少なくとも一方の振動が変化したことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出するプローブ近接検出手段と、
 - f) 前記プローブ近接検出手段の検出結果に基づき第 1 及び第 2 走査手段を制御する制御手段と
- を有することを特徴とする走査型プローブ顕微鏡。

10

【請求項 2】

前記振動付与手段は、前記第 1 プローブに振動を付与するように構成され、前記プローブ近接検出手段が、前記第 1 プローブの振動の変化率が閾値以下になったことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 1 に記載の走査型プローブ顕微鏡。

20

【請求項 3】

前記振動付与手段は、前記第 1 プローブに振動を付与するように構成され、前記プローブ近接検出手段が、前記第 2 プローブの振動の変化率が閾値を上回ったことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 4】

前記第 1 及び第 2 プローブは第 1 及び第 2 の音叉型振動子に取り付けられ、前記走査手段は、前記音叉型振動子を共振させて前記第 1 及び第 2 プローブを走査するように構成され、

30

前記第 1 及び第 2 の音叉型振動子を共振させて前記第 1 プローブ及び第 2 プローブの先端をそれぞれ試料表面に接近させたときに各音叉型振動子に誘起される電圧信号を検出する電圧検出手段と、

前記電圧検出手段の検出結果に基づき、各プローブ先端と前記試料表面との距離を一定に保持するプローブ・試料間距離制御手段とを備えることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 5】

試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡において、

- a) 前記第 1 プローブが取り付けられた第 1 音叉型振動子と、
- b) 前記第 2 プローブが取り付けられた第 2 音叉型振動子と、
- c) 前記第 1 音叉型振動子と前記第 2 音叉型振動子をそれぞれ共振させて、前記第 1 及び前記第 2 プローブのそれぞれを前記試料に対して相対的に走査する走査手段と、
- d) 前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与する振動付与手段と、
- e) 前記第 1 及び第 2 音叉型振動子を共振させて前記第 1 及び第 2 プローブを互いに接近させたときに各音叉型振動子に誘起される前記特定周波数の電圧信号を検出する信号検出手段と、
- f) 前記第 1 音叉型振動子及び第 2 音叉型振動子にそれぞれ誘起される前記特定周波数の電圧信号に基づき第 1 及び第 2 プローブが互いに近接したことを検出するプローブ近接検

40

50

出手段と

を有することを特徴とする走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 6】

前記プローブ近接検出手段が、前記第 1 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号と前記第 2 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号の積に基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 5 に記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 7】

前記プローブ近接検出手段が、前記第 1 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号と前記第 2 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号の和に基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 5 に記載の走査型プローブ顕微鏡。

10

【請求項 8】

前記特定周波数は、前記音叉型振動子の共振周波数と異なる周波数であることを特徴とする請求項 4～7 のいずれかに記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 9】

試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法において、

前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与し、

前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの前記特定周波数の振動を監視し、

前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの少なくとも一方の前記特定周波数の振動が変化したことにより前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法。

20

【請求項 10】

前記第 1 プローブに特定周波数の振動を付与するように構成され、

前記第 1 プローブの振動の変化率が閾値以下になったことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 9 に記載の走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法。

【請求項 11】

前記第 1 プローブに特定周波数の振動を付与するように構成され、

前記第 2 プローブの振動の変化率が閾値を上回ったことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 9 又は 10 に記載の走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法。

30

【請求項 12】

試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法において、

前記第 1 プローブは第 1 音叉型振動子に取り付けられ、

前記第 2 プローブは第 2 音叉型振動子に取り付けられ、

前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与し、

前記第 1 音叉型振動子及び第 2 音叉型振動子にそれぞれ誘起される前記特定周波数の電圧信号に基づき第 1 プローブ及び第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法。

40

【請求項 13】

前記第 1 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号と前記第 2 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号の積に基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする請求項 12 に記載の走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法。

【請求項 14】

前記第 1 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号と前記第 2 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号の和に基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互い

50

に近接したことを検出することを特徴とする請求項 1 2 に記載の走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数のプローブを有する走査型プローブ顕微鏡及びそのプローブ近接検出方法に関し、特にシアフォース方式でプローブ先端と試料表面との距離を制御する走査型プローブ顕微鏡及びそのプローブ近接検出方法に関する。

【背景技術】

【0002】

走査型プローブ顕微鏡 (SPM: Scanning Probe Microscopy) は、鋭い先端を有する探針 (プローブ) で試料表面上を走査することにより、試料の表面形状や試料表面の多様な物性・機能をナノスケールで計測する技術である。また、近年、試料のより複雑な表面形状や様々な物性・機能を計測するために、複数のプローブを有する走査型プローブ顕微鏡が開発されている。

従来、このような複数のプローブを備えた走査型プローブ顕微鏡においては、複数のプローブを試料表面の測定位置に移動させるために光学顕微鏡や電子顕微鏡が用いられている (特許文献 1 参照)。

【0003】

走査型プローブ顕微鏡の一種である走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) では、試料に近接させたプローブの周りに近接場光を発生させ、プローブと試料表面との相互作用による散乱光の光強度や光学特性を計測することにより試料の表面状態を検出する。試料表面とプローブ先端との距離を正確に検出し、プローブ先端位置を精度良く制御することは、光の回折限界を超えた分解能を実現する上で非常に重要である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2008-14903 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

SNOM では、試料表面とプローブ先端との間やプローブ相互間を光の回折限界を超えて近接させる場合がある。このような場合、光学顕微鏡を用いてモニタしながらプローブ先端位置を制御することは不可能である。一方、電子顕微鏡を用いれば、試料表面とプローブ先端との間やプローブ相互間の距離を観察することは可能であるが、手間や時間がかかる。

【0006】

また、単一のプローブを有する SNOM では、プローブ先端と試料表面とが近接したときに両者の間に発生する相互作用 (シアフォース) を利用してプローブ先端と試料表面との間の距離を制御しているが、この制御方法は複数のプローブを有する SNOM では用いることができない。なぜなら、複数のプローブを有する場合、プローブ同士が近接した場合にプローブ相互間のシアフォースの影響を受けるため、各プローブの位置制御を独立に行うことができないからである。

【0007】

本発明が解決しようとする課題は、複数のプローブの相対距離を精度良く制御することができる走査型プローブ顕微鏡及びそのプローブ近接検出方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は上記課題を解決するために成されたものであり、本出願の第 1 発明は、試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走

10

20

30

40

50

査型プローブ顕微鏡であって、

- a) 試料に対して相対的に前記第 1 プローブを走査する第 1 走査手段と、
- b) 試料に対して相対的に前記第 2 プローブを走査する第 2 走査手段と、
- c) 前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与する振動付与手段と、
- d) 前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの前記特定周波数の振動を監視する振動監視手段と、
- e) 前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの少なくとも一方の振動が変化したことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出するプローブ近接検出手段と、
- f) 前記プローブ近接検出手段の検出結果に基づき第 1 及び第 2 走査手段を制御する制御手段と

を有することを特徴とする。ここで、第 1 プローブは、1 本に限らず複数本の場合を含む。同様に、第 2 プローブも 1 本又は複数本の場合を含む。

【0009】

上記の第 1 発明においては、前記振動付与手段が、前記第 1 プローブに振動を付与するように構成され、前記プローブ近接検出手段が、前記第 1 プローブの振動の変化率が閾値以下になったことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出しても良く、前記第 2 プローブの振動の変化率が閾値を上回ったことに基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出するようにしても良い。

【0010】

また、本出願の第 2 発明の走査型プローブ顕微鏡は、上記第 1 発明において、前記第 1 及び第 2 プローブが第 1 及び第 2 の音叉型振動子に取り付けられ、前記走査手段が、前記音叉型振動子をそれぞれ共振させて前記第 1 及び第 2 プローブのそれぞれを走査するように構成され、

前記第 1 及び第 2 の音叉型振動子をそれぞれ共振させて前記第 1 プローブ及び第 2 プローブの先端をそれぞれ試料表面に接近させたときに各音叉型振動子に誘起される電圧信号を検出する電圧検出手段と、

前記電圧検出手段の検出結果に基づき、各プローブ先端と前記試料表面の距離を一定に保持するプローブ・試料間距離制御手段とを備えることを特徴とする。

【0011】

また、本出願の第 3 発明は、試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡であって、

- a) 前記第 1 プローブが取り付けられた第 1 音叉型振動子と、
- b) 前記第 2 プローブが取り付けられた第 2 音叉型振動子と、
- c) 前記第 1 音叉型振動子と前記第 2 音叉型振動子をそれぞれ共振させて、前記第 1 及び前記第 2 プローブのそれぞれを前記試料に対して相対的に走査する走査手段と、
- d) 前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与する振動付与手段と、

e) 前記第 1 及び第 2 の音叉型振動子をそれぞれ共振させて前記第 1 プローブと第 2 プローブを互いに接近させたときに各音叉型振動子に誘起される前記特定周波数の電圧信号を検出する信号検出手段と、

f) 前記第 1 音叉型振動子及び第 2 音叉型振動子にそれぞれ誘起される前記特定周波数の電圧信号に基づき第 1 及び第 2 プローブが互いに近接したことを検出するプローブ近接検出手段と

を有することを特徴とする。

【0012】

第 3 発明においては、前記プローブ近接検出手段が、前記第 1 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号と前記第 2 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号の積に基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出するように構

10

20

30

40

50

成すると良い。

【 0 0 1 3 】

また、第 3 発明においては、前記プローブ近接検出手段が、前記第 1 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号と前記第 2 音叉型振動子に誘起される特定周波数の電圧信号の和に基づき前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出するように構成することもできる。

【 0 0 1 4 】

第 2 発明及び第 3 発明においては、前記特定周波数は、前記音叉型振動子の共振周波数と異なる周波数であることが好ましい。

【 0 0 1 5 】

また、本出願の第 4 発明は、試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法であって、

前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与し、

前記第 1 プローブから前記第 2 プローブに伝播した特定周波数の振動を検出することにより前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

具体的には、前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの少なくとも一方の前記特定周波数の振動が変化したことにより前記第 1 プローブと前記第 2 プローブが互いに近接したことを検出することができる。

【 0 0 1 7 】

また、本出願の第 5 発明は、試料表面との距離を一定に保持しながら前記試料上を走査する第 1 及び第 2 プローブを有する走査型プローブ顕微鏡のプローブ近接検出方法であって、

前記第 1 プローブは第 1 音叉型振動子に取り付けられ、

前記第 2 プローブは第 2 音叉型振動子に取り付けられ、

前記第 1 プローブ及び第 2 プローブのいずれか一方に特定周波数の振動を付与し、

前記第 1 音叉型振動子及び第 2 音叉型振動子にそれぞれ誘起される前記特定周波数の電圧信号に基づき第 1 プローブ及び第 2 プローブが互いに近接したことを検出することを特徴とする。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 8 】

試料表面上にて複数のプローブを走査すると、これら複数のプローブが近接することによりプローブ間にシアフォースと呼ばれる相互作用が発生し、この相互作用の影響を受けて各プローブの振動状態が変化する。本発明の走査型プローブ顕微鏡では、第 1 及び第 2 プローブを走査する際に一方のプローブに特定周波数の振動を付与し、両プローブの該特定周波数の振動を監視するようにした。そして、両プローブのうちの少なくとも一方において特定周波数の振動が変化したことに基づき、両プローブが近接したことを検出するようにしたので、第 1 及び第 2 プローブの走査時に両プローブが衝突することを未然に防ぐことができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 9 】

【 図 1 】 本発明の第 1 の実施の形態に係る走査型近接場光学顕微鏡の概略構成図。

【 図 2 】 第 1 及び第 2 プローブに付与する振動を説明するための図。

【 図 3 】 第 1 プローブに付与される振動波形を示す図。

【 図 4 】 二帯域変調制御方式の各プローブの水晶振動子の振動によって生じる圧電信号の処理の流れを示すダイアグラム。

【 図 5 】 第 1 及び第 2 プローブ間の制御の概念図 (a) 及び制御が期待通りに行われていないときに予想される現象 (b) ~ (d) を示す図。

10

20

30

40

50

【図 6】二帯域変調制御方式の検証結果を示す図であり、第 2 プローブに第 1 プローブを接近させたときの第 1 プローブの X 軸座標の位置 (x) と各プローブの Z 軸座標の位置 (z) との関係 (a)、第 1 プローブの X 軸座標の位置 (x) と各プローブの共振振動の振幅との関係 (b)、第 1 プローブの X 軸座標の位置 (x) と各プローブの変調振動の振幅との関係 (c) を示す図。

【図 7】別の検証結果を示す図 6 相当図。

【図 8】第 2 プローブの先端との衝突を避けつつ第 2 プローブ先端付近の領域を第 1 プローブで走査したときの第 1 プローブの軌跡を示す図。

【図 9】第 2 プローブの先端付近の領域を第 1 プローブで走査したときの検証結果を示し、(a) はプローブ先端の SEM 像、(b) は第 1 プローブの軌跡を示す。

10

【図 10】別の検証結果を示す図 9 相当図。

【図 11】第 2 プローブの先端付近の領域を第 1 プローブで走査したときの検証結果を示し、(a) は各プローブ先端の SEM 像、(b) は各プローブの変調信号マッピングを示す。

【図 12】第 2 プローブの先端付近の領域を第 1 プローブで走査したときの検証結果を示し、(a) は各プローブ先端の SEM 像、(b) は各プローブの変調信号マッピングを示す。

【図 13】別の検証結果を示す図 11 相当図。

【図 14】本発明の実施例に係る SNOM の光学系を示す図。

【図 15】デュアル IC モードで測定を行う場合の SNOM の光学系の一例を示す図。

20

【図 16】I モードで測定を行う場合の SNOM の光学系の一例を示す図。

【図 17】IC モードで測定を行う場合の SNOM の光学系の一例を示す図。

【図 18】I プローブ及び C プローブと試料の測定時の写真を示す。

【図 19】SQW のキャリアを励起したときの再結合発光の発光強度マッピング (a)、発光ピーク波長マッピング (b) を示す。

【図 20】図 19 の (a) 及び (b) のライン 1 のプロファイルを示すグラフ。

【図 21】図 19 の (a) 及び (b) のライン 2 のプロファイルを示すグラフ。

【図 22】図 20 及び図 21 の発光強度の縦軸をそれぞれ対数スケールに換算したグラフ

【図 23】本発明の第 2 の実施の形態におけるプローブに対する水晶振動子の配置を説明するための図であり、(a) は第 1 実施形態の水晶振動子の配置、(b) 及び (c) は第 2 実施形態の水晶振動子の配置を示す。

30

【図 24】図 4 相当図。

【図 25】両プローブを接近させたときの各プローブの距離に関する信号の測定結果を示す図であり、(a) は両プローブが離間しているとき、(b) は両プローブが近接しているときの結果を示す。

【図 26】第 2 プローブ先端付近の領域を第 1 プローブで走査したときの両プローブの信号 $s_3(x)$ 及び両信号の積の変化を示す。

【図 27】往復走査方式の説明図。

【図 28】往復走査時の試料表面像 (トポグラフィック像 (topographic image)) 。

40

【図 29】一方向走査方式の説明図。

【図 30】一方向走査時の試料表面像 (トポグラフィック像) 。

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、本発明の具体的な実施形態について図面を参照して説明する。

まず、本発明の第 1 実施形態について図 1 ~ 図 22 を参照して説明する。本実施の形態に係る走査型プローブ顕微鏡 (SPM) は近接場光学顕微鏡 (SNOM) であり、図 1 に、本実施形態に係る走査型近接場光学顕微鏡の概略構成図を示す。図 1 に示すように、第 1 実施形態の SNOM 1 は試料 S が載置される試料ステージ 3、試料 S の表面を走査する第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6、試料ステージ 3 を XY 方向 (水平方向) 及び Z 方向

50

(垂直方向)に移動させる試料移動機構 8、第 1 プローブ 5 を X Y 方向(水平方向)及び Z 方向(垂直方向)に移動させるプローブ移動機構 10、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 の先端と試料との間の距離を制御する距離制御機構 12、レーザ光を出射する光源 14、試料から放射される信号光を検出する検出部 16 を備えている。検出部 16 は、集光レンズ、分光器、CCD を含んで構成されている。

【0021】

試料移動機構 8 は、 piezoアクチュエータを駆動源とする微動機構 18、ステッピングモータを駆動源とする粗動機構 20 からなり、水平(XY)方向及び垂直方向(Z方向)に試料ステージ 3 を移動させる。制御装置 22 は、粗動機構 20 による比較的大きな移動と微動機構 18 による微小な移動とを切り替えて行うよう試料移動機構 8 を制御する。これにより、試料ステージ 3 に載置された試料が水平方向及び垂直方向に移動される。

10

【0022】

第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 は、いずれも先端が尖鋭化され、当該先端部に近接場光として取り出す波長以下の微小開口を有する光ファイバプローブから成る。各光ファイバプローブは、先端及び開口を除き金属コーティング(例えば金(Au)コーティング)されている。

【0023】

光源 14 から出射されたレーザ光は、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のいずれかの端部から当該プローブに導入され、そのプローブ先端の微小開口から外部に洩れ出て試料表面に近接場光を形成する。一方、試料表面に形成された近接場光によって試料表面で発生した散乱光等は第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のいずれかの先端開口から当該開口に導入され検出部 16 に導かれる。光源 14 からの光を試料表面に導くプローブをイルミネーションプローブ(Iプローブ)、試料表面で発生した光を集光して検出部 16 に導くプローブをコレクションプローブ(Cプローブ)と呼ぶ。本実施形態の SNOM1 では、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のいずれもが Iプローブ、Cプローブとなり得る。

20

【0024】

プローブ移動機構 10 は、 piezoアクチュエータを駆動源とする微動機構 10a、ステッピングモータを駆動源とする粗動機構 10b からなり、XY方向(水平方向)及びZ方向(垂直方向)に第 1 プローブ 5 を移動させる。微動機構 10a 及び粗動機構 10b は前記制御装置 22 に接続されている。制御装置 22 は、粗動機構 10b による比較的大きな移動と微動機構 10a による微小な移動とを切り替えて行う。

30

本実施形態では、試料移動機構 8 及びプローブ移動機構 10 が第 1 走査手段として機能し、試料移動機構 8 が第 2 走査手段として機能する。

【0025】

距離制御機構 12 は、微小振動された第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 が試料表面に近づいたときに第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 それぞれの先端と試料表面との間に働くシアフォースを検出することにより第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 の先端と試料表面との距離を制御する。具体的には、距離制御機構 12 は音叉状(U字状)の水晶振動子(チューニングフォーク) 25, 27、各水晶振動子 25, 27 に接続された発振器 29, 30、及びロックインアンプ 32, 34 から成る。各水晶振動子 25, 27 は一対の振動体を連結した U 字構造を有している。一対の振動体は電氣的に絶縁されている。水晶振動子 25 の一方の振動体に発振器 29 が、水晶振動子 27 の一方の振動体に発振器 30 が、それぞれ電氣的に接続されている。

40

図 1 では、発振器(発振器 29, 発振器 30)が接続された振動体にプローブ(第 1 プローブ 5、第 2 プローブ 6)が固定されているが、ロックインアンプ(ロックインアンプ 32, ロックインアンプ 34)が接続された振動体に前記プローブ(第 1 プローブ 5、第 2 プローブ 6)を固定しても良い。

なお、ロックインアンプ 32, 34 には、発振器 29, 30 から参照用の信号が供給され、位相検波(同期検波)するようになっている。

【0026】

50

発振器 29, 30 から振動体に加振用電圧（交流電圧）が印加されると、当該振動体がチューニングフォークのU字構造が存在する面内に振動し、これに同期して他方の振動体も振動する。そして、共振点の周波数のときに最大の振幅で共振する。このとき、振動体に誘起される電圧はロックインアンプ 32, 34 で測定され、制御装置 22 に入力される。

この状態で、プローブ 5, 6 の先端を試料表面に近づけていくと、プローブ 5, 6 の先端と試料表面との距離が一定以下になったときにシアフォースが作用してプローブ 5, 6 の振幅が小さくなり、この影響により振動体の振幅も小さくなる。振動体の振幅が小さくなるとロックインアンプ 32, 34 で測定される電圧振幅も小さくなる。制御装置 22 は電圧振幅の変化をモニタし、ロックインアンプ 32 で測定される電圧振幅を一定に保つようにプローブ移動機構 10 を制御、ロックインアンプ 34 で測定される電圧振幅を一定に保つように試料移動機構 8 を制御する。これにより、プローブ 5, 6 の先端と試料表面との距離をそれぞれ一定に保ちながらプローブ 5, 6 を走査することができる。

10

【0027】

本実施形態の SNOM1 では、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 の両方、或いはいずれか一方のみを用いて試料表面を観察することができる。第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のいずれか一方を I プローブ、他方を C プローブとして試料表面を観察するモードをデュアル IC モードと呼ぶ。また、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のうちの一方のみを用いて試料表面を観察するモードを IC モード、I モード、C モードと呼ぶ。IC モードでは、1 本のプローブが I プローブ及び C プローブを兼用する IC プローブとなり、光源 14 からレーザー光を試料表面に導くプローブ自身が試料表面で発生した散乱光を検出部 16 に導く。C モードでは第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のいずれかが C プローブとなり、ファーフールドから試料表面に光を照射し、その光によって試料表面に発生した散乱光等を C プローブで集光する。I モードでは第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のいずれかが I プローブとなり、この I プローブを用いて試料表面に光を照射し、その光によって発生する散乱光等をレンズにより広域的に観察する。

20

【0028】

例えば半導体を試料 S とした場合、上述した 4 種類のモードによって次のような観察が可能である。すなわち、C モードでは、ファーフールドから半導体に広域的に光を照射してキャリアを励起し、そのキャリアの再結合による局所的な発光を C プローブで集光して観察することができる。I モードでは、I プローブを用いて半導体に局所的に光を照射し、励起されたキャリアの発光をレンズにより広域的に観察することができる。IC モード又はデュアル IC モードでは、I プローブ又は IC プローブを用いて半導体を局所的に励起し、その励起されたキャリアの再結合による発光の局所的な集光を C プローブ又は IC プローブにより観察することができる。

30

【0029】

特に、デュアル IC モードでは、I プローブと C プローブとを近接させることで、I プローブからの光で励起されたキャリアの発光を C プローブで捉えることができ、キャリアが流れる方向、つまりキャリア流路を観察することができる。半導体の一種である InGaN 中のキャリア拡散長は数百 nm 程度と見積もられており、InGaN のキャリア流路を観察する場合は、第 1 及び第 2 プローブ 5, 6 間の距離を数百 nm 以下まで近づける必要がある。

40

【0030】

このように、1 本のプローブで試料表面を走査する IC モード、I モード、C モードに対して、2 本のプローブで試料表面を走査するデュアル IC モードは、両プローブと試料との距離に加えてプローブ間の距離を制御する必要がある。特に両プローブ 5, 6 を近接させる場合には、両プローブ 5, 6 が衝突しないように両プローブ 5, 6 の移動を制御する必要がある。

ところが、プローブ 5, 6 間の距離が一定値以下になるとプローブ 5, 6 相互間にシアフォースが働くため、両プローブ 5, 6 の移動を制御する際は、シアフォースの影響を考

50

慮しなければならない。

【 0 0 3 1 】

そこで、本実施形態の S N O M 1 では、デュアル I C モードで測定を行う場合は、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 のうちの一方、例えば第 1 プローブ 5 に、水晶振動子 2 5 の共振周波数とは異なる特定周波数の振動（以下、この振動を「変調振動」という）を付与している。そして、両プローブ 5 , 6 の変調振動の振幅を検出し、この振幅の変化に基づき 2 本のプローブ 5 , 6 が互いに近接したことを判定するようにしている。

【 0 0 3 2 】

図 2 は、各プローブに付与される振動を示す図である。具体的には、制御装置 2 2 の制御により微動機構 1 0 a を駆動させ、これにより水晶振動子 2 5 を、共振周波数の 30kHz 近辺とは異なる特定周波数（100Hz）で物理的に振動させている。つまり、本実施形態では、制御装置 2 2 は各プローブの移動を制御する機能と、一方のプローブ（水晶振動子）を特定周波数（100Hz）で発振させる機能を備えている。これにより、第 1 プローブ 5 は、水晶振動子 2 5 の共振周波数である 30kHz で振動すると同時に、100Hz で試料表面と平行方向（水平方向）に振動する。図 3 は、第 1 プローブ 5 に付与される振動波形を示す図である。このように本実施形態の S N O M 1 では、第 1 及び第 2 プローブ 5 , 6 を共振周波数で振動させると共に、第 1 プローブ 5 に物理的な振動による変調を与えることにより、第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 と試料との距離及び、第 1 プローブ 5 と第 2 プローブ 6 との間の距離（プローブ間距離）を制御している。以下の説明では、このような制御方式を二帯域変調制御方式と呼ぶ。

10

20

【 0 0 3 3 】

図 4 は二帯域変調制御方式の処理の流れを示すダイアグラムである。なお、図 4 では、発振器が特定周波数（100Hz）で発振させることとしているが、実際は、前述の通り制御装置 2 2 が特定周波数で発振させる機能を有している。

以下に、二帯域変調制御方式の処理の流れについて詳細に説明する。

例えばプローブ A の近傍にプローブ B と試料（の表面）の 2 つの物体が存在するものとし、プローブ A からプローブ B まで及び試料の表面までの距離をそれぞれ x 、 z とする。また、水晶振動子（チューニングフォーク）の振幅を C としたときの実際の振動を

$$C \cos \omega_1 t$$

と記述するものとし、このときの C と x 、 z の関係を

$$C = f_x(x) f_z(z)$$

と表すこととする。

30

【 0 0 3 4 】

$f_x(x)$ はプローブ B がプローブ A に与える振幅減衰量の大きさの関係を表す関数、 $f_z(z)$ は試料表面がプローブ A に与える振幅減衰量の大きさの関係を表す関数である。 $f_x(x)$ と $f_z(z)$ はいずれも単調減少する関数であり、さらに、ある程度離れている領域では微分関数 $f'_x(x)$ と $f'_z(z)$ も単調減少する。

距離 x に周波数 $\omega_m/2$ 、振幅 a の変調をかけた場合、振幅 a が十分に小さいとすると、 $f_x(x)$ は次の近似式

$$f_x(x) = f_x(x_0) + a f'_x(x_0) \cos \omega_m t$$

で表すことができる。

40

これより、例えば水晶振動子 2 7 の振動によって生じるチューニングフォークの圧電信号 $s(x, z, t)$ ($= kC \cos \omega_1 t$) は、

$$s(x, z, t) = k f_z(z) (f_x(x_0) + a f'_x(x_0) \cos \omega_m t) \cos \omega_1 t$$

となり、変調振動と共振振動が重畳された形になる。ここで、 k は水晶振動子の振幅 C と圧電信号 $s(x, z, t)$ の関係を表す比例（物理）定数である。

【 0 0 3 5 】

この圧電信号 $s(x, z, t)$ に共振振動と同期した参照信号の $\cos \omega_1 t$ を乗じると

$$s(x, z, t) \cos \omega_1 t$$

$$= k f_z(z) (f_x(x_0) + a f'_x(x_0) \cos \omega_m t) \cos^2 \omega_1 t$$

50

$$\begin{aligned}
 &= k f_z(z) (f_x(x_0) + a f' x(x_0) \cos m t) [(1 + \cos 2 _1 t)/2] \\
 &= (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) + a f' x(x_0) \cos m t) \\
 &+ (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) + a f' x(x_0) \cos m t) \cos 2 _1 t
 \end{aligned}$$

となる。

ローパスフィルタ (L P F) 2 2 1 を通すことで、第 1 項の共振振動と等しい周波数成分のみの共振振動の振幅 $s_1(x, z, t)$ が得られる。

すなわち、

$$s_1(x, z, t) = (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) + a f' x(x_0) \cos m t)$$

である。

この信号 $s_1(x, z, t)$ には、変調信号成分 $\cos m t$ も含まれるため、さらに L P F 2 2 2 を通過させることで変調信号成分を取り除くことができる。

10

すなわち、

$$s_1(x, z) = (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0))$$

が得られる。

【 0 0 3 6 】

これにより、第 2 プローブ 6 と試料表面との間の距離 h 及び第 2 プローブ 6 と第 1 プローブ 5 との間の距離 d に関する情報 $s_1(x, z)$ が得られる。

一方、 $s_1(x, z, t)$ に変調信号成分 $\cos m t$ を乗じると

$$\begin{aligned}
 s_1(x, z, t) \cos m t &= (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) + a f' x(x_0) \cos m t) \cos m t \\
 &= (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) \cos m t + (1/2) k f_z(z) a f' x(x_0) \cos^2 m t) \\
 &= (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) \cos m t + (1/2) k f_z(z) a f' x(x_0) [(1 + \cos 2 m t)/2]) \\
 &= (1/2) k f_z(z) (f_x(x_0) \cos m t + (1/4) k f_z(z) a f' x(x_0) + (1/4) k f_z(z) a f' x(x_0) \cos 2 m t)
 \end{aligned}$$

となる。

20

L P F 2 2 4 を通すことで、第 2 項の変調信号と等しい周波数成分のみ (変調振動の振幅 $s_2(x, z)$) が得られる。

すなわち、

$$s_2(x, z) = (1/4) k f_z(z) a f' x(x_0)$$

が得られる。

【 0 0 3 7 】

30

この信号 $s_2(x, z)$ にも第 2 プローブ 6 と試料表面との距離 h と第 2 プローブ 6 と第 1 プローブ 5 との間の距離 d に関する情報が含まれている。この信号 $s_2(x, z)$ を $s_1(x, z)$ で除することで、第 2 プローブ 6 と第 1 プローブとの間の距離に関する情報 $s_2(x)$ が得られる。

すなわち、

$$s_2(x) = (1/2) a [f' x(x_0)/f_x(x_0)]$$

が得られる。

さらに得られた信号 $s_2(x)$ を $s_1(x, z)$ に反映させることで、第 2 プローブ 6 と試料表面との間の距離 h に関する情報 $s_1(z)$ が得られる。

なお、ここでは、第 2 プローブ 6 に取り付けられた水晶振動子 2 7 の振動によって生じる圧電信号について説明したが、第 1 プローブ 5 に取り付けられた水晶振動子 2 5 の振動によって生じる圧電信号についても同様である。

40

【 0 0 3 8 】

これらプローブと試料表面との間の距離 h に関する情報、プローブ間の距離 d に関する情報に基づき制御装置 2 2 は第 1 プローブ 5 と第 2 プローブ 6 が互いに近接したことを検出し、試料移動機構 8 及びプローブ移動機構 1 0 を制御する。従って、本実施形態では、ロックインアンプ 3 2 , 3 4 及び制御装置 2 2 が振動監視手段として機能する。また、制御装置 2 2 が振動付与手段、プローブ近接検出手段、制御手段として機能する。

【 0 0 3 9 】

二帯域変調制御方式による第 1 プローブ 5 及び第 2 プローブ 6 の制御について検証するために、いくつかの実験を行った。検証は、両プローブの近接判定の可否を中心に行い、

50

近接判定が期待通りに行われなかった場合に予測される現象（「近接不十分」、「衝突」、「一方のプローブの他方のプローブへの乗り上げ」）についても判定可能か調べた。図5の（a）は、第1及び第2プローブ間の制御の概念図を、（b）～（d）は制御が期待通りに行われていないときに予想される現象をそれぞれ示す。以下、その結果について説明する。

【0040】

まず、第1プローブ5を第2プローブ6に近接させていき、そのときの両プローブ（第1プローブ5及び第2プローブ6）の振動の変化を調べた。その結果を、図6及び図7に示す。図6、図7は、二帯域変調制御方式の検証結果を示す図である。なお、図7は、図6とは別の検証結果を示している。図6及び図7の（a）は、第2プローブ6に第1プローブ5を接近させたときの第1プローブ5のX軸座標の位置（ x ）と各プローブのZ軸座標の位置（ z ）との関係を示している。また、図6及び図7の（b）は、第1プローブ5のX軸座標の位置（ x ）と、各プローブ5, 6の共振振動の振幅との関係を、図6及び図7の（c）は、第1プローブ5のX軸座標の位置（ x ）と、各プローブ5, 6の変調振動の振幅との関係をそれぞれ示している。ここでは、第1プローブ5の初期位置（試料表面に対して任意の位置）の先端をX軸座標の原点とし、原点から第2プローブ6に向かう方向を正（+）とする。従って、X軸座標が大きいほど第1プローブ5が第2プローブ6に近接していることになる。

10

【0041】

図6及び図7の横軸はいずれも第1プローブ5のX軸座標を表す。また、図6及び図7の（a）の縦軸は、試料ステージ3と各プローブ5, 6との間の距離（ z ）、（b）の縦軸は水晶振動子25, 27の振動から変調振動を除いたものの振幅、（c）の縦軸は第1及び第2プローブ5, 6の変調信号の振幅を表す。

20

【0042】

図6に基づき説明すると、図6（a）に示すように、第1プローブ5及び第2プローブ6と試料ステージ3との距離は、第1プローブ5及び第2プローブ6が離間しているとき及び接近しているときのいずれにおいても、ほぼ同じで且つ一定であった。また、図6（b）に示すように、第1プローブ5の水晶振動子25の振動のうち変調振動を除いたもの及び第2プローブ6の水晶振動子27の振動のうち変調振動を除いたもの、すなわち共振振動の振幅もほぼ一定となった。

30

【0043】

一方、図6（c）に示すように、第1プローブ5及び第2プローブ5, 6が離間しているときは第1プローブ5からのみ変調信号が検出された。変調を停止すると、変調信号が検出されなくなったことから、これは、第1プローブ5自身の変調信号が検出されたものと考えられる。

【0044】

また、第1プローブ5を第2プローブ6に近づけていくと、第1、第2プローブ5, 6の両方から変調信号が検出された（図6（c）において破線の円で囲んだ部分）。つまり、第1及び第2プローブ5, 6の接近により第1プローブ5の変調信号が第2プローブ6に伝播したと考えられる。なお、第2プローブ6から変調信号が検出されることに応じて第1プローブ5から検出される変調信号が減衰した。第1及び第2プローブ5, 6が近接すると、第1プローブ5と第2プローブ6の相互作用により第1プローブ5も第2プローブ6の影響を受けるためだと考えられる。このため、第1プローブ5の変調信号が減衰したと思われる。

40

【0045】

さらに、上述したように、第1プローブ5と第2プローブ6とが接近しても、両プローブ5, 6と試料ステージ3との距離（ z ）はほぼ同じで且つ一定であった（図6（a））。また、第1プローブ5の水晶振動子25及び第2プローブ6の水晶振動子27の共振振動の振幅もほぼ一定であった（図6（b））。このことから、両プローブ5, 6が近接し、第1プローブ5の変調信号が第2プローブ6に伝播しても、一方のプローブが他方のプ

50

プローブに乗り上げていないことが分かる。また、少なくとも第2プローブ6から変調信号が検出される初期においては、両プローブ5, 6の衝突を回避できていると考えられる。両プローブ5, 6が衝突すれば、水晶振動子の共振振動の振幅も大きく減衰すると考えられるからである。

【0046】

図7では、第1プローブ5を第2プローブ6に近接させたときの両プローブ5, 6のZ軸座標(z)及び水晶振動子の共振振動の振幅は図6とほぼ同様の結果が得られた(図7の(a)及び(b)参照)。一方、第2プローブ6で変調信号が検出されても第1プローブ5の変調信号の減衰が観察されず、図6に示す結果と異なる傾向を示した(図7の(c)参照)。

10

【0047】

以上、図6及び図7に示す結果から、第1及び第2プローブ5, 6が近接すると、(1)第1プローブ5の変調信号の減衰、(2)第2プローブ6の変調信号の検出、のいずれか或いは両方に基づいて、第1及び第2プローブ5, 6の接近判定が可能であることが示唆された。この場合、例えば第1及び第2プローブ5, 6の少なくとも一方の変調信号の変化が所定の閾値を超えたことに基づき第1及び第2プローブ5, 6の接近を判定する方法が考えられる。

【0048】

そこで、次に、第2プローブ6の先端との衝突を回避しつつ該第2プローブ6の先端付近の領域を第1プローブ5で走査可能かについて検証した。この検証実験では、まず、光学顕微鏡を用い、目視にて第1及び第2プローブ5, 6のY方向の位置合わせを行った。図8は、プローブ同士の衝突を避けつつ第2プローブ6先端付近の領域を第1プローブ5で走査したときの第1プローブの軌跡を示す図である。図8において左右方向をX方向、上下方向をY方向とする。また、図8中、白抜き丸数字は第1プローブ5の移動順序を示す。図8に示すように、第1プローブ5を第2プローブ6に向かってX方向に移動させ(アプローチ)、変調信号の変化を検出したら引き返し、Y方向に500nmほど移動させてから再び第2プローブ6にアプローチする、という動作を繰り返した。

20

【0049】

ここでは、第1プローブ5の変調信号の電圧値が80~90%に減少したことをもって変調信号が変化したと判断した。電圧値の減少の下限を80%に設定したのは、第1プローブ5と第2プローブ6の衝突をできるだけ避けるためである。変調信号が大きく減衰するほどシアフォースの影響が大きく、両プローブが接近していることになる反面、両プローブが接触したり衝突したりする可能性が大きくなる。今回用いたプローブは金コーティングしており、接触により金コーティングが剥がれ易い。金コーティングが剥がれたプローブは交換が必要になることから、接触の可能性を小さく抑えるために、電圧値の減少の下限を80%とした。ただし、多少接触しても破損し難いプローブの場合や、コーティングが多少剥離しても測定に影響を及ぼさないプローブの場合には、下限を70%程度に設定しても良い。

30

【0050】

また、変調信号の上限を90%としたのは、ノイズの影響を除くためである。変調信号の減衰は、両プローブ間にシアフォースが作用し始めたことを意味するが、シアフォースが作用していない場合でもノイズによって変調信号が減衰する場合があるからである。従って、ノイズの影響を無くすことができれば、変調信号の上限を95%程度に設定しても良い。

40

【0051】

図9~図11に具体的に第2プローブ6の先端付近の領域を第1プローブ5で走査したときの結果を示す。図9~図11の各(a)は走査に用いた第1プローブ5及び第2プローブ6の先端のSEM像を示す。また、図9及び図10の各(b)は第1プローブ5の軌跡及びこの軌跡から推定される第2プローブ6の先端位置を示す。また、図11(b)は走査中の両プローブ5, 6の変調信号の大きさを示す。なお、図9及び図10の各(b)

50

では、説明を簡単にするため、第1プローブ5の軌跡を直線で表しているが、実際は、第1プローブ5は周期100Hz、振幅50nm (peak-to-peak) で振動しながら2次元走査される。すなわち、第1プローブ5はy軸方向に波打つように動きながらx軸方向に移動している。

【0052】

図9及び図10に示すように、第1プローブ5の軌跡から破線の円が第2プローブ6の先端位置であると推定された。また、第1プローブ5の軌跡の変調信号検出位置を結んだ形状は第2プローブの先端の輪郭と類似していた。図9に示す検証実験では、終了後の第1及び第2プローブ5, 6の先端に破損が見られなかったことから、第2プローブ6と衝突させることなく当該第2プローブ6の近辺の領域を第1プローブ5で走査できた。

10

図10に示す検証実験では、終了後の第1及び第2プローブ5, 6, の先端の一部から金コーティングが剥がれていた。ただし、ガラス部分の破損は見られなかったことから、第1プローブ5の走査時に両プローブ5, 6が接触した可能性が示唆された。

【0053】

また、図11に示すように、両プローブ5, 6間の距離が所定値を下回ると(近接すると)、第1プローブ5の変調信号が急激に減衰することが分かった。さらに、第1プローブ5の変調信号マッピングの形状から、第2プローブ6の先端部分の輪郭が推定可能であることが分かった。なお、実験終了後の第2プローブ6の先端部において金コーティングの大きな剥離が見られた(図11(a)参照)。ただし、変調信号マッピングからは、両プローブが衝突した形跡はみられなかった。

20

【0054】

図12は、特徴的な先端形状を有するプローブを用いて広範囲に走査したときの第1プローブ5の変調信号マッピングを示す。変調マッピングでは各点の色の濃淡で電圧値の増減を表しており、最も濃い黒色が、両プローブが離間しているときの変調信号の電圧値に対して10%減少したことを、最も淡い黒色(灰色)が10%増加したことを意味する。

【0055】

図12(a)に示すように、両プローブの先端部はダブルテーパ状になっており、異なる角度の2段の傾斜が見られる。一方、図12(b)に示す変調マッピングでも2段の傾斜が観察され、プローブの先端形状を推定可能であることが分かった。

【0056】

図13は、先端が大きく破損した第1プローブを用いてアプローチを行った場合の図12相当図である。図13(b)に示すように、破損によるプローブ先端の特殊形状が観察された。また、第1プローブ5と第2プローブ6の衝突の形跡(楕円で囲んだ部分)が変調信号マッピングに見られることが分かった。

30

【実施例】

【0057】

次に、上記近接場光学顕微鏡を用い、デュアルICモードにてInGaNの単一量子井戸(SQW: Single Quantum Well)サンプルについてキャリア流路の観察を行った結果について説明する。ここでは、第1プローブ5をCプローブ、第2プローブ6をIプローブとし、プローブ移動機構10により第1プローブ5を移動させながら観察を行った。また、第1及び第2プローブ5, 6間の距離の制御は上述の二帯域変調制御方式で行った。

40

【0058】

図14は観察に用いた近接場光学顕微鏡の光学系の概要を示す。本実施例の光学系は、デュアルICモード、ICモード、Iモード、Cモードのいずれかの測定モードに自由に変更できるように設計されている。また、デュアルICモードの場合には、IプローブとCプローブの配置を変更できるように設計されている。

【0059】

具体的には、InGaN半導体レーザ100の出射光路上には2個のレンズ101, 102と1個のミラー103が配置されている。そして、このミラー103と3個のファイバーマウント104~106との間及び3個のファイバーマウント104~106と分光

50

器 108 との間には、5 個のミラー m1 ~ m5 及び 1 個のビームスプリッタ bs がマトリックス状に配置されている。前記ファイバマウント 104 ~ 106 には、先端にプローブを有する光ファイバが保持される。マトリックス状に配置されたミラー m1 ~ m5 及びビームスプリッタ bs はいずれも光路から外れた位置に移動可能に構成されている。分光器 108 とミラー m5 との間にはロングパスフィルター (LPF、430nm) 109 とレンズ 110 が配置されている。LPF 109 は半導体レーザ 100 の 405nm 励起光をカットするためのものである。LPF 109、レンズ 110 を通って分光器 108 に入射した光は、液体窒素冷却 CCD 112 によって検出される。

【0060】

図 15 は、左右両側のファイバマウント 106 及びファイバマウント 106 にそれぞれ C プロブ、I プロブを取り付けたデュアル IC モードの光学系を示している。図 15 に示すように、この場合は、ミラー 103 の直ぐ後段のミラー m1 と、LPF 109 の直ぐ前段のミラー m5 を除く 3 個のミラー及びビームスプリッタは光路から外れた位置に移動されている。このため、半導体レーザ 100 からのレーザ光は、一点鎖線 L1 で示すようにミラー m1 によって I プロブに導かれる。I プロブに導かれたレーザ光はプロブ先端の開口から出射して SQW を励起する。一方、C プロブで集光された発光は、一点鎖線 L2 で示すようにミラー m5 によって LPF 109 に導かれ、分光器 108 を経て CCD 112 によって検出される。

なお、図 16 及び図 17 は 1 本のプローブを用いる I モード及び IC モードの光学系の例を示す。

【0061】

図 18 は、I プロブ及び C プロブと試料の測定時の様子を示す写真である。図 18 ではまだ C プロブのアプローチを行っていないが、右側の I プロブから励起光 (レーザ光) が照射されている様子がわかる。

【0062】

図 19 に観察結果を示す。図 19 の (a) は、発光強度マッピングを、(b) は発光ピーク波長マッピングを示す。ここでは、C プロブを I プロブにアプローチさせ、C プロブの変調信号の電圧値が 85% に減少するとアプローチを止めて引き返し、Y 方向に少し移動させて再びアプローチさせることとした。なお、図 19 (a) 及び (b) の中央部のデータが欠落しているのは、ノイズにより変調信号の減衰を誤検出したことによって C プロブが引き返したことによる。

また、図 19 の (a) 及び (b) に丸数字で示すラインのプロファイルを図 20 及び図 21 に示す。図 20 は図 19 の丸数字の「1」に対応し、図 21 は図 19 の丸数字の「2」に対応する。更に、図 20 及び図 21 の発光強度の縦軸を対数スケールに換算したグラフを図 22 に示す。

【0063】

図 19 ~ 図 21 から、励起点から離れるに従って発光が弱くなっていることが分かる。このことから、C プロブで段階的なキャリアの分布を捉えることができることが示唆された。特に、励起点から 1 μ m 程度以内の領域において発光が強くなっていることから、励起点からのキャリアの拡散がこの領域内に及んでいる可能性が示唆された。

【0064】

次に、本発明の第 2 実施形態について図 23 ~ 図 30 を参照して説明する。なお、第 1 実施形態と同一部分には同一符号を付してその説明を省略し、第 1 実施形態と異なる部分について説明する。

第 2 実施形態が第 1 実施形態と大きく異なる点は次の 3 点である。

- (1) 特定周波数の振幅方向及び水晶振動子の配置
- (2) 二帯域変調制御方式の処理の流れ
- (3) プロブの走査方式

また、上記以外にも、本実施形態では金 (Au) に比べて硬いアルミニウム (Al) コーティングのプロブを用いた点が第 1 実施形態と異なるが、この点については説明を省略し、以

10

20

30

40

50

下では上記(1)～(3)について順に説明する。

【0065】

(1) 特定周波数の振幅方向及び水晶振動子の配置

図23(a)は第1実施形態における第1及び第2プローブ5, 6の振動の様子を示している。第1実施形態では、図23(a)に矢印で示すように、第1及び第2プローブ5, 6の特定周波数の振幅方向は、いずれも試料表面を叩く方向に設定されている。また、両プローブ5, 6の対向面とは反対側の面に水晶振動子25, 27がそれぞれ取り付けられている。

【0066】

一方、図23(b)及び(c)は第2実施形態における第1及び第2プローブ5, 6の振動の様子を示している。第2実施形態では、図23(b)及び(c)に矢印で示すように、第1及び第2プローブ5, 6の特定周波数の振幅方向を、試料表面とほぼ平行な方向に設定した。また、水晶振動子25, 27は、第1実施形態の取り付け位置からプローブ25, 27を中心に90度回転させた位置、つまり、各プローブ5, 6の側方に取り付けた。

10

【0067】

このような設計変更により、本実施形態では、各プローブ5, 6が試料にタッピングするモードを除去することができ、各プローブ5, 6の先端が試料に接触して破損することを防止できる。

【0068】

(2) 二帯域変調制御方式の処理の流れ

図24は第2実施形態における二帯域変調制御方式の処理の流れを示すダイアグラムである。第2実施形態では、制御装置22は、第1プローブ5に取り付けられた水晶振動子25の圧電信号 $S(x, z, t)$ から得られる第1プローブ5と第2プローブ6の間の距離 d に関する情報 $s_3(x)$ 、第2プローブ6に取り付けられた水晶振動子27の圧電信号 $S(x, z, t)$ から得られる第2プローブ6と第1プローブ5の間の距離 d に関する情報 $s_3(x)$ の積 d' から、両プローブ5, 6が近接したことを検出する。尚、図4では、発振器が特定周波数(100Hz)で発振させることとしているが、実際は、第1実施形態と同様、制御装置22が特定周波数で発振させる機能を有している。

20

【0069】

なお、本実施形態では32kHz付近(32.7kHz)に共振周波数をもつ音叉型水晶振動子25, 27を第1及び第2プローブ5, 6に取り付けている。また、第1プローブ5に与える物理的な振動の周波数(特定周波数)は100Hzとする。

30

【0070】

図25は、特定周波数(100Hz)の変調振幅を25nm、ピーク・ツー・ピーク(peak-to-peak)値を50nm、スキャンステップ間隔を25nm、水晶振動子25, 27の印加電圧を50mVに設定して、第1及び第2プローブ5, 6の一方を他方のプローブに徐々に接近させたときの各プローブ5, 6の信号 $s_3(x)$ の測定結果を示している。このうち、図25(a)は両プローブ5, 6が離間しているとき(ファーフールド)の測定結果、(b)は両プローブ5, 6が近接しているとき(ニアフィールド)の測定結果を示す。図25の縦軸は信号の強度、横軸は時間(ミリ秒)を示している。図25から分かるように、両プローブ5, 6が離間しているとき、近接しているときのいずれであっても両プローブ5, 6の信号 $s_3(x)$ は変動するが、プローブ5, 6が近接している場合は両プローブ5, 6の信号 $s_3(x)$ の変化が同期する。なお、ニアフィールド(図25(b))では、両プローブ5, 6が近接して信号 $s_3(x)$ が減衰したことにより、両プローブ5, 6が一旦離れ、再度、両プローブ5, 6が接近するという動作を繰り返しているため、信号 $s_3(x)$ の減衰のピークが複数箇所見られるのが分かる。

40

【0071】

図25から分かるように、各プローブ5, 6の変調信号 $s_3(x)$ の変化は、両プローブ5, 6が近接したときだけでなく、各プローブ5, 6が試料に近接したときにもみられる。

50

従って、一方のプロープの信号が閾値を超えたことにより両プロープ 5, 6 の近接を検出する場合は、パルスノイズを考慮して閾値を高く設定する必要がある。

これに対して、本実施形態のように両プロープ 5, 6 の信号 $s_3(x)$ の積を利用することにより、一種の同期検波方式による信号検出が可能となり、 S/N 比が向上する。このため、閾値を低く設定することが可能となり、検出感度の向上を図ることができる。

【0072】

また、両プロープ 5, 6 の信号 $s_3(x)$ の積を利用することで、一方のプロープに発生したパルスノイズの影響による信号の変化を、プロープ 5, 6 が近接したものと誤って判定してしまうことを防止することができる。特に、両プロープ 5, 6 が近接しているときは信号 $s_3(x)$ の変化が同期することから、両プロープ 5, 6 の信号 $s_3(x)$ の積を利用することにより、両プロープ 5, 6 が離間領域にあるときの誤判定を極力排除することができ、プロープ 5, 6 の近接を精度良く検出することができる。

10

【0073】

図 26 は、第 2 プロープ 6 先端付近の領域を第 1 プロープ 5 で走査したときの両プロープ 5, 6 の信号 $s_3(x)$ 及び両信号の積の変化を示す。図 26 から、信号 $s_3(x)$ の積の変化が大きいときは両プロープ 5, 6 の信号も大きく変化していること、つまり、各プロープ 5, 6 の特定周波数の電圧信号の変化がプロープ 5, 6 の近接によるものであることが分かる。なお、図 26 に複数のピークが見られるのは、おそらく、第 2 プロープ 6 の先端に第 1 プロープ 5 の先端が近接したときだけでなく第 2 プロープ 6 の側部に第 1 プロープ 5 の先端が近接したときにも信号が減衰したためと思われる。

20

【0074】

(3) プロープの走査方式

図 27 は第 1 実施形態で採用した走査方式を示す。図 27 に示すように、第 1 実施形態では、走査を行う C モードのプロープ (C プロープ) が I モードのプロープ (I プロープ) に接近したことが認識されると、C プロープは次のラインに強制的に移動される。そして、I プロープから離れる方向に折り返して走査した後、再び I プロープに近づく方向に走査する往復走査が行われている。

【0075】

しかし、C プロープを強制的に次のラインに移動させる場合、この強制的移動によって C プロープと I プロープが衝突するおそれがある。また、C プロープと I プロープが接近すると、特定周波数 (100Hz) の信号だけでなく共振周波数 (32kHz) の信号も減衰する。このため、制御装置 22 は C プロープが試料に接近したものと誤認識し、C プロープを試料から離れる方向に移動させてしまう。この結果、往復走査方式では、C プロープと I プロープの最近接領域における C プロープの折り返し走査時に C プロープが試料から離間する。

30

【0076】

図 28 は、往復走査時における試料表面像 (トポグラフィック像) を示す。ここでは、表面がほぼ平坦な試料を用いている。また、図 28 中、左側が C プロープの走査領域を示し、右側の真っ黒の領域との境界部分が C プロープと I プロープの最近接領域となる。図 28 に示すように、C プロープと I プロープの最近接領域では、隣接する走査ラインの濃淡が異なることから、プロープ走査の往路と復路とでは C プロープと試料との距離が異なることが分かる。

40

【0077】

そこで、第 2 実施形態では、図 29 に示す一方向走査方式を採用した。図 30 は一方向走査時における試料表面像を示す。一方向走査方式では、両プロープ 5, 6 の最接近領域での走査時における両プロープ 5, 6 の衝突を避けることができる。また、図 28 との比較から、一方向走査方式では、両プロープ 5, 6 の最接近領域においても隣接するラインに濃淡の差が小さく、また、同じラインで濃淡が異なることもないことから、試料との距離を一定に保持した状態で C プロープを走査できることが分かる。

【0078】

50

なお、本発明は上記した実施の形態に限定されるものではなく、種々の変更が可能である。

例えば、走査型プローブ顕微鏡には、走査型近接場光学顕微鏡の他、走査型トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡、磁気力顕微鏡、摩擦力顕微鏡等が含まれる。

第1及び第2プローブの数は1本に限らない。第1及び第2プローブの両方が2本以上であっても良く、一方が1本、他方が2本以上でも良い。

【0079】

試料ステージを移動させることにより試料表面に対して相対的に第2プローブが走査されるように構成したが、直接的に第2プローブを移動させて試料表面上を走査するようにしても良い。また、直接的に移動させるプローブは第1及び第2プローブの一方でも良く、両方でも良い。

10

特定周波数の振動を付与するプローブは、第1及び第2プローブのいずれでも良く、また、両方のプローブに特定周波数の振動を付与するようにしても良い。

特定周波数は100Hzに限らず、自由に設定することが可能である。

【0080】

第2実施形態では、第1及び第2プローブの距離に関する信号 $s_3(x)$ の積に基づき両プローブの近接を検出したが、前記信号 $s_3(x)$ の和に基づき両プローブの近接を検出するようにしても良い。

【符号の説明】

【0081】

20

1・・・走査型近接場光学顕微鏡

3・・・試料ステージ

5・・・第1プローブ

6・・・第2プローブ

8・・・試料移動機構

10・・・プローブ移動機構

12・・・距離制御機構（プローブ・試料間距離制御手段）

14・・・光源

16・・・検出部

22・・・制御装置（制御手段、振動付与手段、プローブ近接検出手段、振動監視手段）

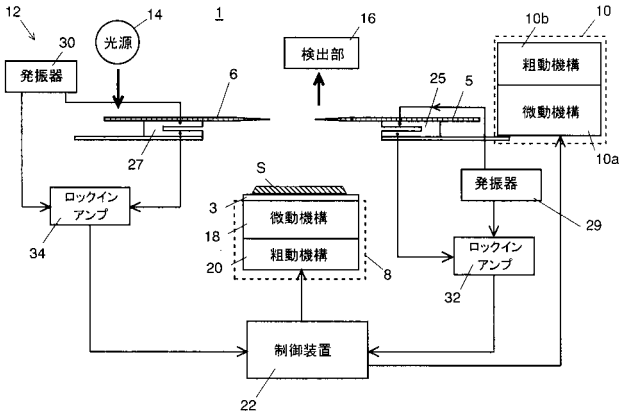
30

25, 27・・・水晶振動子

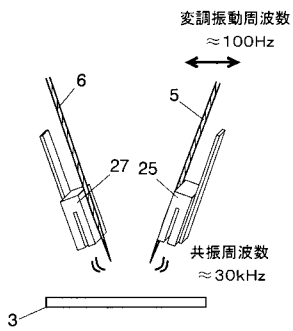
29, 30・・・加振用の発振器

32, 34・・・ロックインアンプ（振動監視手段）

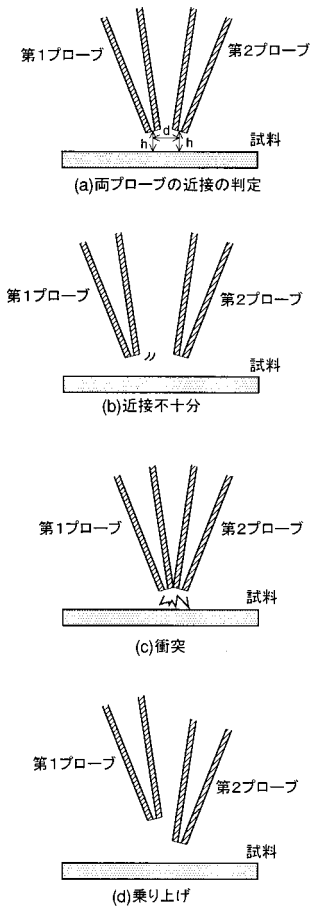
【 図 1 】



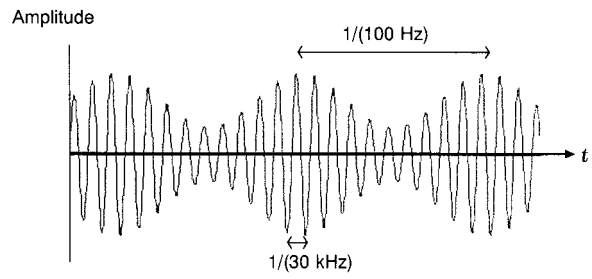
【 図 2 】



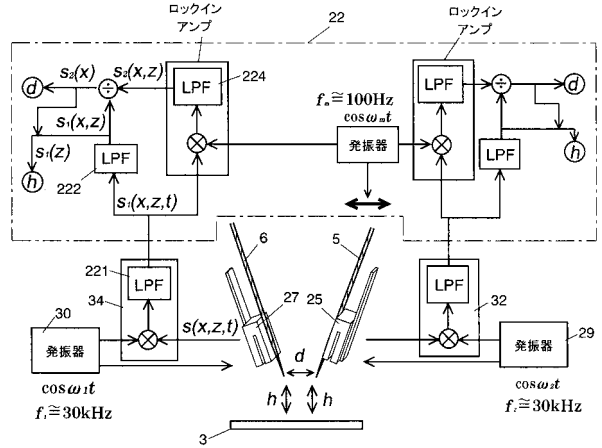
【 図 5 】



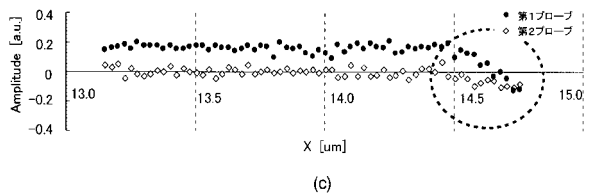
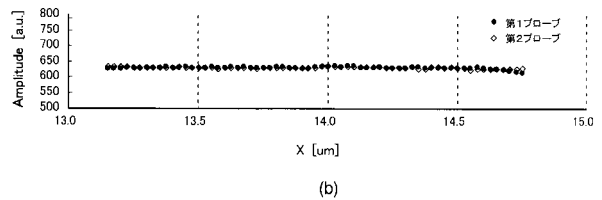
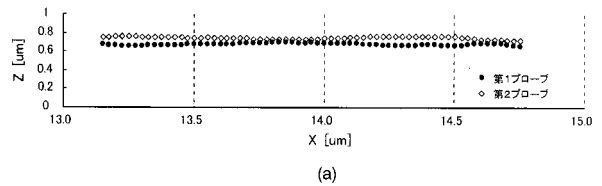
【 図 3 】



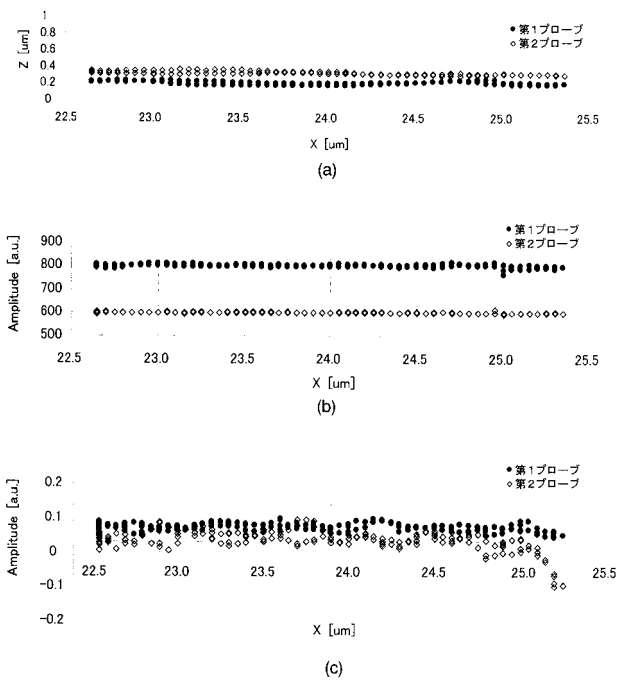
【 図 4 】



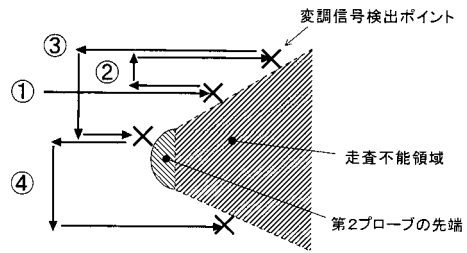
【 図 6 】



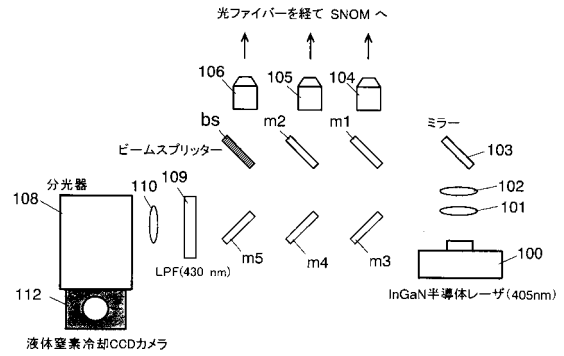
【 図 7 】



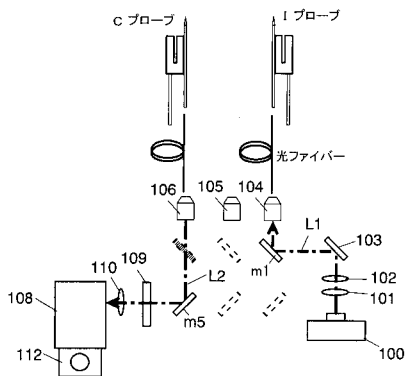
【 図 8 】



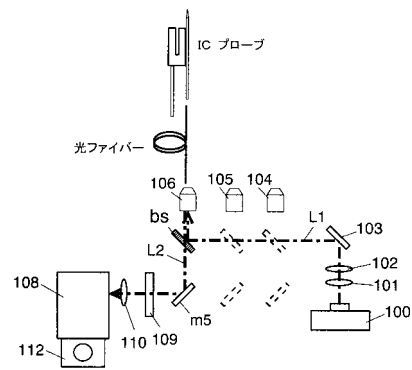
【 図 1 4 】



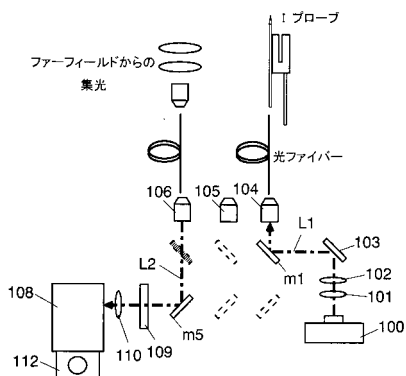
【 図 1 5 】



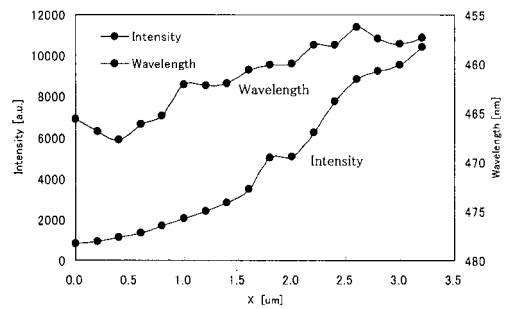
【 図 1 7 】



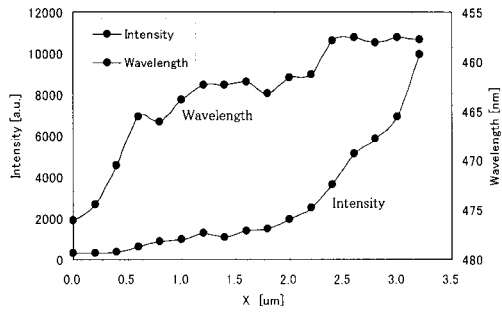
【 図 1 6 】



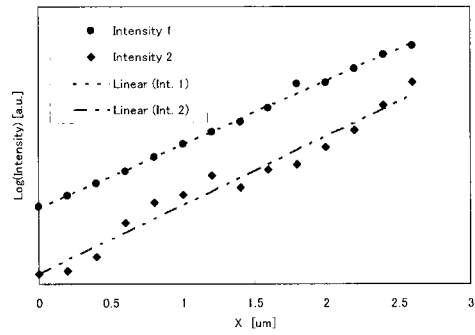
【 図 2 0 】



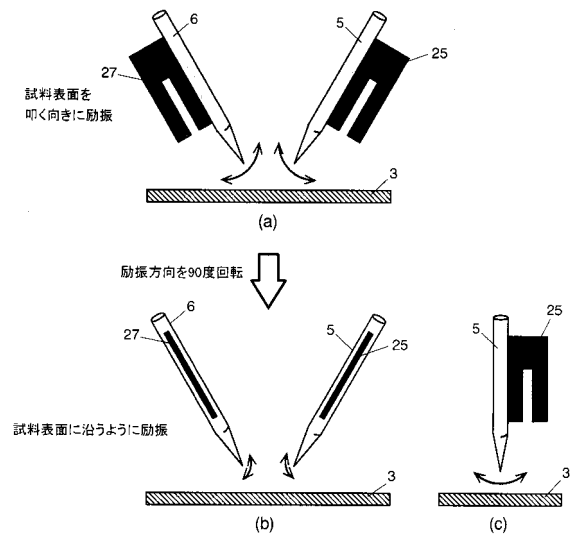
【 図 2 1 】



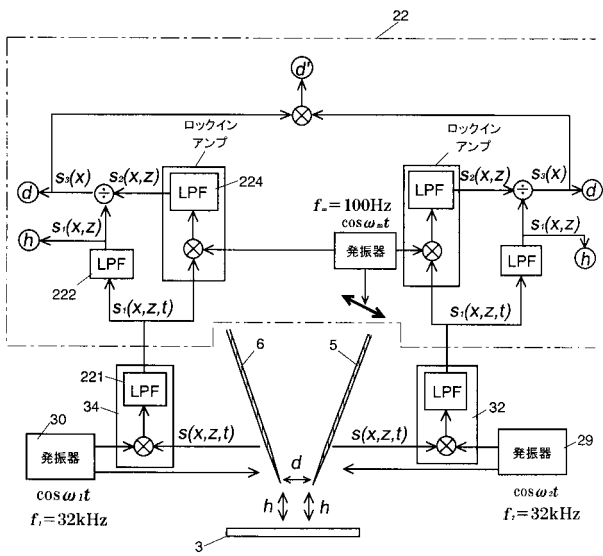
【 図 2 2 】



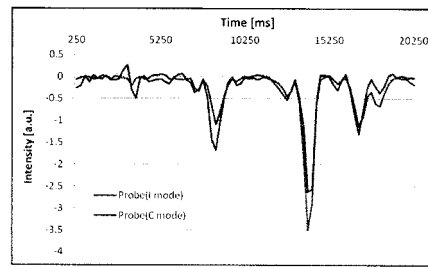
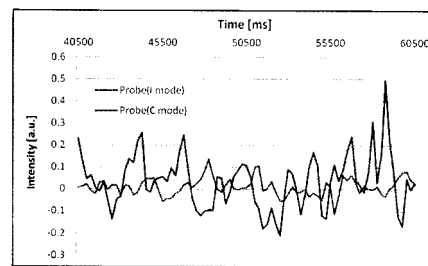
【 図 2 3 】



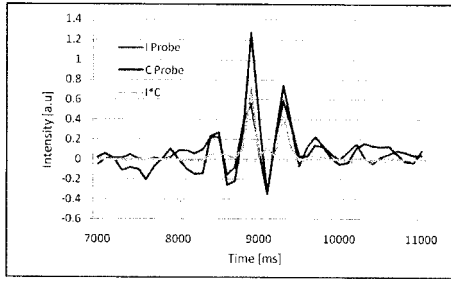
【 図 2 4 】



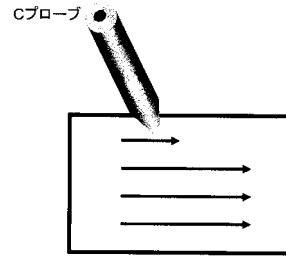
【 図 2 5 】



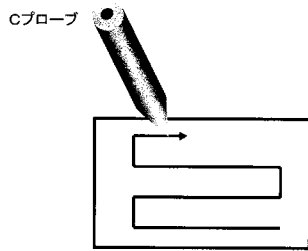
【 図 2 6 】



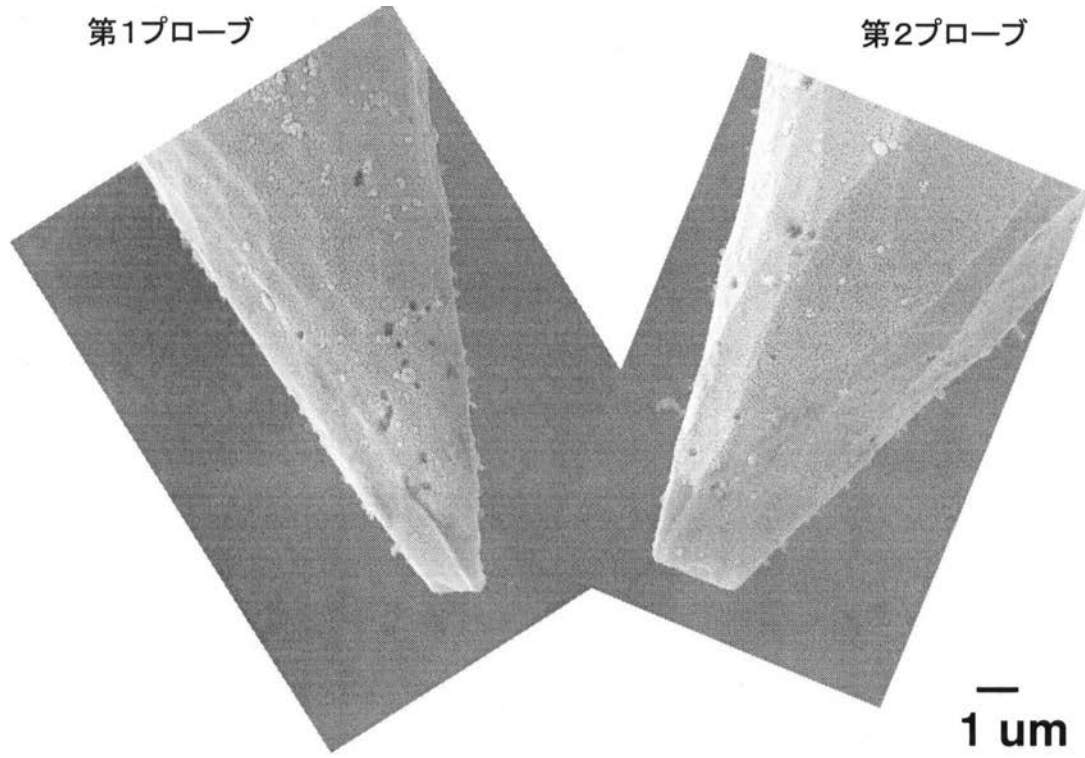
【 図 2 9 】



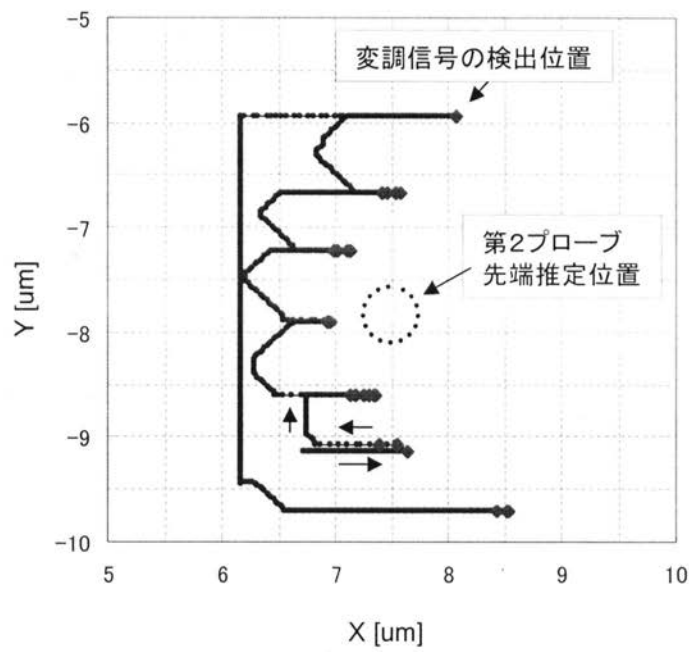
【 図 2 7 】



【図9】

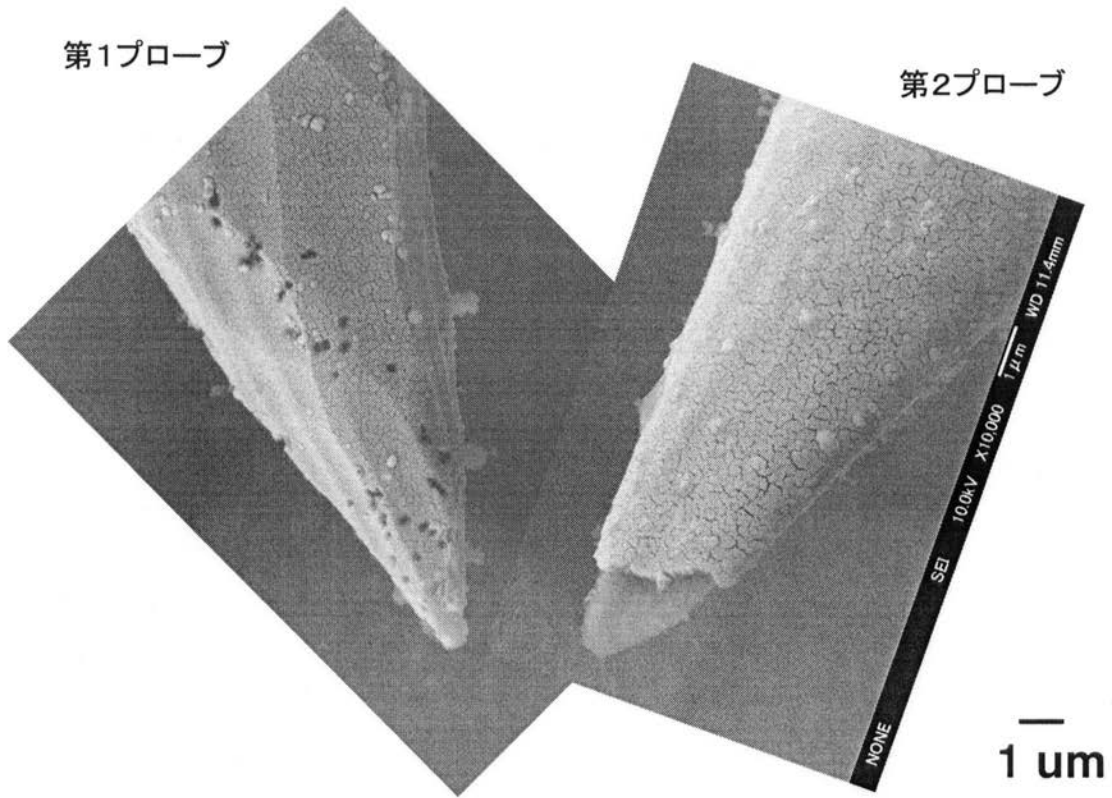


(a) プローブ先端のSEM像

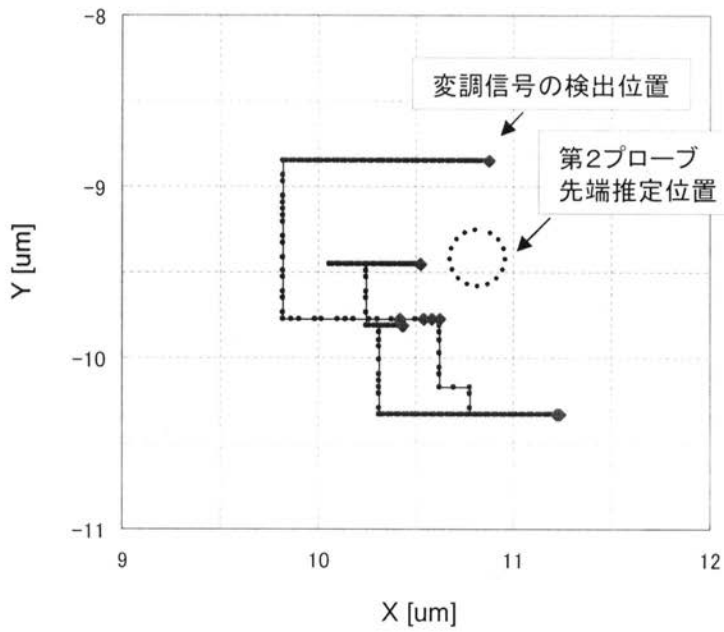


(b) 第1プローブ先端の軌跡

【図10】

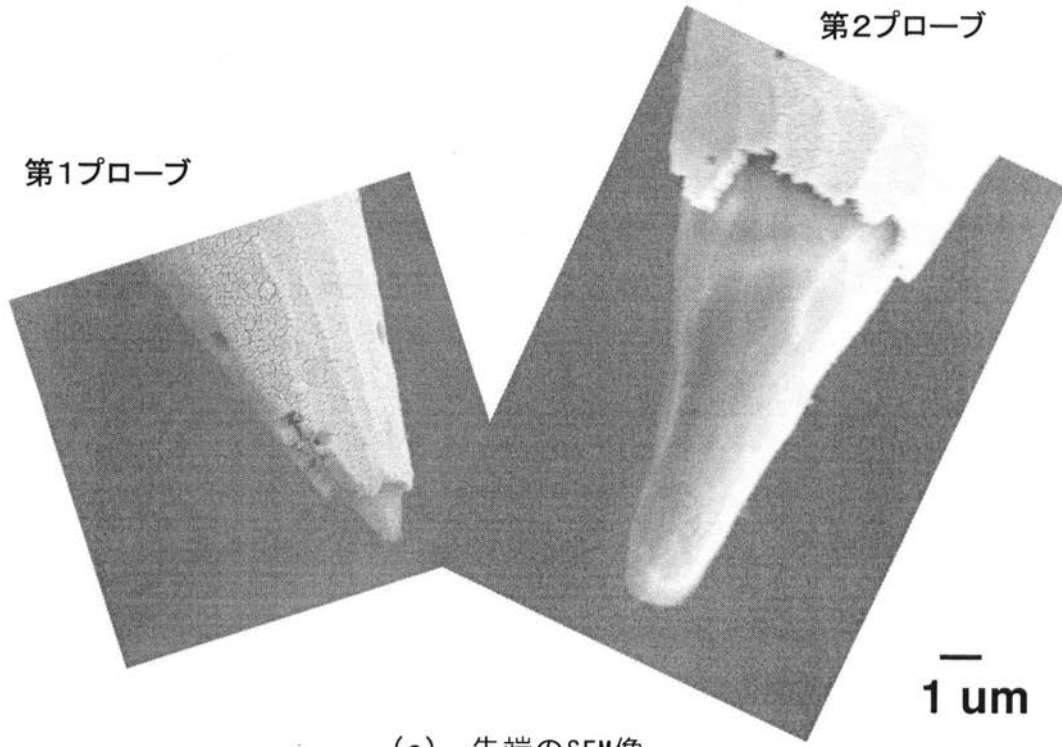


(a) プローブ先端のSEM像

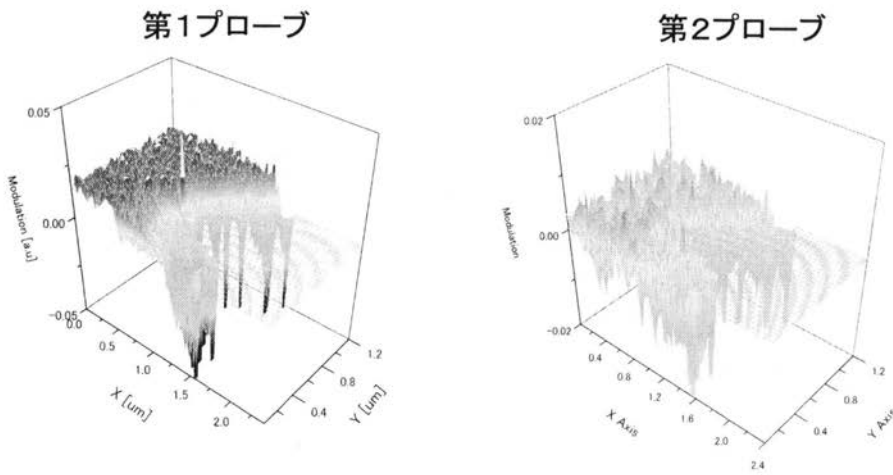


(b) 第1プローブ先端の軌跡

【 図 1 1 】



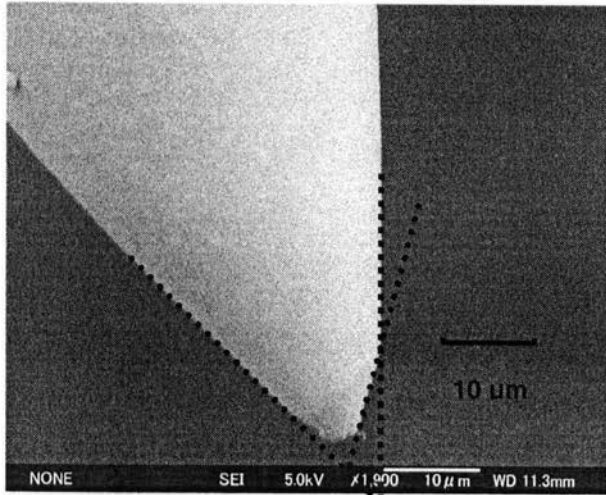
(a) 先端のSEM像



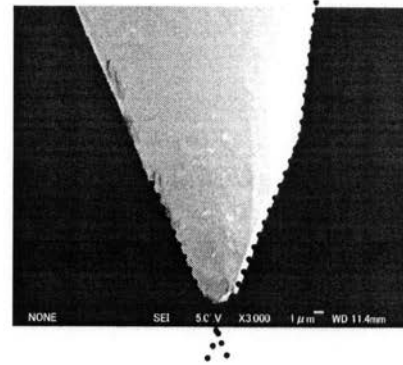
(b) エッジにおける変調信号の検出

【図12】

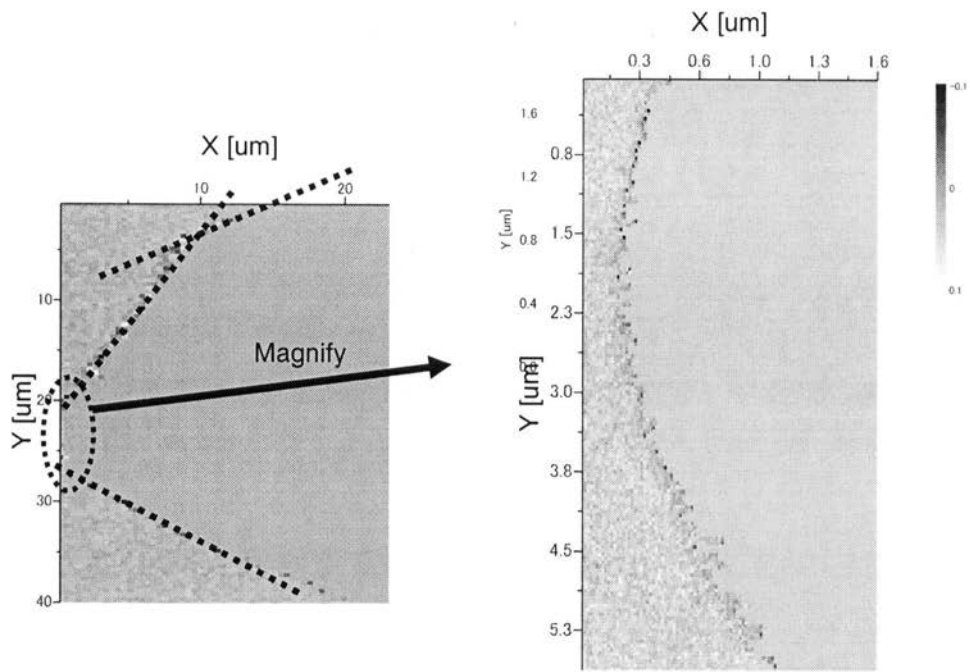
第1プローブ



第2プローブ

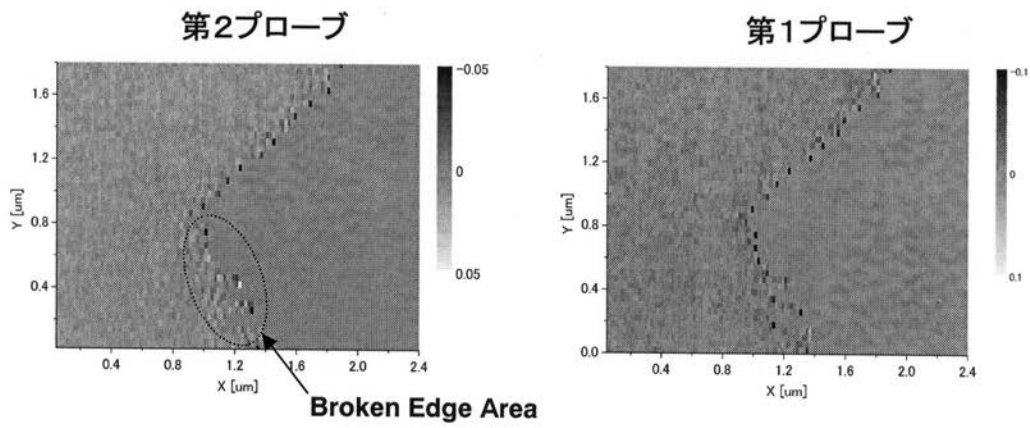
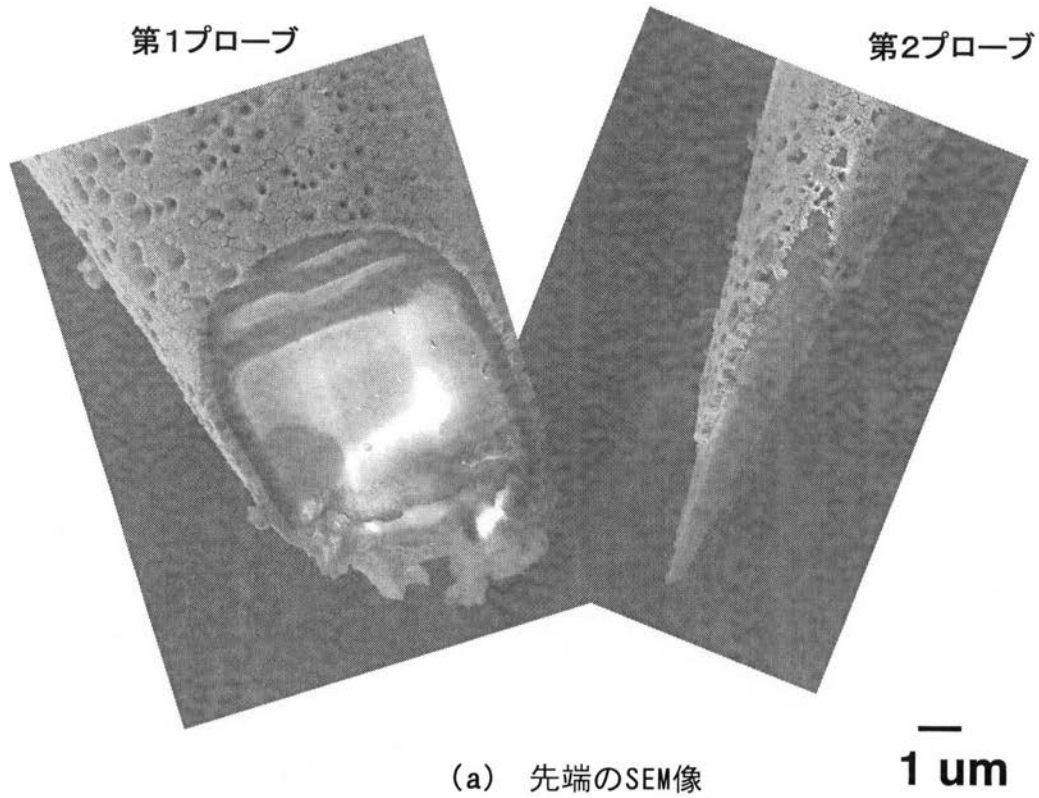


(a) 先端のSEM像



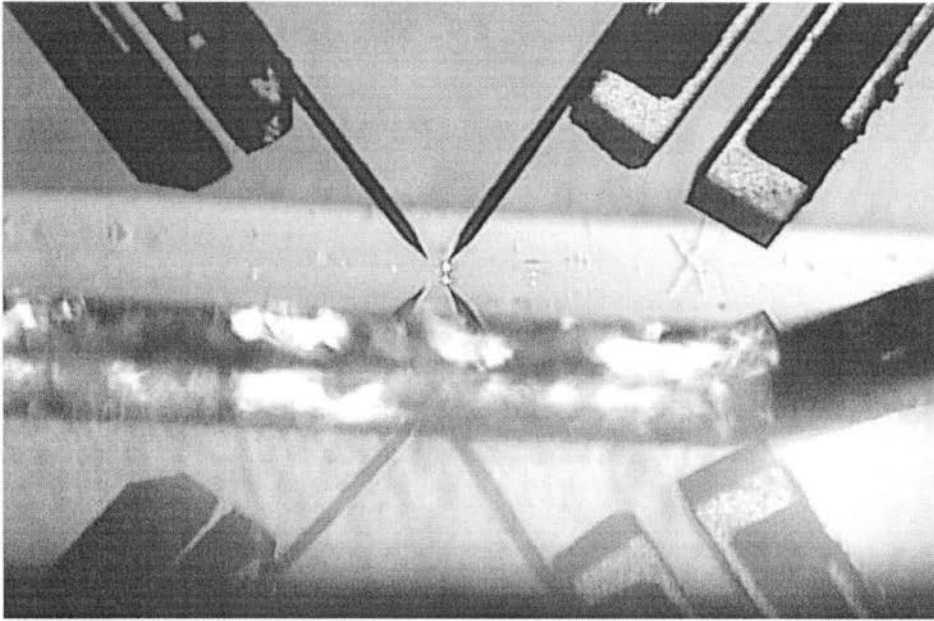
(b) エッジにおける1プローブの変調信号マッピングと輪郭の形状

【図13】

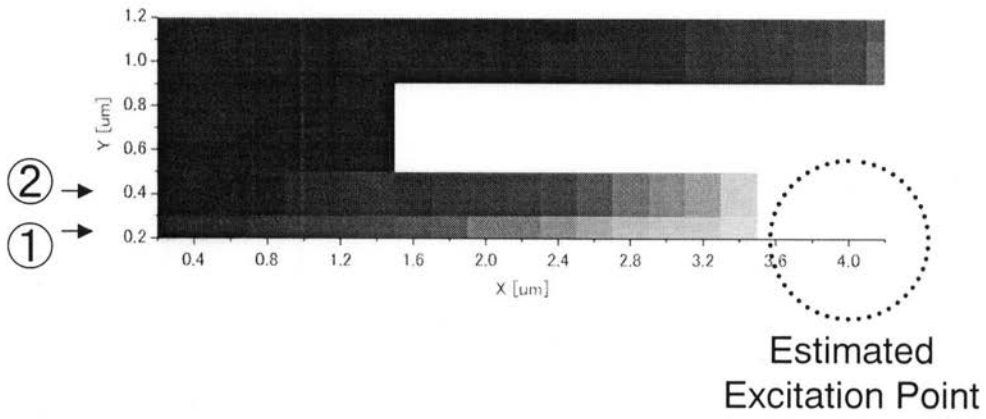


(b) エッジにおける変調信号の検出と輪郭の形状

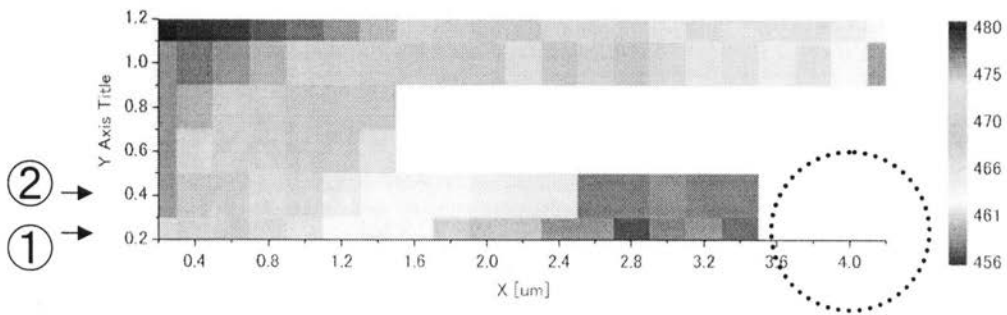
【 図 1 8 】



【 図 19 】

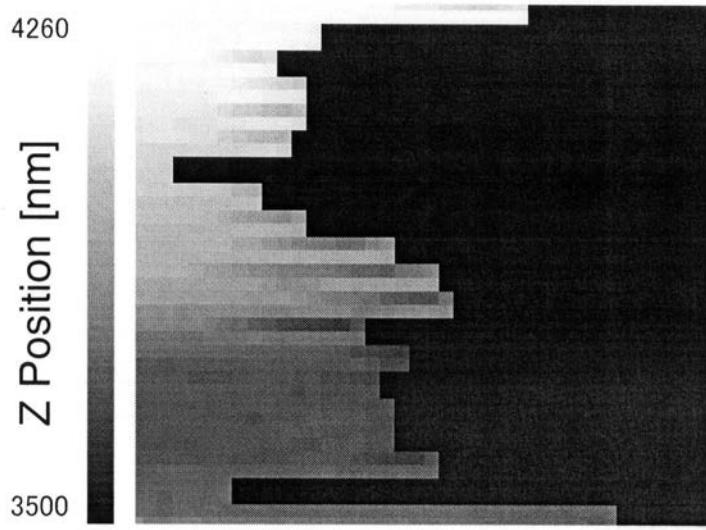


(a)

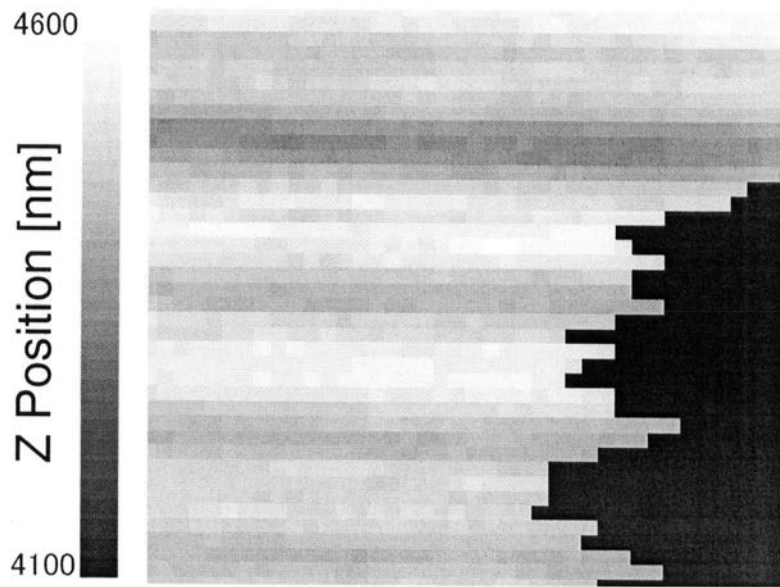


(b)

【 図 28 】



【 図 30 】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2010/060494
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01Q10/02(2010.01)i, G01Q20/04(2010.01)i, G01Q60/18(2010.01)i 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) G01Q10/00-90/00 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2010 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2010 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2010 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-298487 A (Horiba, Ltd.), 11 December 2008 (11.12.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-14
A	JP 2005-532555 A (Multiprobe, Inc.), 27 October 2005 (27.10.2005), entire text; all drawings & US 2004/0025578 A1 & EP 1520292 A & WO 2004/006302 A2 & CN 1666312 A & AU 2003256451 A	1-14
A	JP 2002-31591 A (Kansai Technology Licensing Organization Co., Ltd.), 31 January 2002 (31.01.2002), entire text; all drawings (Family: none)	1-14
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family 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 application or patent 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 26 August, 2010 (26.08.10)		Date of mailing of the international search report 07 September, 2010 (07.09.10)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/060494

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Tomoo SHIGEFUJI, Hiroshi YOKOYAMA, "Dual-probe Scanning Near-field Optical Microscope", IEICE Technical Report. OME, Yuki Electronics, 1996. 05, 96-12, pages 13 to 18	1-14
A	Ruggero Micheletto et al, Direct mapping of the far and near field optical emission of nano-sized tapered glass fibers by an integrated SNOM/SF system, Applied Surface Science, 1999.04, Vol. 144-145, p514 - p519	1-14

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2010/060494									
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01Q10/02(2010.01)i, G01Q20/04(2010.01)i, G01Q60/18(2010.01)i											
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01Q10/00 - 90/00											
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2010年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2010年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2010年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2010年	日本国実用新案登録公報	1996-2010年	日本国登録実用新案公報	1994-2010年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2010年										
日本国実用新案登録公報	1996-2010年										
日本国登録実用新案公報	1994-2010年										
国際調査で使用了電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)											
C. 関連すると認められる文献											
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号									
A	JP 2008-298487 A (株式会社堀場製作所) 2008.12.11, 全文全図 (ファミリーなし)	1-14									
A	JP 2005-532555 A (マルチプローブ・インコーポレーテッド) 2005.10.27, 全文全図 & US 2004/0025578 A1 & EP 1520292 A & WO 2004/006302 A2 & CN 1666312 A & AU 2003256451 A	1-14									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。											
* 引用文献のカテゴリー		の日の後に公表された文献									
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの		「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの									
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの		「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの									
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)		「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの									
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		「&」同一パテントファミリー文献									
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願											
国際調査を完了した日 26.08.2010		国際調査報告の発送日 07.09.2010									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 渡▲辺▼ 純也	2 J 3606								
		電話番号 03-3581-1101 内線 3252									

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 0 / 0 6 0 4 9 4
C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2002-31591 A (関西ティール・エル・オー株式会社) 2002.01.31, 全文全図 (ファミリーなし)	1-14
A	重藤知夫、横山浩, デュアルプローブ近接場光学顕微鏡, 電子情報 通信学会技術研究報告. OME, 有機エレクトロニクス, 1996.05, 9 6-12, p 13-p 18	1-14
A	Ruggero Micheletto et al, Direct mapping of the far and near field optical emission of nano-sized tapered glass fibers by an integrated SNOM/SF system, Applied Surface Science, 1999.04, Vol. 144-145, p514 - p519	1-14

フロントページの続き

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

(72)発明者 金田 昭男

京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京都大学大学院工学研究科内

(72)発明者 橋本 恒明

京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京都大学大学院工学研究科内

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。