

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6482129号
(P6482129)

(45) 発行日 平成31年3月13日(2019.3.13)

(24) 登録日 平成31年2月22日(2019.2.22)

(51) Int.Cl. F I
 GO 1 Q 60/50 (2010.01) GO 1 Q 60/50
 GO 1 Q 60/30 (2010.01) GO 1 Q 60/30

請求項の数 10 (全 22 頁)

| | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|--|
| (21) 出願番号 | 特願2015-560054 (P2015-560054) | (73) 特許権者 | 504409543 国立大学法人秋田大学 秋田県秋田市手形学園町1番1号 |
| (86) (22) 出願日 | 平成27年1月30日(2015.1.30) | (74) 代理人 | 100129838 弁理士 山本 典輝 |
| (86) 国際出願番号 | PCT/JP2015/052766 | (72) 発明者 | 齊藤 準 秋田県秋田市手形学園町1番1号 国立大 学法人秋田大学内 |
| (87) 国際公開番号 | W02015/115622 | (72) 発明者 | 吉村 哲 秋田県秋田市手形学園町1番1号 国立大 学法人秋田大学内 |
| (87) 国際公開日 | 平成27年8月6日(2015.8.6) | (72) 発明者 | 木下 幸則 秋田県秋田市手形学園町1番1号 国立大 学法人秋田大学内 |
| 審査請求日 | 平成30年1月18日(2018.1.18) | | |
| (31) 優先権主張番号 | 特願2014-16131 (P2014-16131) | | |
| (32) 優先日 | 平成26年1月30日(2014.1.30) | | |
| (33) 優先権主張国 | 日本国(JP) | | |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電気力/磁気力顕微鏡および電場/磁場同時測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

励振している探針部材の先端に設けた導電性のソフト磁性探針に周波数が異なる交流電場と交流磁場とを印加し、前記ソフト磁性探針により試料を走査し、前記探針部材の振動を検出することで、前記試料から発生する電場と磁場とを同時に測定する電気力/磁気力顕微鏡であって、

前記探針部材と、

前記探針部材を励振させる探針励振部と、

前記交流電場を発生し当該交流電場を前記ソフト磁性探針に印加する交流電場印加部と

、

前記交流磁場を発生し当該交流磁場を前記ソフト磁性探針に印加する交流磁場印加部と

、

前記交流電場印加部を駆動する交流電場駆動部と、

前記交流磁場印加部を駆動する交流磁場駆動部と、

前記探針部材の振動を検出し、振動検出信号を生成する探針振動検出部と、

前記ソフト磁性探針により前記試料を走査するために、前記探針部材を空間駆動する探針走査部と、

前記振動検出信号を取得し、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた交流電気力および交流磁気力を復調する復調部と、

前記復調部により復調された前記交流電気力を用いて、前記試料から発生する前記電場

を測定する電場測定部と、

前記復調部により復調された前記交流磁気力を用いて、前記試料から発生する前記磁場を測定する磁場測定部と、

を備えたことを特徴とする電気力/磁気力顕微鏡。

【請求項 2】

試料から発生する時間変化しない直流電場と直流磁場とを同時に測定するための請求項 1 に記載の電気力/磁気力顕微鏡であって、

前記電場測定部は、

前記試料と前記導電性のソフト磁性探針との間に生じた前記交流電気力を測定する交流電気力測定部と、

前記交流電気力測定部により測定した前記交流電気力から、前記交流電場印加部が印加する交流電場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流電場を測定する直流電場測定部と、

を備え、

前記磁場測定部は、

前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流磁気力測定部と、

前記交流磁気力測定部により測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加部が印加する交流磁場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流磁場を測定する直流磁場測定部と、

を備えたことを特徴とする電気力/磁気力顕微鏡。

【請求項 3】

試料から発生する周期的に時間変化する交流電場と交流磁場とを同時に測定するための請求項 1 に記載の電気力/磁気力顕微鏡であって、

前記電場測定部は、

前記試料と前記導電性のソフト磁性探針との間に生じた前記交流電気力を測定する交流電気力測定部と、

前記交流電気力測定部により測定した前記交流電気力から、前記交流電場印加部が印加する交流電場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流電場を測定する交流電場測定部と、

を備え、

前記磁場測定部は、

前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた交流磁気力を測定する交流磁気力測定部と、

前記交流磁気力測定部により測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加部が印加する交流磁場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流磁場を測定する交流磁場測定部と、

を備えたことを特徴とする電気力/磁気力顕微鏡。

【請求項 4】

試料から発生する時間変化しない直流電場と直流磁場、および前記試料から発生する周期的に時間変化する交流電場と交流磁場を同時に測定するための請求項 1 に記載の電気力/磁気力顕微鏡であって、

前記電場測定部は、

前記試料と前記導電性のソフト磁性探針との間に生じた前記交流電気力を測定する交流電気力測定部と、

前記交流電気力測定部により測定した前記交流電気力から、前記交流電場印加部が印加する交流電場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流電場を測定する直流電場測定部と、

前記交流電気力測定部により測定した前記交流電気力から、前記交流電場印加部が印加する交流電場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発

10

20

30

40

50

生ずる周期的に時間変化する前記交流電場を測定する交流電場測定部と、
を備え、

前記磁場測定部は、

前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流磁気力測定部と、

前記交流磁気力測定部により測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加部が印加する交流磁場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流磁場を測定する直流磁場測定部と、

前記交流磁気力測定部により測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加部が印加する交流磁場の周波数の2倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流磁場を測定する交流磁場測定部と、
を備えたことを特徴とする電気力/磁気力顕微鏡。

10

【請求項5】

前記交流電場印加部が前記試料に印加する前記交流電場の周波数 f_e と、前記交流磁場印加部が前記試料に印加する前記交流磁場の周波数 f_m とが、1以上のいかなる整数 n についても $f_m = n \cdot f_e$ かつ $n = m \cdot f_e$ をみたす、請求項1～4のいずれかに記載の電気力/磁気力顕微鏡。

【請求項6】

励振している探針部材の先端に設けた導電性のソフト磁性探針に、周波数が異なる交流電場と交流磁場とを印加し、前記ソフト磁性探針により試料を走査し、前記ソフト磁性探針の振動を検出することで、前記試料から発生する電場と磁場を同時に測定する電場/磁場同時測定方法であって、

20

探針励振部により、前記探針部材を励振させる探針励振ステップと、

交流電場印加部により、前記交流電場を発生し、当該交流電場を前記ソフト磁性探針に印加するとともに、交流磁場印加部により、前記交流磁場を発生し、当該交流磁場を前記ソフト磁性探針に印加する交流電場/交流磁場印加ステップと、

探針振動検出部により、前記探針部材の振動を検出し振動検出信号を生成する探針振動検出ステップと、

探針走査部により、前記探針部材を空間駆動し、前記ソフト磁性探針により前記試料を走査する探針走査ステップと、

30

復調部により、前記振動検出信号を用いて前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた交流電気力および交流磁気力を復調する復調ステップと、

電場測定部により、前記復調ステップにおいて復調された前記交流電気力を用いて、前記試料から発生する前記電場を測定する電場測定ステップと、

磁場測定部により、前記復調ステップにおいて復調された前記交流磁気力を用いて、前記試料から発生する前記磁場を測定する磁場測定ステップと、

を有することを特徴とする電場/磁場同時測定方法。

【請求項7】

試料から発生する時間変化しない直流電場と直流磁場とを同時に測定するための請求項6に記載の電場/磁場同時測定方法であって、

40

前記電場測定ステップは、

交流電気力測定部により、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流電気力を測定する交流電気力測定ステップと、

直流電場測定部により、前記交流電気力測定ステップにおいて測定した前記交流電気力から、前記交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流電場を測定する直流電場測定ステップを有し、かつ、

前記磁場測定ステップは、

交流磁気力測定部により、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流磁気力測定ステップと、

50

直流磁場測定部により、前記交流磁気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流磁場を測定する直流磁場測定ステップと、
を有する、
ことを特徴とする電場 / 磁場同時測定方法。

【請求項 8】

試料から発生する周期的に時間変化する交流電場と交流磁場とを同時に測定するための請求項 6 に記載の電場 / 磁場同時測定方法であって、

前記電場測定ステップは、

交流電気力測定部により、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流電気力測定ステップと、

交流電場測定部により、前記交流電気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流電場を測定する交流電場測定ステップと、

を含み、かつ、

前記磁場測定ステップは、

交流磁気力測定部により、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流磁気力測定ステップと、

交流磁場測定部により、前記交流磁気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流磁場を測定する交流磁場測定ステップと、

を含むことを特徴とする電場 / 磁場同時測定方法。

【請求項 9】

試料から発生する、時間変化しない直流電場と直流磁場および周期的に時間変化する交流電場と交流磁場を同時に測定するための請求項 6 に記載の電場 / 磁場同時測定方法であって、

前記電場測定ステップは、

交流電気力測定部により、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流電気力測定ステップと、

直流電場測定部により、前記交流電気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流電場を測定する直流電場測定ステップと、

交流電場測定部により、前記交流電気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流電場を測定する交流電場測定ステップと、を含み、かつ、

前記磁場測定ステップは、

交流磁気力測定部により、前記試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた前記交流磁気力を測定する交流磁気力測定ステップと、

直流磁場測定部により、前記交流磁気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する時間変化しない前記直流磁場を測定する直流磁場測定ステップと、

交流磁場測定部により、前記交流磁気力測定ステップにおいて測定した前記交流磁気力から、前記交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数の 2 倍以上の周波数成分を抽出することにより、前記試料から発生する周期的に時間変化する前記交流磁

10

20

30

40

50

場を測定する交流磁場測定ステップと、
を含むことを特徴とする電場 / 磁場同時測定方法。

【請求項 10】

前記交流電場印加部が前記試料に印加する前記交流電場の周波数 f_e と、前記交流磁場印加部が前記試料に印加する前記交流磁場の周波数 f_m とが、1 以上のいかなる整数 n についても $f_m = n \cdot f_e$ かつ $f_e = n \cdot f_m$ をみたす、請求項 6 ~ 9 のいずれかに記載の電場 / 磁場同時測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、試料から発生する電場と磁場とを同時に測定することができる、電気力 / 磁気力顕微鏡および電場 / 磁場同時測定方法に関する。

本発明では、周波数が異なる交流電場と交流磁場とを、励振している導電性のソフト磁性探針に印加し、前記ソフト磁性探針の振動を検出することで、前記試料から発生する電場と磁場とが同時に測定される。

【背景技術】

【0002】

試料の直流磁場を測定する技術として、図 1 (A) に示す磁気力顕微鏡 (MFM8) が知られている (特許文献 1 : WO2013/047537 参照)。

この MFM8 では、先端に探針チップ 811 が設けられた探針部材 81 (カンチレバー) が励振される。そして、バネ振動している探針チップ 811 により、試料 82 の表面を走査し、前記探針チップ 811 の振動を検出することで、試料 82 の表面の磁場を測定することができる。

【0003】

試料 82 の下方には交流磁場発生用のコイル 84 が設けられており、探針チップ 811 には、試料 82 が生成する直流磁場 H_{DC_SAMPL} と、コイル 84 が生成する交流磁場 H_{AC} との重畳磁場が印加される。

レーザ (LASER) 831 とフォトダイオード (PD) 832 とからなる振動検出器により、探針部材 81 の振動 (みかけ上のバネ定数が変化することによって生じた振動変調) が検出され、図示しない直流磁場測定部により試料 82 の表面の直流磁場が測定される。

なお、探針チップ 811 は、錐形の Si にソフト磁性体 (例えば Fe-Co、Fe-Co-B、パーマロイ (Ni-Fe)、Co-Zr-Nb 等。) の薄膜を形成することで作製される。

【0004】

図 1 (A) に示した従来の磁気力顕微鏡 (MFM8) の動作原理を説明する。

直流磁場勾配 (H_{DC_SAMPL} / z) の計測は、試料 82 上の、探針チップ 811 に空間的に一様な交流磁場を印加して、探針チップ 811 の磁気モーメントを周期的に変化させることで可能となる。

図 1 (B) に、探針チップ 811 に使用されるソフト磁性体の M-H 特性の一例を示す。

図 1 (B) では交流磁場の印加による磁化 M の時間変化を併せて示してある。

探針チップ 811 に、交流磁場により探針の共振周波数と異なる、非共振の交番磁気力が与えられたときのカンチレバー (探針部材 81) の運動方程式は、式 (1) で表される。

【0005】

10

20

30

40

【数 1】

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + m\gamma \frac{dz(t)}{dt} + (k_0 + \Delta k \cos(\omega_m t))z(t) = F_0 \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

$z(t)$: ソフト磁性探針 (探針チップ 8 1 1) の変位の時間変化 (ここで、 z 方向は、試料面に垂直な方向にとり、探針の振動方向とする)

ω_0 : 加振角周波数

ω_m : 交流磁気力の角周波数

m : ソフト磁性探針 (探針チップ 8 1 1) の等価質量

γ : 減衰係数

k_0 : カンチレバー (探針部材 8 1) 固有のパネ定数

Δk : カンチレバー (探針部材 8 1) のパネ定数のみかけ上の周期的変化の振幅

Δk k_0 であるので、式 (1) の解は式 (2) で与えられる。

【0006】

【数 2】

$$z(t) \cong \frac{F_0}{m\gamma\omega_0} \sin\left(\omega_0 t + \frac{\Delta k}{m\gamma\omega_0} \cos(\omega_m t)\right)$$

$$\cong \frac{F_0}{m\gamma\omega_0} \left(\sin(\omega_m t) + \frac{\Delta k}{2m\gamma\omega_0} (\cos((\omega_0 + \omega_m)t) + \cos((\omega_0 - \omega_m)t)) \right) \quad (2)$$

【0007】

非共振の交流磁場をソフト磁性探針 (探針チップ 8 1 1) に印加することにより、探針部材 8 1 のパネ定数は、式 (3) のように周期的に時間変化する項を含む。

$$k(t) = \{ q_{tip}^{dc} + q_{tip}^{ac} \cos(\omega_m t) \}$$

$$\cdot [(H_{DC_SMPL} / z)$$

$$+ (H_{AC} / z) \cos(\omega_m t)] \quad (3)$$

H_{DC_SMPL} : 試料から発生する直流磁場

H_{AC} : ソフト磁性探針 (探針チップ 8 1 1) に印加する交流磁場の振幅

q_{tip}^{ac} : 振幅が H_{AC} の交流磁場により探針チップ 8 1 1 に生じた交流磁荷 (以下、「交流磁極」と言う) の振幅

q_{tip}^{dc} : 直流電場 E_{DC_SMPL} により探針チップ 8 1 1 に生じた直流の磁荷 (以下、「磁極」と言う)

【0008】

外部から印加する交流磁場 H_{AC} が空間的に一様な場合、

$$| H_{AC} / z | = 1$$

となり、 $k(t)$ は、式 (4) で表される。

$$k(t) = q_{tip}^{ac} (H_{DC_SMPL} / z) \cos(\omega_m t) \quad (4)$$

q_{tip}^{ac} の値は、 H_{AC} の値を一定にすることで一定となるので、 $k(t)$ の $\cos(\omega_m t)$ で時間変化する成分を検出することで、試料 8 2 の表面の直流磁場の勾配を知ることができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献 1】WO 2013 / 047537A1

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 0 】

ところで、磁場の発生源である電流や磁気モーメントと、電場の発生源である電荷や電気分極とが共存する、磁場と同時に電場を発生する試料においては、試料の物性や特性測定といった観点から、試料から発生する直流磁場の測定だけでなく、直流電場と直流磁場の同時測定が必要な場合が生じる。

従来、このような要請（電場と磁場の同時測定）に応える技術は提供されていない。

【 0 0 1 1 】

本発明の目的は、試料から発生する電場と磁場とを同時に測定することができる電気力 / 磁気力顕微鏡および電場 / 磁場同時測定方法を提供することである。

【 課題を解決するための手段 】

10

【 0 0 1 2 】

本発明では、周波数が異なる交流電場と交流磁場とを、励振しているソフト磁性探針に印加し、ソフト磁性探針の振動を検出する。これにより、試料から発生する電場と磁場とが同時に測定される。

【 0 0 1 3 】

本発明の構成を、図面を参照しつつ説明する。

〔 1 〕

図 2 は、本発明の電気力 / 磁気力顕微鏡の基本的な実施形態を示す全体図である。

図 2 において、電気力 / 磁気力顕微鏡 1 は、探針部材 1 1 と、探針励振部 1 2、交流電場印加部 1 3 1 と、交流磁場印加部 1 3 2 と、交流電場駆動部 1 4 1 と、交流磁場駆動部 1 4 2 と、探針振動検出部 1 5 と、探針走査部 1 6 と、復調部（信号抽出部）1 7 と、電場測定部 1 8 1 と、磁場測定部 1 8 2 とを備えている。

20

探針部材 1 1 は、その先端に設けられたソフト磁性探針 1 1 2 を有する。ソフト磁性探針 1 1 2 は、たとえば、表面に導電性のソフト磁性体薄膜が形成された錐形の探針チップからなる。

探針励振部 1 2 は、探針部材 1 1 を励振させることができる。

交流電場印加部 1 3 1 は、交流電場（角周波数 ω 、振幅 E_{AC} ）を発生し当該交流電場をソフト磁性探針 1 1 2 に印加し、交流磁場印加部 1 3 2 は、交流磁場（角周波数 ω_m 、振幅 H_{AC} ）を発生し当該交流磁場をソフト磁性探針 1 1 2 に印加する。

交流電場駆動部 1 4 1 は、交流電場印加部 1 3 1 を駆動し、交流磁場駆動部 1 4 2 は、交流磁場印加部を駆動する。

30

探針振動検出部 1 5 は、探針部材 1 1 の振動を検出し、振動検出信号 VIB を生成する。

探針走査部 1 6 は、ソフト磁性探針 1 1 2 により試料 $SMP L$ を走査するために、探針部材 1 1 を空間駆動する。

復調部 1 7 は、振動検出信号 VIB を取得し、試料と前記ソフト磁性探針との間に生じた交流電気力に係る信号および交流磁気力に係る信号を復調する（図 2 では、これらの信号を EF / HF で示す）。

電場測定部 1 8 1 は、復調部 1 7 により復調された交流電気力を用いて、試料 $SMP L$ から発生する電場 $E_{SMP L}$ （ $E_{DC SMP L}$ および / または $E_{AC SMP L}$ ）を測定し、磁場測定部 1 8 2 は、復調部 1 7 により復調された交流磁気力を用いて、試料 $SMP L$ から発生する磁場 $H_{SMP L}$ （ $H_{DC SMP L}$ および / または $H_{AC SMP L}$ ）を測定する。

40

測定結果は、たとえば測定結果出力部 1 9 により画像出力することができる。

【 0 0 1 4 】

〔 2 〕

図 3 は、本発明の電気力 / 磁気力顕微鏡の一の実施形態を示す全体図である。

本実施形態の電気力 / 磁気力顕微鏡 1 は、試料 $SMP L$ から発生する時間変化しない直流電場と直流磁場とを同時に測定するために好適である。

本実施形態では、電場測定部 1 8 1' は、交流電気力測定部 1 8 1 1 と、直流電場測定部 1 8 1 2 とを備えている。

50

交流電気力測定部 1811 は、試料 S M P L とソフト磁性探針 112 との間に生じた交流電気力を測定する。直流電場測定部 1812 は、交流電気力測定部 1811 により測定した交流電気力から、交流電場印加部 131 が印加する交流電場の周波数に等しい周波数成分（図 3 では角周波数 ω_e ）を抽出することにより、時間変化しない直流電場 E_{DC} S_{MPL} （具体的には、試料 S M P L から発生する直流電場：電場振幅 R_{E_DC} と位相 θ_{E_DC} との組、または同相信号 X_{E_DC} と直交信号 Y_{E_DC} との組）を測定することができる。

ここで、 $(R_{E_DC}, \theta_{E_DC})$ と (X_{E_DC}, Y_{E_DC}) との間には、式 (5) の関係が成り立つ。

$$R_{E_DC} \exp(i \theta_{E_DC}) = X_{E_DC} + i Y_{E_DC} \quad (5)$$

ここで i は虚数単位である。

10

【0015】

本実施形態では、磁場測定部 182' は、交流磁気力測定部 1821 と、直流磁場測定部 1822 とを備えている。

交流磁気力測定部 1821 は、試料 S M P L とソフト磁性探針 112 との間に生じた交流磁気力を測定する。直流磁場測定部 1822 は、交流磁気力測定部 1821 により測定した交流磁気力から、交流磁場印加部 132 が印加する交流磁場の周波数に等しい周波数成分（図 3 では角周波数 ω_m ）を抽出することにより、時間変化しない直流磁場 H_{DC} S_{MPL} （具体的には、試料 S M P L から発生する直流磁場：磁場振幅 R_{H_DC} と位相 θ_{H_DC} との組、または同相信号 X_{H_DC} と直交信号 Y_{H_DC} との組）を測定することができる。

ここで、 $(R_{H_DC}, \theta_{H_DC})$ と (X_{H_DC}, Y_{H_DC}) との間には、式 (6) の関係が成り立つ。

20

$$R_{H_DC} \exp(i \theta_{H_DC}) = X_{H_DC} + i Y_{H_DC} \quad (6)$$

【0016】

[3]

図 4 は、本発明の電気力 / 磁気力顕微鏡の他の一の実施形態を示す全体図である。

上述した [2] の態様では、直流電場測定部 1812 および直流磁場測定部 1822 は、試料 S M P L から発生する時間変化しない直流電場および直流磁場を測定している。

【0017】

本実施形態の電気力 / 磁気力顕微鏡 1 では、試料 S M P L から発生する周期的に時間変化する交流電場と交流磁場とを同時に測定することができる。

30

図 4 の構成要素は、電場測定部 181'' および磁場測定部 182'' 以外は図 3 に記載の構成要素と概略同じである。

図 3 では、電場測定部 181' は交流電気力測定部 1811 と直流電場測定部 1812 とを有しているのに対し、本実施形態では図 4 に示すように、電場測定部 181'' は交流電気力測定部 1811 と交流電場測定部 1813 とを有している。

また、図 3 では、磁場測定部 182' は交流磁気力測定部 1821 と直流磁場測定部 1822 とを有しているのに対し、本実施形態では図 4 に示すように、磁場測定部 182'' は交流磁気力測定部 1821 と交流磁場測定部 1823 とを有している。

【0018】

図 4 において、交流電場測定部 1813 および交流磁場測定部 1823 は、試料 S M P L から発生する周期的に時間変化する交流電場 E_{AC} S_{MPL} （具体的には、電場振幅 R_{E_AC} と位相 θ_{E_AC} との組、または同相信号 X_{E_AC} と直交信号 Y_{E_AC} との組）および交流磁場 H_{AC} S_{MPL} （具体的には、磁場振幅 R_{H_AC} と位相 θ_{H_AC} との組、または同相信号 X_{H_AC} と直交信号 Y_{H_AC} との組）を測定することができる。

40

ここで、 $(R_{E_AC}, \theta_{E_AC})$ と (X_{E_AC}, Y_{E_AC}) との間には

$$R_{E_AC} \exp(i \theta_{E_AC}) = X_{E_AC} + i Y_{E_AC}$$

の関係が成り立ち、 $(R_{H_AC}, \theta_{H_AC})$ と (X_{H_AC}, Y_{H_AC}) との間には

$$R_{H_AC} \exp(i \theta_{H_AC}) = X_{H_AC} + i Y_{H_AC}$$

の関係が成り立つ。

これらの測定量には、通常、高周波成分が含まれる。

50

【 0 0 1 9 】

交流電場測定部 1 8 1 3 は、交流電気力測定部 1 8 1 1 により測定した交流電気力から、交流電場印加部 1 3 1 が印加する交流電場の周波数の N 倍 (N は 2 以上の整数であり、好ましくは 2、3 等である。) の周波数成分 (角周波数 $N \omega_e$) を抽出することにより、周期的に時間変化する交流電場を測定することができる。

また、交流磁場測定部 1 8 2 3 は、交流磁気力測定部 1 8 2 1 により測定した交流磁気力から、交流磁場印加部 1 3 2 が印加する交流磁場の周波数の N 倍 (N は 2 以上の整数であり、好ましくは 2、3 等である。) の周波数成分 (角周波数 $N \omega_m$) を抽出することにより、周期的に時間変化する交流電場を測定することができる。

【 0 0 2 0 】

〔 4 〕

図 5 は、本発明の電気力 / 磁気力顕微鏡のさらに他の一の実施形態を示す全体図である。

本実施形態の電気力 / 磁気力顕微鏡 1 では、試料から発生する時間変化しない直流電場と直流磁場、および試料から発生する周期的に時間変化する交流電場と交流磁場を同時に測定することができる。

図 5 の構成要素は、電場測定部 1 8 1 ' ' ' および電場測定部 1 8 2 ' ' ' 以外は図 3 または図 4 に記載の構成要素と概略同じである。

図 3 における電場測定部 1 8 1 ' は交流電気力測定部 1 8 1 1 と直流電場測定部 1 8 1 2 とを有しており、図 4 における電場測定部 1 8 1 ' ' は交流電気力測定部 1 8 1 1 と交流電場測定部 1 8 1 3 とを有しているのに対し、本実施形態では図 5 に示すように、電場測定部 1 8 1 ' ' ' は交流電気力測定部 1 8 1 1 と直流電場測定部 1 8 1 2 と交流電場測定部 1 8 1 3 とを有している。

また、図 3 における磁場測定部 1 8 2 ' は交流磁気力測定部 1 8 2 1 と直流磁場測定部 1 8 2 2 とを有しており、図 4 における磁場測定部 1 8 2 ' ' は交流磁気力測定部 1 8 2 1 と交流磁場測定部 1 8 2 3 とを有しているのに対し、本実施形態では図 5 に示すように、磁場測定部 1 8 2 ' ' ' は、交流磁気力測定部 1 8 2 1 と直流磁場測定部 1 8 2 2 と交流磁場測定部 1 8 2 3 とを有している。

【 0 0 2 1 】

図 5 において、直流電場測定部 1 8 1 2 及び直流磁場測定部 1 8 2 2 は、試料 S M P L から発生する時間変化しない直流電場 E_{DC} (電場振幅 R_{E_DC} と位相 θ_{E_DC} との組、または同相信号 X_{E_DC} と直交信号 Y_{E_DC} との組) および直流磁場 H_{DC} (磁場振幅 R_{H_DC} と位相 θ_{H_DC} との組、または同相信号 X_{H_DC} と直交信号 Y_{H_DC} との組) を測定することができる。

ここで、 $(R_{E_DC}, \theta_{E_DC})$ と (X_{E_DC}, Y_{E_DC}) との間には、次式が成り立つ。

$$R_{E_DC} e^{i \theta_{E_DC}} = X_{E_DC} + i Y_{E_DC}$$

また、 $(R_{H_DC}, \theta_{H_DC})$ と (X_{H_DC}, Y_{H_DC}) との間には次式が成り立つ。

$$R_{H_DC} e^{i \theta_{H_DC}} = X_{H_DC} + i Y_{H_DC}$$

【 0 0 2 2 】

また、図 5 において、交流電場測定部 1 8 1 3 及び交流磁場測定部 1 8 2 3 は、試料 S M P L から発生する周期的に時間変化する交流電場 E_{AC} (電場振幅 R_{E_AC} と位相 θ_{E_AC} との組、または同相信号 X_{E_AC} と直交信号 Y_{E_AC} との組) および交流磁場 H_{AC} (磁場振幅 R_{H_AC} と位相 θ_{H_AC} との組、または同相信号 X_{H_AC} と直交信号 Y_{H_AC} との組) を測定することができる。

ここで、 $(R_{E_AC}, \theta_{E_AC})$ と (X_{E_AC}, Y_{E_AC}) との間には、次式が成り立つ。

$$R_{E_AC} e^{i \theta_{E_AC}} = X_{E_AC} + i Y_{E_AC}$$

また、 $(R_{H_AC}, \theta_{H_AC})$ と (X_{H_AC}, Y_{H_AC}) との間には、次式が成り立つ。

$$R_{H_AC} e^{i \theta_{H_AC}} = X_{H_AC} + i Y_{H_AC}$$

これらの測定量には、通常、高周波成分が含まれる。

【 0 0 2 3 】

10

20

30

40

50

〔 5 〕

上記〔 1 〕～〔 4 〕の実施形態において、交流電場印加部が試料に印加する交流電場の周波数 f_e と、交流磁場印加部が試料に印加する交流磁場の周波数 f_m とが、1 以上のいかなる整数 n についても $f_m = n \cdot f_e$ かつ $f_e = n \cdot f_m$ を満たすことが好ましい。

【 0 0 2 4 〕

〔 6 〕

本発明の電場 / 磁場同時測定方法では、励振している探針部材の先端に設けたソフト磁性探針（表面に導電性のソフト磁性体薄膜が形成された探針チップからなる）に、周波数が異なる交流電場と交流磁場とを印加し、ソフト磁性探針により試料を走査し、ソフト磁性探針の振動を検出することで、試料から発生する電場と磁場とを同時に測定することができる。

10

本発明の電場 / 磁場同時測定方法は、以下のステップを含む。

探針励振ステップ：探針励振部により、探針部材を励振させる。

交流電場 / 交流磁場印加ステップ：交流電場印加部により交流電場を発生し、当該交流電場をソフト磁性探針に印加するとともに、交流磁場印加部により交流磁場を発生し、当該交流磁場をソフト磁性探針に印加する。

探針振動検出ステップ：探針振動検出部により、探針部材の振動を検出し振動検出信号を生成する。

探針走査ステップ：探針走査部により、探針部材を空間駆動し、ソフト磁性探針により試料を走査する。

20

復調ステップ：復調部により、振動検出信号を用いて試料とソフト磁性探針との間に生じた交流電気力および交流磁気力を復調（抽出）する。

電場測定ステップ：電場測定部により、復調ステップにおいて復調された交流電気力を用いて、試料から発生する電場を測定する。

磁場測定ステップ：磁場測定部により、復調ステップにおいて復調された交流磁気力を用いて、試料から発生する磁場を測定する。

【 0 0 2 5 〕

〔 7 〕

本発明の電場 / 磁場同時測定方法の一の実施形態では、電場測定ステップは、交流電気力測定ステップと直流電場測定ステップとを含み、磁場測定ステップは、交流磁気力測定ステップと直流磁場測定ステップとを含む。

30

交流電気力測定ステップ：交流電気力測定部により、試料とソフト磁性探針との間に生じた交流電気力を測定する。

直流電場測定ステップ：直流電場測定部により、交流電気力測定ステップにおいて測定した交流電気力から、交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、時間変化しない直流電場を測定する。

交流磁気力測定ステップ：交流磁気力測定部により、試料とソフト磁性探針との間に生じた交流磁気力を測定する。

直流磁場測定ステップ：直流磁場測定部により、交流磁気力測定ステップにおいて測定した交流磁気力から、交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、時間変化しない直流磁場を測定する。

40

【 0 0 2 6 〕

〔 8 〕

本発明の電場 / 磁場同時測定方法の他の一の実施形態では、電場測定ステップは、交流電気力測定ステップと交流電場測定ステップとを含み、磁場測定ステップは、交流磁気力測定ステップと交流磁場測定ステップとを含む。

交流電気力測定ステップ：交流電気力測定部により、試料とソフト磁性探針との間に生じた交流電気力を測定する。

交流電場測定ステップ：交流電場測定部により、交流電気力測定ステップにおいて測定した交流電気力から、交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数の N 倍

50

(N は2以上の整数であり、好ましくは2、3等である。)の周波数成分(角周波数 $N\omega$)を抽出することにより、周期的に時間変化する交流電場を測定する。

交流磁気力測定ステップ：交流磁気力測定部により、試料とソフト磁性探針との間に生じた交流磁気力を測定する。

交流磁場測定ステップ：交流磁場測定部により、交流電気力測定ステップにおいて測定した交流磁気力から、交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数の N 倍(N は2以上の整数であり、好ましくは2、3等である。)の周波数成分(角周波数 $N\omega$)を抽出することにより、周期的に時間変化する交流磁場を測定する。

【0027】

〔9〕

本発明の電場/磁場同時測定方法のさらに他の一の実施形態では、電場測定ステップは、交流電気力測定ステップと直流電場測定ステップと交流電場測定ステップとを含み、磁場測定ステップは、交流磁気力測定ステップと直流磁場測定ステップと交流磁場測定ステップを含む。

交流電気力測定ステップ：交流電気力測定部により、試料とソフト磁性探針との間に生じた交流電気力を測定する。

直流電場測定ステップ：直流電場測定部により、交流電気力測定ステップにおいて測定した交流電気力から、交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、時間変化しない直流電場を測定する。

交流電場測定ステップ：交流電場測定部により、交流電気力測定ステップにおいて測定した交流電気力から、交流電場印加ステップにおいて印加された交流電場の周波数の N 倍(N は2以上の整数であり、好ましくは2、3等である。)の周波数成分(角周波数 $N\omega$)を抽出することにより、周期的に時間変化する交流電場を測定する。

交流磁気力測定ステップ：交流磁気力測定部により、試料とソフト磁性探針との間に生じた交流磁気力を測定する。

直流磁場測定ステップ：直流磁場測定部により、交流磁気力測定ステップにおいて測定した交流磁気力から、交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数に等しい周波数成分を抽出することにより、時間変化しない直流磁場を測定する。

交流磁場測定ステップ：交流磁場測定部により、交流電気力測定ステップにおいて測定した交流磁気力から、交流磁場印加ステップにおいて印加された交流磁場の周波数の N 倍(N は2以上の整数であり、好ましくは2、3等である。)の周波数成分(角周波数 $N\omega$)を抽出することにより、周期的に時間変化する交流磁場を測定する。

【0028】

〔10〕

上記〔6〕～〔9〕の実施形態において、交流電場印加部が試料に印加する交流電場の周波数 ω_e と、交流磁場印加部が試料に印加する交流磁場の周波数 ω_m とが、1以上のいかなる整数 n についても $\omega_m = n\omega_e$ かつ $\omega_e = n\omega_m$ をみたすことが好ましい。

【発明の効果】

【0029】

本発明によれば、試料の表面の電場と磁場とを同時に測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0030】

【図1】図1(A)は、直流磁場を測定するための磁気力顕微鏡(MFM)を示す図である。図1(B)は、ソフト磁性体のM-H特性の例を示す図である。

【図2】図2は、本発明の電気力/磁気力顕微鏡の基本的な実施形態を示す全体図である。

【図3】図3は、本発明の電気力/磁気力顕微鏡の一の実施形態を示す全体図である。

【図4】図4は、本発明の電気力/磁気力顕微鏡の他の一の実施形態を示す全体図である。

【図5】図5は、本発明の電気力/磁気力顕微鏡のさらに他の一の実施形態を示す全体図

10

20

30

40

50

である。

【図6】図6は本発明の電気力/磁気力顕微鏡の一実施形態を示す説明図である。

【図7】図7は、外部から印加する交流電場および交流磁場と、試料から発生する電場および磁場との関係を示す図である。

【図8】図8は、図6に示した電気力/磁気力顕微鏡を用いた電場/磁場同時測定方法の処理を示すフローチャートである。

【図9】図9は、測定結果出力部により出力された画像を示す図である。図9(A)は直流電場測定部の振幅出力から作成した画像である。図9(B)は直流電場測定部の位相角出力から作成した画像である。図9(C)は直流磁場測定部の振幅出力から作成した画像である。図9(D)は直流磁場測定部の位相角出力から作成した画像である。 10

図9(E)は図9(A)の切断ラインL1における直流電場測定部の振幅出力信号を示す図である。図9(F)は図9(B)の切断ラインL2における直流電場測定部の位相角出力信号を示す図である。図9(G)は図9(C)の切断ラインL3における直流磁場測定部の振幅出力信号を示す図である。図9(H)は図9(D)の切断ラインL4における直流磁場測定部の位相角出力信号を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0031】

《発明の原理》

本発明の原理を以下に示す。

交流電場(振幅: E_{AC})と交流磁場(振幅: H_{AC})とを、導電性を有するソフト磁性探針(探針チップ)に、同時に外部から印加する。 20

これにより、探針チップの先端に、交流変化する電荷(振幅: q_e^{ac})と交流変化する磁極(振幅: q_m^{ac})が発生する。

【0032】

これらの外部から印加する交流電場と交流磁場により、試料の直流電場の発生源である電荷あるいは電気分極、および試料の直流磁場の発生源である電流あるいは磁気モーメントが変化しない場合には、試料からは直流電場および直流磁場が発生し、交流電場および交流磁場は発生しない。この場合、探針装置(カンチレバー)のパネ定数は、みかけ上変化し、式(7)で与えられる。以下、 $k(t)$ を「みかけ上のパネ定数」と称する。 30

【0033】

$$k(t) = \{ q_e^{dc} + q_e^{ac} \cos(\omega_e t) \} \cdot [(E_{DC_{SMPL}} / z) + (E_{AC} / z) \cos(\omega_e t)] + \{ q_m^{dc} + q_m^{ac} \cos(\omega_e t) \} \cdot [(H_{DC_{SMPL}} / z) + (H_{AC} / z) \cos(\omega_m t)] \quad (7)$$

$E_{DC_{SMPL}}$: 試料から発生する直流電場

E_{AC} : 探針チップに印加する交流電場の振幅

ω_e : 交流電場 E_{AC} の角周波数

q_e^{dc} : 試料から発生する直流電場 $E_{DC_{SMPL}}$ により探針チップに生じた直流電荷 40

q_e^{ac} : 交流電場 E_{AC} により探針チップに生じた交流電荷の振幅

$H_{DC_{SMPL}}$: 試料から発生する直流磁場

H_{AC} : 探針チップに印加する交流磁場の振幅

ω_e : 交流磁場 H_{AC} の角周波数

q_m^{dc} : 試料から発生する直流磁場 $H_{DC_{SMPL}}$ により探針チップに生じた直流磁極

q_m^{ac} : 交流磁場 H_{AC} により探針チップに生じた交流磁極の振幅

【0034】

外部から印加する交流電場 E_{AC} および交流磁場 H_{AC} が空間的に一様な場合、次の関係が成立する。

$$| E_{AC} / z | = 1$$

10

20

30

40

50

および、

$$| H_A C / z | = 1$$

このとき、探針チップの見かけ上のバネ定数 $k(t)$ は、式(8)で与えられる。

$$k(t) = q_e^{ac} (E_D C_{SMPL} / z) \cos(e t) + q_m^{ac} (H_D C_{SMPL} / z) \cos(m t) \quad (8)$$

【0035】

したがって、 $k(t)$ の e 成分(すなわち式(6)の第1項)を検出すれば、 $(E_D C_{SMPL} / z)$ (すなわち、試料の直流電場の勾配)を求めることができる。

また、 $k(t)$ の m 成分(すなわち式(6)の第2項)を検出すれば、 $(H_D C_{SMPL} / z)$ (すなわち、試料の直流磁場の勾配)を求めることができる。

10

【0036】

外部から印加する交流電場と交流磁場により、試料の直流電場の発生源である電荷あるいは電気分極、および試料の直流磁場の発生源である電流あるいは磁気モーメントが変化する場合には、試料からも交流電場と交流磁場が発生する。

以下の説明には、試料から発生する交流電場および交流磁場が、試料に印加する交流電場および交流磁場に対して飽和等で非線形に変化する場合も含まれる。

この場合、試料から発生する交流電場および交流磁場はフーリエ級数で式(9)のように展開できる。

$$\begin{aligned} E_A C_{SMPL}(t) &= E_A C_{SMPL}^1 \cos(e t) \\ &+ E_A C_{SMPL}^2 \cos(2 e t) \\ &+ E_A C_{SMPL}^3 \cos(3 e t) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

20

$$\begin{aligned} H_A C_{SMPL}(t) &= H_A C_{SMPL}^1 \cos(e t) \\ &+ H_A C_{SMPL}^2 \cos(2 e t) \\ &+ H_A C_{SMPL}^3 \cos(3 e t) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

(9)

【0037】

30

このとき、探針チップの見かけ上のバネ定数 $k(t)$ は、式(10)で与えられる。

$$\begin{aligned} k(t) &= \{ q_e^{dc} + q_e^{ac} \cos(e t) \} \\ &\cdot [(E_D C_{SMPL} / z) \\ &+ (E_A C / z) \cos(e t) \\ &+ (E_A C_{SMPL}^1 / z) \cos(e t) \\ &+ (E_A C_{SMPL}^2 / z) \cos(2 e t) \\ &+ (E_A C_{SMPL}^3 / z) \cos(3 e t) \\ &+ \dots] \\ &+ \{ q_m^{ac} + q_m^{ac} \cos(m t) \} \\ &\cdot [(H_D C_{SMPL} / z) \\ &+ (H_A C / z) \cos(m t) \\ &+ (H_A C_{SMPL}^1 / z) \cos(m t) \\ &+ (H_A C_{SMPL}^2 / z) \cos(2 m t) \\ &+ (H_A C_{SMPL}^3 / z) \cos(3 m t) \\ &+ \dots] \end{aligned} \quad (10)$$

40

【0038】

外部から印加する交流電場 $E_A C$ および交流磁場 $H_A C$ が空間的に一様な場合、式(11a)及び(11b)の関係が成立する。

$$| E_A C / z | = 1 \quad (11a)$$

$$| H_A C / z | = 1 \quad (11b)$$

50

このとき、探針チップの見かけ上のバネ定数 $k(t)$ は、式(12)で与えられる。

$k(t)$

$$\begin{aligned}
 & \{ q_e^{ac} (E_{DC} C_{SMPL} / z) \\
 & + q_e^{dc} (E_{AC} C_{SMPL}^1 / z) \\
 & + (q_e^{ac} / 2) (E_{AC} C_{SMPL}^1 / z) \} \cos(e t) \\
 & + \{ (q_e^{ac} / 2) (E_{AC} C_{SMPL}^1 / z) \\
 & + q_e^{dc} (E_{AC} C_{SMPL}^2 / z) \\
 & + (q_e^{ac} / 2) (E_{AC} C_{SMPL}^3 / z) \} \cos(2 e t) \\
 & + \{ (q_e^{ac} / 2) (E_{AC} C_{SMPL}^2 / z) \\
 & + (q_e^{dc} / 2) (E_{AC} C_{SMPL}^3 / z) \} \cos(3 e t) \\
 & + \{ q_m^{ac} (H_{DC} C_{SMPL} / z) \\
 & + q_m^{dc} (H_{AC} C_{SMPL}^1 / z) \\
 & + (q_m^{ac} / 2) (H_{AC} C_{SMPL}^1 / z) \} \cos(m t) \\
 & + \{ (q_m^{ac} / 2) (H_{AC} C_{SMPL}^1 / z) \\
 & + q_m^{dc} (H_{AC} C_{SMPL}^2 / z) \\
 & + (q_m^{ac} / 2) (H_{AC} C_{SMPL}^3 / z) \} \cos(2 m t) \\
 & + \{ (q_m^{ac} / 2) (H_{AC} C_{SMPL}^2 / z) \\
 & + (q_m^{dc} / 2) (H_{AC} C_{SMPL}^3 / z) \} \cos(3 m t) \\
 & + \dots
 \end{aligned}$$

10

(12)

20

ここで、電場と磁場とを分離して検出するために、印加する交流磁場の周波数 m および印加する交流電場の周波数 e には、異なる周波数を選択する。好ましくは、印加する交流磁場の周波数 m は印加する交流電場の周波数 e の整数倍ではなく、且つ、印加する交流電場の周波数 e は印加する交流磁場の周波数 m の整数倍ではないように、印加する交流磁場の周波数 m および印加する交流電場の周波数 e を選ぶ。すなわち、 m および e を、1以上のいかなる整数 n についても $m = n e$ かつ $n = m / e$ を満たすように選ぶ。

【0039】

以上より、外部から印加する交流電場と交流磁場により、試料から交流電場と交流磁場が発生する場合には、 $k(t)$ に、 $2 e$ 成分以上の高次項、および $2 m$ 成分以上の高次項が発生することがわかる。

30

したがって、 $k(t)$ の $2 e$ 成分以上の高次項、および $2 m$ 成分以上の高次項の存在により、試料から発生する交流電場の勾配および交流磁場の勾配の大きさや線形性を評価することができる。なお実際上は、 $k(t)$ の $N e$ 成分および $N m$ 成分（いずれも N は2以上の整数）の強度は、次数 N が增大するにつれて急激に減少する。

ただし、試料が強誘電性・強磁性共存物質等の、電気分極と磁気モーメントが相互作用により強く結合している物質の場合には、交流電場（角周波数 e ）による電気分極の変化と交流磁場（角周波数 m ）による磁気モーメントの変化が競合し、これらの内、相互作用が強い方の角周波数で、電気分極と磁気モーメントが変化することになる。

【0040】

40

図6は本発明の電気力/磁気力顕微鏡の一実施形態を示す説明図である。

図6において、電気力/磁気力顕微鏡1は、探針部材11、探針励振部12、交流電場印加部131、交流磁場印加部132、交流電場駆動部141、交流磁場駆動部142、探針振動検出部15、探針走査部16、復調部17、電場測定部181、磁場測定部182および測定結果出力部19とを有している。

なお、本実施形態では、探針部材11、試料SMPL、交流電場印加部131、交流磁場印加部132等は、説明の便宜上、実際のサイズとは異なるように記載してある。

【0041】

探針部材11は、先端にソフト磁性探針112を有している。ソフト磁性探針112は、導電性を有するソフト磁性体薄膜が表面に形成された探針チップである。

50

探針部材 1 1 は、シリコンにより構成されたカンチレバーを母材として作製され、アーム 1 1 1 の先端に、表面にソフト磁性体薄膜（後述する、図 7 の符号 1 1 3 参照）が形成された円錐形の探針チップ（ソフト磁性探針 1 1 2）が備えられている。ソフト磁性体薄膜 1 1 3 を構成するソフト磁性体としては、たとえば、Fe - Co、Fe - Co - B、パーマロイ（Ni - Fe）、Co - Zr - Nb 等を好ましく採用できる。

探針励振部 1 2 は、探針部材 1 1 を励振させることができる。探針励振部 1 2 は、交流電源 1 2 1 と、探針部材 1 1 に振動を与える圧電素子 1 2 2 とからなる。

【 0 0 4 2 】

交流電場印加部 1 3 1 は、交流電場 E_{AC} を発生し、交流電場 E_{AC} がソフト磁性探針 1 1 2 に印加される。ソフト磁性探針 1 1 2 は導電性を有するので、静電誘導によりソフト磁性探針 1 1 2 の表面（ソフト磁性体薄膜 1 1 3）に交流電荷が発生する。

交流磁場印加部 1 3 2 は、交流磁場 H_{AC} を発生し、交流磁場 H_{AC} がソフト磁性探針 1 1 2 に印加される。ソフト磁性探針 1 1 2 はソフト磁性を有するので、ソフト磁性探針 1 1 2 の表面に交流磁極が発生する。

交流電場印加部 1 3 1 は、板状または薄膜状の電極であり、試料台を兼ねることもできる。電極は、導電性の材料（Al, Au, Pt, Ta 等の非磁性体金属、Ni, Co, Fe, パーマロイ等の高透磁率を有する合金、等の強磁性体金属、あるいはこれらの積層体）から構成することができる。なお、試料 S M P L が、導電性を有する場合には、試料 S M P L 自体を電極とすることができる。また、試料 S M P L が、導電性の下地層を有する場合には、下地層を電極とすることができる。通常、導電性を有するソフト磁性探針 1 1 2 は接地されており（後述する図 6 の「GND」参照）、交流電場印加部 1 3 1 とソフト磁性探針 1 1 2 間に交流電場が発生する。

交流磁場印加部 1 3 2 は、交流電流 AC により駆動される交流コイルからなり、交流電場印加部 1 3 1 は、交流磁場印加部 1 3 2 の中央に配置することができる。

【 0 0 4 3 】

交流電場駆動部 1 4 1 は、角周波数 ω_e の駆動電圧を出力する交流電源であり交流電場印加部 1 3 1 を駆動する。

交流磁場駆動部 1 4 2 は、角周波数 ω_m の駆動電流を出力する交流電源であり交流磁場印加部 1 3 2 を駆動する。

ω_m および ω_e は互いに異なる周波数である。 ω_m および ω_e は、いかなる自然数 n ($n \geq 1$) についても $\omega_m = n \omega_e$ かつ $\omega_e = n \omega_m$ を満たしていることが好ましく、これにより試料から発生する直流磁場の測定に際して電場由来の成分を分離して測定することができ、且つ、試料から発生する直流電場の測定に際して磁場由来の成分を分離して測定することができる。

【 0 0 4 4 】

図 7 に、交流電場駆動部 1 4 1 が発生する交流電場 E_{AC} と、交流磁場駆動部 1 4 2 が発生する交流磁場 H_{AC} と、試料 S M P L から発生する電場（図 7 の $E_{SMP L}$ 参照）と、試料 S M P L から発生する磁場（図 7 の $H_{SMP L}$ 参照）との関係を示す。

【 0 0 4 5 】

探針振動検出部 1 5 は、探針部材 1 1 の振動（すなわち、ソフト磁性探針 1 1 2 の振動）を検出し振動検出信号 V I B を生成する。

探針振動検出部 1 5 は、レーザ（L S R）1 5 1 とフォトディテクタ（P D）1 5 2 とを有している。ソフト磁性探針 1 1 2 の先端上面には反射ミラーが形成されている。L S R 1 5 1 から出射されたレーザビーム L B は探針部材 1 1 の先端上面で反射されて P D 1 5 2 に入射される。

探針走査部 1 6 は、ソフト磁性探針 1 1 2 が試料 S M P L の表面を走査できるように、探針部材 1 1 を空間駆動（X Y 駆動）する。図 6 では、試料 S M P L がセットされたステージ S T G を移動させることで、ソフト磁性探針 1 1 2 により試料 S M P L の表面を走査する例を示しているが、ソフト磁性探針 1 1 2 を試料 S M P L に対して相対的に移動させることで、ソフト磁性探針 1 1 2 により試料 S M P L の上面を走査することもできる。

【 0 0 4 6 】

復調部 1 7 は、探針振動検出部 1 5 により検出された振動検出信号 V I B を取得し復調信号を出力する。

本実施形態では、振動検出信号 V I B の変調成分の分離には P L L (P h a s e L o c k e d L o o p) 回路が使用されている。図 6 では、復調部 1 7 の出力信号を E F / H F で示す。

【 0 0 4 7 】

電場測定部 1 8 1 は、復調部 1 7 からの復調信号に基づき、試料 S M P L の表面の電場勾配 (電気特性) を測定する。本実施形態では電場測定部 1 8 1 はロックインアンプであり、復調信号の強度 R_E および位相 ϕ_E の組、または復調信号の同相信号 X_E および直交信号 Y_E の組を検出することで、試料 S M P L の表面の電場勾配 (電気特性) を測定することができる。

10

磁場測定部 1 8 2 は、復調部 1 7 からの復調信号に基づき、試料 S M P L の表面の磁場勾配 (磁気特性) を測定する。本実施形態では磁場測定部 1 8 2 はロックインアンプであり、復調信号の強度 R_H および位相 ϕ_H の組、または復調信号の同相信号 X_H および直交信号 Y_H の組を検出することで、試料 S M P L の表面の磁場勾配 (磁気特性) を測定することができる。

【 0 0 4 8 】

測定結果出力部 1 9 は、電場測定部 1 8 1 により測定された電場勾配 (電気特性) を画像化することができ、磁場測定部 1 8 2 により測定された磁場勾配 (磁気特性) を画像化

20

【 0 0 4 9 】

以上のように、本実施形態では、電気力 / 磁気力顕微鏡 1 は、励振しているソフト磁性探針 1 1 2 に、周波数が異なる交流電場 E_{AC} と交流磁場 H_{AC} とを印加し、ソフト磁性探針 1 1 2 により試料 S M P L の表面を走査し、ソフト磁性探針 1 1 2 の振動を検出する。

試料 S M P L が、交流電場 E_{AC} と交流磁場 H_{AC} の印加により、交流電場および交流磁場を発生しない場合には、試料 S M P L の表面の直流電場 $E_{DC_{SMP L}}$ および直流磁場 $H_{DC_{SMP L}}$ を同時に測定することができる。

また、試料 S M P L が、交流電場 E_{AC} と交流磁場 H_{AC} の印加により、交流電場および交流磁場を発生する場合には、試料 S M P L から発生する交流電場 $E_{AC_{SMP L}}$ の勾配および交流磁場 $H_{AC_{SMP L}}$ の勾配の、大きさや線形性も評価することができる。

30

【 0 0 5 0 】

図 8 は、図 6 に示した電気力 / 磁気力顕微鏡 1 を用いた本発明の電場・磁場同時測定方法の処理を示すフローチャートである。

【 0 0 5 1 】

探針励振ステップ S 1 1 0 : 探針励振部 1 2 により、アーム 1 1 1 の先端に設けられた導電性を有するソフト磁性探針 1 1 2 (導電性を有するソフト磁性体薄膜が表面に形成された探針チップ) を励振させる。

【 0 0 5 2 】

交流電場 / 交流磁場印加ステップ S 1 2 0 : 交流電場印加部 1 3 1 および交流磁場印加部 1 3 2 により、周波数が異なる交流電場 E_{AC} と交流磁場 H_{AC} とをソフト磁性探針 1 1 2 に印加し、探針部材 1 1 の振動 (ソフト磁性探針 1 1 2 の振動) に、変調を生じさせる。

40

【 0 0 5 3 】

探針振動検出ステップ S 1 3 0 : 探針部材 1 1 の振動 (ソフト磁性探針 1 1 2 の振動) を検出し振動検出信号 V I B を生成する。

【 0 0 5 4 】

復調ステップ S 1 4 0 : 探針振動検出ステップ S 1 3 0 において検出された振動検出信号 V I B を用いて、試料 S M P L とソフト磁性探針 1 1 2 との間に生じた交流電気力お

50

よび交流磁気力を復調（抽出）する。

【 0 0 5 5 】

電場測定ステップ 1 5 1 : 復調ステップ S 1 4 0 において復調した信号（復調信号）に基づき、試料 S M P L の表面の電場勾配（電気特性）を測定する。

磁場測定ステップ 1 5 2 : 復調ステップ S 1 4 0 において復調した信号（復調信号）に基づき、試料 S M P L の表面の磁場勾配（磁気特性）を測定する。

なお、電場測定ステップ 1 5 1 は、交流電気力測定ステップと直流電場測定ステップとを含むことができ、磁場測定ステップ 1 5 2 は、交流磁気力測定ステップと直流磁場測定ステップとを含むことができる。

また、電場測定ステップ 1 5 1 は、交流電気力測定ステップと交流電場測定ステップとを含むことができ、磁場測定ステップ 1 5 2 は、交流磁気力測定ステップと交流磁場測定ステップとを含むことができる。

さらに、電場測定ステップ 1 5 1 は、交流電気力測定ステップと直流電場測定ステップと交流電場測定ステップとを含むことができ、磁場測定ステップ 1 5 2 は、交流磁気力測定ステップと直流磁場測定ステップと交流磁場測定ステップとを含むことができる。

【 0 0 5 6 】

データ蓄積ステップ 1 6 0 : 電場測定ステップ 1 5 1 および磁場測定ステップ 1 5 2 において測定されたデータを、測定結果出力部 1 9 に含まれる記憶装置 1 9 1 に記憶する。

【 0 0 5 7 】

走査続行判断ステップ 1 7 0 : S 1 3 0 ~ S 1 6 0 の処理の後、試料 S M P L の表面の他の場所について、電場勾配（電気特性）および磁場勾配（磁気特性）の測定を行うかを判断する（すなわち、走査を続行するか終了するかを判断する。）。他の場所について測定を行う場合には、処理を S 1 3 0 に戻し、測定を終了する場合には、処理を S 1 8 0 に進める。

このようにして、ソフト磁性探針 1 1 2 を走査（X Y 駆動）して、多数の観察点（観察場所）について電場勾配（電気特性）および磁場勾配（磁気特性）の測定が行われる。

【 0 0 5 8 】

測定結果出力ステップ 1 8 0 : 測定結果出力部 1 9 により、測定された電場勾配（電気特性）および磁場勾配（磁気特性）を画像化して出力する。

【 0 0 5 9 】

以上のようにして、励振しているソフト磁性探針 1 1 2 により試料 S M P L の表面を走査し、ソフト磁性探針 1 1 2 の振動を検出することで、試料 S M P L の表面の直流電場 E_{DC_SMPL} 及び直流磁場 H_{DC_SMPL} を同時に測定すること、交流電場 E_{AC_SMPL} 及び交流磁場 H_{AC_SMPL} を同時に測定すること、または、直流電場 E_{DC_SMPL} 、直流磁場 H_{DC_SMPL} 、交流電場 E_{AC_SMPL} 、及び交流磁場 H_{AC_SMPL} を同時に測定することができる。

【 0 0 6 0 】

本発明に関する上記説明では、試料 S M P L に印加する外部磁場が交流磁場 H_{AC} である形態の電気力 / 磁気力顕微鏡 1、及びこれを用いた電場 / 磁場同時測定方法を例示したが、本発明は当該形態に限定されない。例えば、試料から発生する直流磁場によってソフト磁性探針の磁化が飽和するために磁場検出感度が低下し、磁場測定が困難になるような場合には、交流磁場だけでなく、試料から発生する直流磁場とは逆の方向を有する空間的に一様な直流磁場をソフト磁性探針に印加することで、ソフト磁性探針の磁化の飽和を防止する形態の電気力 / 磁気力顕微鏡および電場 / 磁場同時測定方法とすることも可能である。

【実施例】

【 0 0 6 1 】

以下の条件・構成で電気力 / 磁気力顕微鏡 1 により、本発明の効果の検証を行った。

試料 S M P L : SiO_2 基板上に、 $Ta/Pt/(Bi_{0.6}Ba_{0.4})FeO_3$ の薄膜を

10

20

30

40

50

形成した。T a / P t が交流電場印加部 1 3 1 として機能する。

本試料 S M P L は、外部からの交流電場および交流磁場の印加により、交流電場および交流磁場を発生させない。したがって本試料 S M P L においては、電場測定部は直流電場測定部として動作し、磁場測定部は直流磁場測定部として動作する。

ソフト磁性探針（探針チップ）1 1 2： C o Z r N b のソフト磁性体を、探針部材 1 1 の先端の円錐形の S i O₂ の表面に、膜厚 3 0 n m で形成することにより構成した。

バイアス電圧 V_{BIAS}：試料 S M P L の 3 × 3 μ m の領域に D C 1 2 V を与え、走査領域の中央の 1 × 1 μ m の領域に - 1 2 V を与えた。これにより、電場書き込みによって長方形領域に電氣的分域と磁氣的分域（磁区）を形成した。

交流電場 E_{AC}：周波数 3 0 0 H z (f_e)、ピーク間の電圧 0 . 2 V (振幅 0 . 2 V_{p-p}) の交流電場をソフト磁性探針 1 1 2 と交流電場印加部 1 3 1 との間に発生させた。

交流磁場 H_{AC}：周波数 7 8 H z (f_m)、強度 2 0 0 O e の交流磁場を交流磁場印加部 1 3 2 から発生させた。

なお、試料の電気分極モーメントおよび磁気モーメントは試料面に垂直方向（上向き、下向き）の成分を有する。

【 0 0 6 2 】

以上の条件・構成の下、探針走査部 1 6 により、3 × 3 μ m の領域を走査し、測定結果出力部 1 9 により画像を作成した。

図 9 に測定結果出力部 1 9 により出力された画像を示す。

測定結果出力部 1 9 による直流電場 E_{DC}_{SMP L} の出力結果を図 9 (A) , (B) に示す。図 9 (A) は電場測定部 1 8 1 の振幅出力から作成した画像であり、図 9 (B) は電場測定部 1 8 1 の位相角出力から作成した画像である。

測定結果出力部 1 9 による直流磁場 H_{DC}_{SMP L} の出力結果を図 9 (C) , (D) に示す。図 9 (C) は磁場測定部 1 8 2 の振幅出力から作成した画像であり、図 9 (D) は磁場測定部 1 8 2 の位相角出力から作成した画像である。

図 9 (E) は図 9 (A) の切断ライン L 1 における電場測定部 1 8 2 の振幅出力信号を示す図であり、図 9 (F) は図 9 (B) の切断ライン L 2 における電場測定部 1 8 1 の位相角出力信号を示す図である。

図 9 (G) は図 9 (C) の切断ライン L 3 における磁場測定部 1 8 2 の振幅出力信号を示す図であり、図 9 (H) は図 9 (D) の切断ライン L 4 における磁場測定部 1 8 2 の位相角出力信号を示す図である。

【 0 0 6 3 】

図 9 (A) , 図 9 (C) の強度像、および図 9 (E) , 図 9 (G) の振幅出力信号のラインプロファイルでは、書き込み領域の境界で信号強度が極小となっており、書き込み領域の境界における場の方向は概ね試料面に対して平行な方向になっていることがわかる。

図 9 (B) , 図 9 (D) の位相像、および図 9 (F) , 図 9 (H) の位相角出力信号のラインプロファイルでは、書き込み領域の境界で位相が反転（位相角が 1 8 0 度変化）しており、場の垂直成分が書き込み領域の境界で上向きから下向きに変化していることがわかる。

以上の結果より、本発明によれば、電場と磁場の同時イメージングが実現できていることがわかる。

【 符号の説明 】

【 0 0 6 4 】

- 1 電気力 / 磁気力顕微鏡
- 1 1 探針部材
- 1 1 1 アーム
- 1 1 2 ソフト磁性探針
- 1 1 3 ソフト磁性体薄膜

10

20

30

40

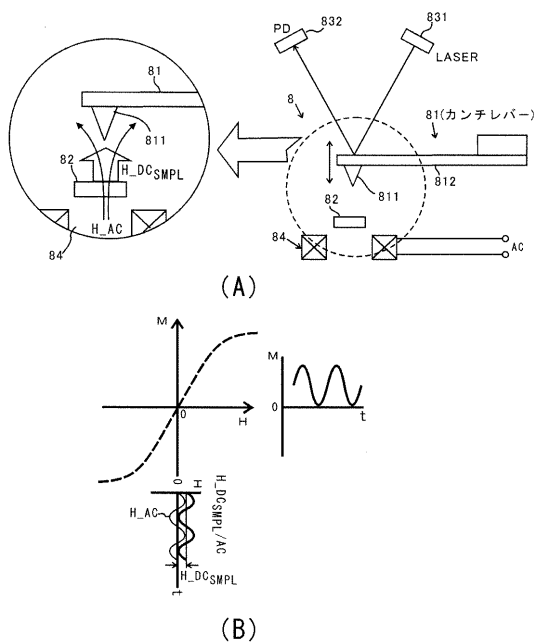
50

- 1 2 探針励振部
- 1 2 1 交流電源
- 1 2 2 圧電素子
- 1 3 1 交流電場印加部
- 1 3 2 交流磁場印加部
- 1 4 1 交流電場駆動部
- 1 4 2 交流磁場駆動部
- 1 5 探針振動検出部
- 1 5 1 LSR (レーザ)
- 1 5 2 PD (フォトディテクタ)
- 1 6 探針走査部
- 1 7 復調部
- 1 8 1 電場測定部
- 1 8 1 1 交流電気力測定部
- 1 8 1 2 直流電場測定部
- 1 8 1 3 交流電場測定部
- 1 8 2 磁場測定部
- 1 8 2 1 交流磁気力測定部
- 1 8 2 2 直流磁場測定部
- 1 8 2 3 交流磁場測定部
- 1 9 測定結果出力部
- 1 9 1 記憶装置
- 8 1 1 探針チップ
- 8 2 試料
- 8 4 コイル

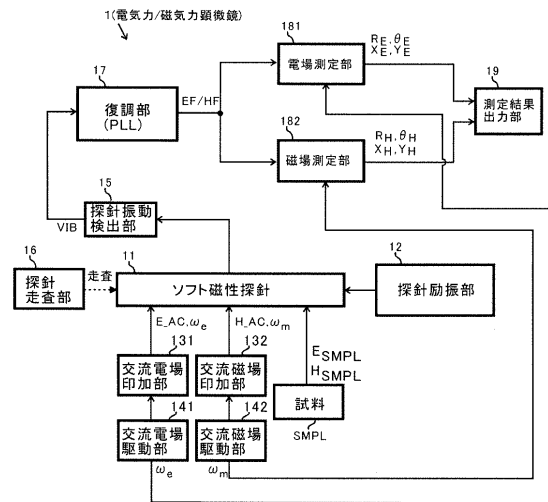
10

20

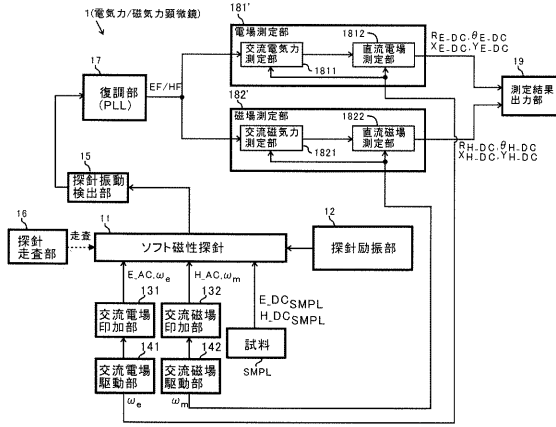
【図1】



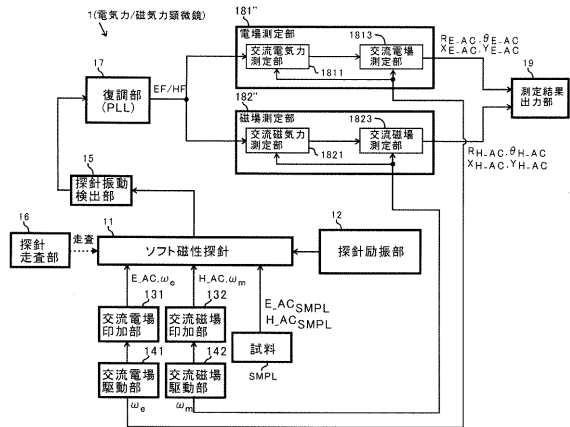
【図2】



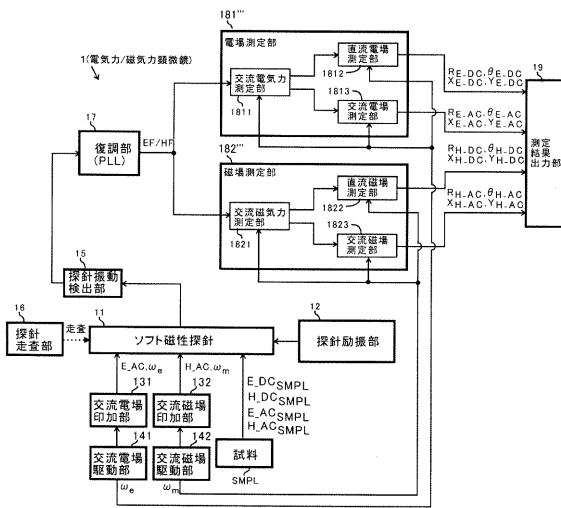
【図3】



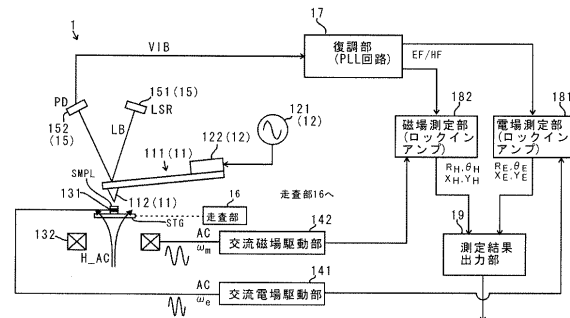
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

審査官 萩田 裕介

(56)参考文献 国際公開第2009/101991(WO, A1)
特開2012-53020(JP, A)
特開2013-213708(JP, A)
特開2013-213707(JP, A)
国際公開第2013/047538(WO, A1)
国際公開第2013/047537(WO, A1)
特許第3070216(JP, B2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01Q 10/00 - 90/00