(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2023年6月8日(08.06.2023)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2023/100224 A1

(51) 国際特許分類:
G01H 9/00 (2006.01)　*G02B 6/00* (2006.01)

(21) 国際出願番号：　PCT/JP2021/043799

(22) 国際出願日：　2021年11月30日(30.11.2021)

(25) 国際出願の言語：　日本語

(26) 国際公開の言語：　日本語

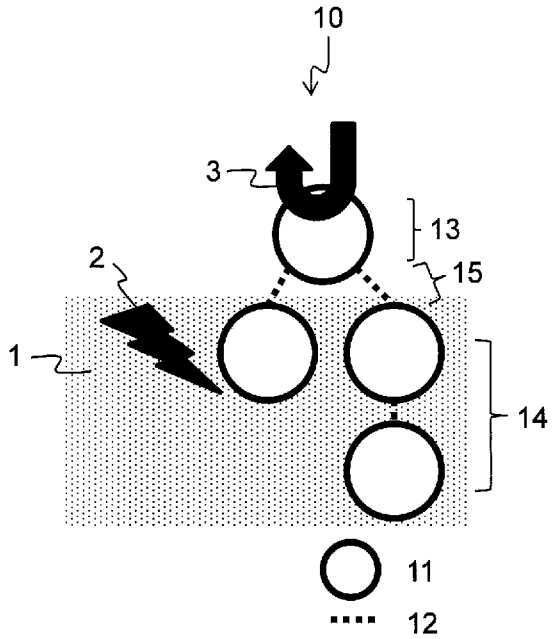
(71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (**NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION**) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目５番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 浅野 元紀(**ASANO, Motoki**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町３丁目９－１１ ＮＴＴ 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 酒井 洸児(**SAKAI, Koji**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町３丁目９－１１ ＮＴＴ 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 高橋 陸(**TAKAHASHI, Riku**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町３丁目９－１１ ＮＴＴ 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 山口 浩司(**YAMAGUCHI, Hiroshi**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町３丁目９－１１ ＮＴＴ 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 岡本 創(**OKAMOTO, Hajime**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町３丁目９－１１ ＮＴＴ 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 山川 茂樹, 外(**YAMAKAWA, Shigeki** et al.); 〒1006104 東京都千代田区永田町２丁目１１番１号 山王パークタワー４階 山川国際特許事務所内 Tokyo (JP).

(54) Title: OPTOMECHANICAL SENSOR, OPTOMECHANICAL SENSOR SYSTEM, AND METHOD FOR MANUFACTURING OPTOMECHANICAL SENSOR

(54) 発明の名称： 光機械センサ、光機械センサシステムおよび光機械センサの製造方法



(57) Abstract: An optomechanical sensor (10) according to the present invention comprises a plurality of mechanical vibrators (11) connected together, wherein one mechanical vibrator (13) of the plurality of mechanical vibrators has an optical resonator structure, and the one mechanical vibrator (13) and the other mechanical vibrators (14) resonate with one another. In the optomechanical sensor (10), only the other mechanical vibrators (14) may be placed within an object being measured, and a change in vibration characteristics of the other mechanical vibrators (14) may be detected through resonance between the one mechanical vibrator (13) and the other mechanical vibrators (14) using light incident on the one mechanical vibrator (13). This allows the optomechanical sensor according to the present invention to provide excellent

WO 2023/100224 A1

［続葉有］

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

detection sensitivity.

(57) 要約：本発明の光機械センサ（１０）は、連結される複数の機械振動子（１１）を備え、複数の機械振動子のうち、一の機械振動子（１３）が光共振器構造を有し、一の機械振動子（１３）と他の機械振動子（１４）が共振する。また、光機械センサ（１０）において、他の機械振動子（１４）のみが測定対象内に配置され、一の機械振動子（１３）に入射される光により、一の機械振動子（１３）と他の機械振動子（１４）との共振を介して、他の機械振動子（１４）の振動特性の変化が検出されてもよい。これにより、本発明の光機械センサは、優れた検出感度を提供できる。

明　細　書

発明の名称 ：

光機械センサ、光機械センサシステムおよび光機械センサの製造方法

技術分野

[0001]　本発明は、機械振動子を有する光機械センサ、光機械センサシステムおよび光機械センサの製造方法に関する。

背景技術

[0002]　光機械センサは、外部刺激または付着物による機械振動子の振動特性変化を光で読み取る。特に、機械振動子と一体化した光共振器によって振動特性の変化を読み取る光機械センサは、光閉じ込め効果による高い振動検出感度を示す（非特許文献１、２）。

先行技術文献

非特許文献

[0003] 非特許文献1：E. Gil-Santos et al., ”Optomechanical detection of vibration modes of a single bacterium”, Nat. Nanotech. 15, 469 (2020).
非特許文献2：E. Gil-Santos et al., ”High-frequency nano-optomechanical diskresonators in liquids”, Nat. Nanotech. 10, 810 (2015).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004]　しかしながら、通常の光機械センサは、外部刺激あるいは付着物に応答する検知部と光読み出しを行う受信部が一体となっているので、例えば溶液中でセンシングを行う場合、光機械センサの光学Ｑ値が劣化により振動検出感度が低下するという問題がある。非特許文献２で開示される複合構造では、水中に構造全体が浸漬されるため、水の光吸収により光学Ｑ値が10^6から10^4まで劣化する。

[0005]　また、特定化学種へのセンサ感度を高めるための化学修飾において、修飾材料の光学特性に依存して検出感度が低下するという問題がある。

課題を解決するための手段

[0006] 上述したような課題を解決するために、本発明に係る光機械センサは、連結する複数の機械振動子を備え、前記複数の機械振動子のうち、一の機械振動子が光共振器構造を有し、前記一の機械振動子と他の機械振動子が共振することを特徴とする。

[0007] また、本発明に係る光機械センサの製造方法は、連結する複数の機械振動子のうち、一の機械振動子と他の機械振動子が共振する光機械センサの製造方法であって、ファイバの所定の箇所を加熱する第１の工程と、前記ファイバの２か所を、前記ファイバの軸方向において逆方向に牽引して、前記ファイバに、くびれ部を形成する第２の工程とを備え、前記第１の工程と前記第２の工程とを繰り返し、複数の前記くびれ部を形成し、隣り合う前記くびれ部で挟まれる前記ファイバ部分のうち、一のファイバ部分を前記一の機械振動子とし、他のファイバ部分を前記他の機械振動子とすることを特徴とする。

発明の効果

[0008] 本発明によれば、良好な検出感度を有する光機械センサ、光機械センサシステムおよび光機械センサの製造方法を提供できる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]図１は、本発明の第１の実施の形態に係る光機械センサの構成を示す概要図である。

[図2]図２は、本発明の第１の実施の形態に係る光機械センサの構成を示す概要図である。

[図3]図３は、本発明の第２の実施の形態に係る光機械センサの作用を説明するための図である。

[図4]図４は、本発明の第１の実施例に係る光機械センサシステムの構成を示す概要図である。

[図5]図５は、本発明の第１の実施例に係る光機械センサの構成を説明するための図である。

[図6]図６は、本発明の第１の実施例に係る光機械センサの製造方法を説明するための図である。

[図7]図７は、本発明の第１の実施例に係る光機械センサの作用を説明するための図である。

[図8]図８は、本発明の第１の実施例に係る光機械センサの効果を説明するための図である。

[図9]図９は、本発明の第１の実施例に係る光機械センサの効果を説明するための図である。

[図10]図１０は、本発明の第２の実施例に係る光機械センサシステムの構成を示す概要図である。

[図11]図１１は、本発明の第２の実施例に係る光機械センサの作用を説明するための図である。

[図12]図１２は、本発明の第３の実施例に係る光機械センサシステムの構成を示す概要図である。

[図13]図１３は、本発明の第４の実施例に係る光機械センサシステムの構成を示す概要図である。

発明を実施するための形態

[0010] ＜第１の実施の形態＞

本発明の第１の実施の形態に係る光機械センサについて、図１、２を参照して説明する。

[0011] ＜光機械センサの構成＞

本実施の形態に係る光機械センサ１０は、図１に示すように、機械振動子１１からなる受信部１３と、複数の機械振動子１１（機械振動子群）からなる検知部１４とを備える。図中、点線は機械振動子１１間の結合を示す。

受信部１３と検知部１４とは、結合部１５を介して接続される。ここで、受信部１３の機械振動子１１と、検知部１４の機械振動子１１とが連結される。ここで、検知部１４は単一の機械振動子１１から構成されてもよい。

[0012] 受信部１３では、機械振動子１１が振動モードを有し、光共振器構造を有

する。

[0013] 検知部１４は、複数の機械振動子１１が振動モードを有し、外部刺激２あるいは付着物に応答して振動モードが変化する。

[0014] 受信部１３と検知部１４は、結合部１５を介して共振し、結合した振動モードを有する。その結果、検知部１４で得られた振動特性変化（振動周波数及び線幅の変化）によって、結合振動モードを介して、受信部１３の振動特性が変化する。

[0015] この受信部１３の振動特性の変化により、受信部１３の光共振器構造による光共振モードが変化する。

[0016] そこで、この光共振モードの変化を、外部からの受信部１３に入射する光を光共振モードに結合させて検出する（読み出す）ことができる（図中、矢印３）。

[0017] このように、機械振動モードの結合により、検知部１４の振動周波数及び線幅の変化を、受信部１３の光機械変換によって検出する（読み出す）ことができる。

[0018] また、受信部１３の機械振動子１１が光共振器の構成を有し、受信部１３において機械振動を光共振器との光機械結合によって光の共鳴で信号増幅して検出する（読み出す）ことができる。

[0019] これにより、光機械センサ１０は、受信部１３における光機械変換によって、振動モードの熱揺らぎを観測可能な計測感度を実現し、熱揺らぎによって励振される振動特性変化から外部刺激２あるいは付着物の情報を取得できる。

[0020] また、従来の光機械センサは検知部と受信部が一体となる構成だったので、液体などが測定対象の場合、光機械センサ全体が浸漬するためセンシング感度が低下した。

[0021] 本実施の形態に係る光機械センサによれば、検知部と受信部が分離される構成なので、液体などが測定対象の場合、検知部を浸漬させればよく、受信部が浸漬されないので高感度で測定できる。

[0022] 光機械センサ１０の構成の一例として、図２に示すように、受信部１３の機械振動子と検知部１４の機械振動子との連結構造に、円柱母材に作製した連結ボトル構造を用いることができる。ここでは受信部１３の単一のボトル構造と検知部１４の複数のボトル構造とを直列に連結させた構成を示す。

[0023] この光機械センサ１０では、受信部１３の円柱形状のボトル構造における光共振モード１６を用いて、共振器増強された光機械変換による振動計測を可能にする。

[0024] 詳細には、受信部１３のボトル構造と検知部１４の複数のボトル構造とが結合した振動モードを有し、検知部１４の複数のボトル構造が振動周波数及び線幅の変化を検知すると、結合振動モードを介して、受信部１３のボトル構造の振動周波数及び線幅の変化が変化する。

[0025] この受信部１３のボトル構造の振動特性の変化に伴う光共振器構造による光共振モード１６の変化を、外部からの受信部１３のボトル構造に入射する光を光共振モード１６に結合させて検出する（読み出す）（図中、矢印３）。

[0026] 本実施の形態に係る光機械センサによれば、受信部１３の光学特性は検知部１４と完全に分離されるため、検知部１４の光学特性変化に伴う検出感度の低下を防ぐことができる。とくに、受信部１３を光共振器と機械振動子との複合構造にすることで、光共振器の光学Ｑ値劣化に伴う検出感度の低下を防ぐことができる。

[0027] ＜第２の実施の形態＞

本発明の第２の実施の形態に係る光機械センサについて、図３を参照して説明する。

[0028] ＜光機械センサの構成＞

本実施の形態に係る光機械センサでは、２個のボトル構造のうち、振動周波数が低い方のボトル構造を受信部１３とし、振動周波数が高い方のボトル構造を検知部１４とする。その他の構成は、第１の実施の形態と同様である。

[0029] 光機械センサでは、振動特性変化の測定に例外点１７を活用する（W. Chen et al., ”Exceptional points enhance sensing in an optical microcavity”, Nature 548, 192 (2017)）。受信部１３における振動増幅、検知部１４の挿入に伴う振動周波数変化及び減衰率の増大を適切に制御することで、外部刺激２＿１、２＿２あるいは付着物の検出感度を制御できる。とくに、２つの機械振動子における振動周波数の差と減衰率の差との両方が完全にゼロとなる例外点１７に結合状態を調整することで、検出感度を向上させることができる。

[0030] 詳細を、以下に説明する。光機械センサの２つの結合振動子における例外点１７は、以下に示すように定義される。結合振動子のダイナミクスは運動方程式をフーリエ変換して得られる周波数領域での行列方程式は、式（１）で表される。

[0031] [数1]

$$\begin{pmatrix} -\omega^2+\Omega_1^2-i\omega\Gamma_1 & g_0 \\ g_0 & -\omega^2+\Omega_2^2-i\omega\Gamma_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}=\boldsymbol{F} \qquad (1)$$

[0032] ここで、ωは周波数領域の変数、Ω_iとΓ_iはそれぞれモードｉの振動周波数と減衰率（共振線幅）、g_0は振動子の結合係数、Ｆは外力ベクトルを表す。この行列は、２つの複素固有値を有し、その実部が結合モードの周波数、虚部が結合モードの線幅に対応する。

[0033] また、それぞれの複素固有値の差δωは、それぞれの振動子の周波数差$\delta\Omega=\Omega_2-\Omega_1$と線幅差$\delta\Gamma=\Gamma_2-\Gamma_1$を用いて、式（２）で表される。

[0034] [数2]

$$\delta\omega=\sqrt{4g_0^2-(\delta\Gamma+i\delta\Omega)^2} \qquad (2)$$

[0035] 例外点１７では、δωの値がゼロとなる、すなわち二つの結合モードが周波数および線幅の観点から縮重する点として定義される。

[0036] 一例として、外部刺激２＿１、２＿２が検知部１４の周波数低下と線幅増大に影響を及ぼす場合を考える。

[0037] 受信部１３のモードをｉ＝１、検知部１４のモードをｉ＝２とする。外部刺激２＿１により測定の初期状態を形成した後に周波数差をゼロにするために、検知部１４の初期周波数を受信部１３の初期周波数以上になるように設計し、外部刺激２＿１によるδΩ＝０を実現する。

[0038] 例えば、検知部を対象媒質１に挿入して（外部刺激２＿１）、挿入深さを調整することによりΩ＝０に設定する。

[0039] さらに、増大した線幅に対してδΓ＝±２g_0となるように、受信部１３の線幅を、レーザー光のパラメトリック光機械結合による増幅効果で変化させて、例外点１７を調整できる。

[0040] 図３に示すように、例外点１７に調整した振動周波数は、さらなる外部刺激２＿２によって、例えば、対象媒質の状態（粘性、密度、温度など）変化や化学種の吸着によって、再度、周波数分裂が生じる。

[0041] この周波数分裂において、結合振動子の周波数は、外部パラメータの変化に対して非線形で急峻に変化する（図中、矢印１８）。この結合振動子の周波数の急峻な変化を用いることで、外部刺激２＿２に対して、受信部１３と検知部１４と少なくともいずれかの感度を向上できる。

[0042] 本実施の形態に係る光機械センサによれば、機械振動モードにおいて、光増幅により実効的にＳＮ比を改善でき、結合モードの振動特性変化の検出感度を向上できる。

[0043] ＜第１の実施例＞

本発明の第１の実施例に係る光機械センサおよび光機械センサシステムについて、図４～図９を参照して説明する。

[0044] 本実施例に係る光機械センサシステム２０は、図４に示すように、光機械センサ１０と、レーザー２１と、テーパーファイバ２２と、光検出器２３とを備える。

[0045] 光機械センサ１０は、図５に示すように、２個のボトル構造が連結される構成を有し、それぞれのボトル構造は直径１２５μｍのシリカ光ファイバからなる。２個のボトル構造のうち、一方が受信部１３となり、他方が検知部

１４となる。また、受信部１３のボトル構造と、検知部１４のボトル構造との間に、結合部１５のくびれ部（凹部）が形成される。ここで、受信部１３と検知部１４それぞれのボトル構造の直径Ｄ１が１２５μｍ、くびれ部の直径Ｄ２が１１５μｍであり、くびれ部の深さｄが５μｍである。

[0046] 光機械センサ１０は、図６に示すように、シリカガラスファイバ２４を加熱、引張操作することにより作製される。

[0047] 初めに、シリカガラスファイバ２４の所定の２か所を保持する。

[0048] 次に、シリカガラスファイバ２４の所定の箇所２４＿１を加熱する。

[0049] 次に、シリカガラスファイバ２４を保持した２箇所を、それぞれ逆方向に牽引（引張操作）する（Ｓ１）。その結果、加熱した箇所に、くびれ部（凹部）２５が形成される（Ｓ２）。

[0050] 次に、シリカガラスファイバ２４において、箇所２４＿１と異なる箇所２４＿２を加熱し、牽引（引張操作）し、加熱した箇所に、くびれ部（凹部）２５を形成する（Ｓ３～Ｓ４）。この加熱と牽引（引張操作）を繰り返すことにより、シリカガラスファイバ２４に複数のくびれ部（凹部）２５が形成される）。その結果、複数のボトル構造がくびれ部（凹部）２５で連結される構造すなわち光機械センサ１０が作製される（Ｓ５）。

[0051] 本実施例では、シリカガラスファイバ２４の加熱後に牽引（引張操作）を繰り返し、３か所にくびれ部（凹部）２５を形成し、一方のボトル構造を受信部１３とし、他方のボトル構造を検知部１４とした。

[0052] ここで、光機械センサの材料にシリカガラスファイバを用いる例を示したが、その他のガラスファイバでもよく、加熱、牽引により伸長する材質のファイバであればよい。

[0053] テーパーファイバ２２は、テーパーファイバであり、受信部１３のボトル構造に架橋・固定される。図７に、テーパーファイバ２２が架橋・固定される部分の概略図２０１と断面模式図２０２を示す。図７に示すように、テーパーファイバ２２が、受信部１３のボトル構造の表面に治具等（図示せず）を用いて密着して固定される。ここで、テーパーファイバの方向（レーザー

光の伝播方向）とボトル構造の軸方向（図中、Ｚ方向）に限りはないが、レーザー光の進行方向とウィスパリングギャラリーモードの回転方向とを一致させるため、テーパーファイバの方向とボトル構造の軸方向とが直交することが望ましい。

[0054] レーザー２１は、検出用のレーザー光を出射する。レーザー光は、テーパーファイバ２２を伝搬し、テーパーファイバ２２と受信部１３のボトル構造とが接する領域で近接場２６を発生させ、近接場光結合して、光検出器２３で受光される。

[0055] 詳細には、レーザー光はテーパーファイバ２２と受信部１３のボトル構造とが接する領域に伝搬され、近接場（エバネッセント場）２６から近接場光（エバネッセント光）が放出され、受信部１３の光共振器構造により、全反射して周回して、光共振モード１６で共鳴する。

[0056] この共鳴状態で、検知部１４の振動特性の変化に伴い、受信部１３の振動特性が変化すると、光共振モード１６が変化する。この光共振モード１６の変化が近接場２６でレーザー光と結合する結果、レーザー光により光共振モード１６の変化が検出される。

[0057] このように、受信部１３のボトル構造にテーパーファイバ２２を架橋・固定する構成により、近接場光結合による結合振動モードの光検出（光読み出し）を実現できる。

[0058] 光機械センサシステム２０を用いて対象媒質１を水として測定する例を、以下に説明する。

[0059] 初めに、光機械センサ１０における２個のボトル構造を大気中に保持し、レーザー光をテーパーファイバ２２に伝搬させ、光検出器２３で受光させる。その結果、レーザー光が受信部１３の光共振モードに結合し、光機械結合を介した機械振動スペクトルが測定される。

[0060] ここで、２個のボトル構造それぞれについて機械振動スペクトルを測定した結果、それぞれの形状を完全同一にすることは困難なので、それぞれのボトル構造の振動特性に差異が生じる。そこで、高周波数の機械振動スペクト

ルを示すボトル構造を受信部１３とし、低周波数の機械振動スペクトルを示すボトル構造を検知部１４とする。

[0061] このように、測定される機械振動スペクトルは、受信部１３の機械振動によるピークと、検知部１４の機械振動によるピークとを有する。

[0062] 次に、検知部１４を水中に０．１ｍｍずつ挿入して、検知部１４のボトル構造の振動特性の変化を、光検出器２３で観測される機械振動スペクトルから検出する（読み取る）。

[0063] 図８、９それぞれに、検知部１４の挿入深さに対する振動周波数および共振線幅の変化を示す。ここで、黒三角実線が受信部１３の機械振動によるピークにおける振動周波数および共振線幅、黒丸実線が検知部１４の機械振動によるピークにおける振動周波数および共振線幅を示す。

[0064] 振動周波数について、検知部１４の挿入深さの増加に伴い、受信部１３の振動周波数は一定である一方、検知部１４の振動周波数は低周波側にシフトする。

[0065] また、共振線幅について、検知部１４の挿入深さの増加に伴い、受信部１３の共振線幅は一定である一方、検知部１４の共振線幅は増加する。

[0066] このように、本実施例の光機械センサおよび光機械センサシステムによれば、受信部と検知部を分離する構成において、受信部を大気中に保持し、検知部を対象媒質に浸漬（挿入）することにより、大気と対象媒質での熱揺らぎ（ブラウン運動）等による振動特性の差（変化）を検出することができる。

[0067] 本実施例では、２つのボトル構造について、高周波数の機械振動スペクトルを示すボトル構造を検知部とし、低周波数の機械振動スペクトルを示すボトル構造を受信部としてもよい。

[0068] 本実施例に係る光機械センサおよびそのシステムによれば、受信部を大気中に保持し、検知部を対象媒質１（気体、液体、固体）に挿入することで、対象媒質１の密度及び粘性に応じた検知部の振動周波数及び線幅の変化を、受信部の光機械変換によって検知する（読み出す）ことができる。

[0069] ＜第２の実施例＞

本発明の第２の実施例に係る光機械センサおよび光機械センサシステムについて、図１０、１１を参照して説明する。

[0070] 本実施例に係る光機械センサシステム３０は、図１０に示すように、光機械センサ１０と、レーザー２１と、テーパーファイバ２２と、光検出器２３と、可変光減衰器３１とを備える。

[0071] 光機械センサシステム３０では、テーパーファイバ２２の入射側に可変光減衰器３１を備え、レーザー２１を出射したレーザー光が可変光減衰器３１を介してテーパーファイバ２２を伝搬する。

[0072] また、光機械センサ１０において、対象媒質１（例えば、水）中で機械振動子の振動周波数が低下するため、２個のボトル構造のうち、振動周波数が低い方のボトル構造を受信部１３とし、振動周波数が高い方のボトル構造を検知部１４とする。その他の構成は、第１の実施例と同様である。

[0073] レーザー光をテーパーファイバ２２に入射して伝搬させるときに、光共振器の共振周波数以上にレーザー周波数を調整することにより、レーザー光をポンプ光としてパラメトリック光機械結合を介した振動増幅効果を得ることができる。

[0074] この増幅効果を可変にするために、テーパーファイバ２２の前段に可変光減衰器３１を配置して、レーザー光の強度を調整する。ここで、光増幅だけでなく発振させてもよい。

[0075] 図１１に、受信部１３での典型的な振動周波数変化（点線３２＿１）と、検知部１４を水中に挿入したときの検知部１４での典型的な振動周波数変化（点線３２＿２）とを示す。

[0076] これに対し、入射するレーザー光の強度を調整して振動増幅を行うことにより、受信部１３と検知部１４の振動周波数変化をシフトさせ、例外点１７を含む振動周波数変化が得られる（図中、実線３３）。

[0077] ここで、適切な挿入深さ（図１１におけるZ_1）に調整することで例外点１７での検知が可能になる。例外点１７近傍では、結合モードの振動周波数が

外的要因に対して急峻に変化するので、例えば、例外点１７に調整した状態で、水と異なる溶液を水中に滴下する場合に水溶液の密度・粘性変化を鋭敏に検知できる。

[0078] このように、レーザー光の強度や検知部１４の挿入深さ等の受信部１３と検知部１４との少なくともいずれかの周囲環境を調整することにより、それぞれの機械振動子の周波数及び減衰係数を変化させ、結合振動の状態を調整することにより、外部刺激あるいは付着物の検出感度を向上できる。

[0079] 本実施例に係る光機械センサおよびそのシステムによれば、受信部に入射する光の強度変調または周波数制御によるパラメトリック光機械結合を用いることにより、光による振動増幅及び発振を可能とし、検知部の振動変化に対する感度を向上できる。

[0080] ＜第３の実施例＞

本発明の第３の実施例に係る光機械センサおよび光機械センサシステムについて、図１２を参照して説明する。

[0081] 本実施例に係る光機械センサシステム４０は、図１２に示すように、光機械センサ１０と、レーザー２１と、テーパーファイバ２２と、光検出器２３と、可動ステージ４１とを備える。

[0082] 光機械センサシステム３０において、光機械センサ１０の受信部１３に、可動ステージ（３次元ポジショナー）４１が搭載される。可動ステージ（３次元ポジショナー）４１を３次元で駆動することにより、光機械センサ１０を３次元で掃引する。また、マクロヒータ４２を備えてもよい。その他の構成は、第１の実施例と同様である。

[0083] 本実施例に係る光機械センサシステム３０を用いる測定について、対象媒質１をゲル化溶液とする場合を一例として説明する。

[0084] ゲル化溶液は、例えば、各種モノマー・ポリマーの化学的な架橋によって得られる化学架橋ゲル溶液や各種ポリマー間の物理的な相互作用によって得られる物理架橋ゲル溶液などである。

[0085] 初めに、第１の実施例と同様に、レーザー光により光機械センサ１０の機

械振動子の結合振動特性を検出する状態で、検知部１４をゲル化溶液中に浸漬する。

[0086] 次に、ゲル化溶液内でゲル化反応が誘起されると、検知部１４周囲の質量変化、粘弾性変化に伴う振動モードが変化する。ここで、ゲル化溶液に適切な開始剤４３、マクロヒータ４２による熱、他の光源よる光刺激などを与えることでゲル化を促進できる。

[0087] その結果、第１の実施例と同様に、この振動モードの変化を検知部１４が検出することに伴い、受信部１３に架橋したテーパーファイバ２２からの光出力信号において、ゲル化に応じた振動特性の変化を検出できる。

[0088] ここで、光機械センサ１０の機械振動子は、ボトル直径などの形状により共鳴周波数が異なる。そこで、検知部１４において、複数の、形状が異なり共鳴周波数が異なる機械振動子を備えることにより、共鳴周波数を変化させ、周波数依存性を測定できる。この周波数依存性より、ゲル化溶液の動的粘弾性を取得できる。

[0089] 最後に、可動ステージ４１を駆動させ、光機械センサ１０を３次元で掃引することにより、ゲル化の空間分布を測定できる。

[0090] 本実施例では、対象媒質としてゲル化溶液を測定する例を示したが、他の粘性が分布している混合溶液を対象媒質として測定できる。また、他の対象媒質の密度などの性質の空間分布を測定できる。

[0091] 本実施例では、第１の実施例に係る光機械センサシステムに可動ステージを搭載する例を示したが、第２の実施例に係る光機械センサシステムに可動ステージを搭載すれば、さらに測定感度を向上させて空間分布を測定できる。

[0092] 本実施例に係る光機械センサおよびそのシステムによれば、ゲル化溶液等の粘性が分布している混合溶液においてゲル化等の空間分布を測定できる。

[0093] また、当然、第１または第２の実施例に係る光機械センサシステムを用いて、ゲル化溶液等の媒質の動的粘弾性を取得できる。

[0094] ＜第４の実施例＞

本発明の第４の実施例に係る光機械センサおよび光機械センサシステムについて、図１３を参照して説明する。

[0095] 本実施例に係る光機械センサシステム５０では、図１３に示すように、検知部１４の機械振動子の表面にタンパク質抗体５１による化学修飾を施す。その他の構成は、第１の実例と同様である。

[0096] 対象となるタンパク質溶液に、検知部１４を浸漬することで、タンパク質４＿１と抗体５１との吸着による検知部１４の機械振動子の表面での質量変化に伴う振動特性変化を検知できる。

[0097] タンパク質４＿１は、例えば、細胞が産出する免疫系のサイトカインや成長因子、細胞表面に表出する足場タンパク質などである。具体的には、それぞれインターロイキンや神経成長因子、ラミニンなどである。

[0098] 光機械センサ１０の機械振動子において、異なるタンパク質の吸着によって振動変化が異なるので、タンパク質を判別できる。例えば、タンパク質の種類と振動変化の関係を予め取得しておけば、振動変化からタンパク質の種類を判別できる。

[0099] また、図１３に示すように、蛍光顕微鏡５２を用いて、タンパク質の吸着量と振動変化との関係を測定できる。

[0100] この測定において、まず、検知部１４の機械振動子の表面に、予め蛍光標識４＿２を施した所定の種類のタンパク質４＿１を化学修飾する。

[0101] 光機械センサ１０により振動特性変化を測定するとともに、蛍光顕微鏡５２で蛍光標識４＿２の蛍光色素の輝度による吸着量を評価することにより、タンパク質の吸着量と振動変化の関係を測定できる。このタンパク質の吸着量と振動変化の関係を予め取得しておけば、振動変化よりタンパク質の吸着量を測定することができる。

[0102] 本実施例では、対象媒質をタンパク質溶液としてタンパク質を測定する例を示したが、これに限らず、タンパク質以外の化学種を測定できる。

[0103] 本実施例に係る光機械センサおよびそのシステムによれば、特定の化学種（タンパク質など）を検出でき、化学種の種類や吸着量を測定できる。

[0104] 本実施例に係る光機械センサシステムの構成に、第２の実施例に係る光機械センサシステムの構成に適用すれば、検知感度を向上できる。

[0105] また、本実施例に係る光機械センサシステムに、第３の実施例と同様に、可動ステージを搭載すれば、化学種の空間分布を測定できる。

[0106] ＜第５の実施例＞

本実施例に係る光機械センサおよび光機械センサシステムでは、検知部の機械振動子の表面に磁歪材料による化学修飾を施す。その他の構成は、第１の実施例と同様である。

[0107] 磁歪材料では、磁場の印加により磁化され、形状に歪（形状変化）が生じる。そこで、磁歪材料で化学修飾された検知部の機械振動子では、外部磁場によって振動特性が変化する。その結果、この振動特性変化が、第１の実施例と同様に光検出され、外部磁場が測定される。

[0108] 本実施例に係る光機械センサおよびそのシステムによれば、磁場を測定できる。

[0109] また、本実施例に係る光機械センサシステムの構成に、第２の実施例に係る光機械センサシステムの構成に適用すれば、検知感度を向上できる。

[0110] また、本実施例に係る光機械センサシステムに、第３の実施例と同様に、可動ステージを搭載すれば、磁場の空間分布を測定できる。

[0111] ＜第６の実施例＞

本実施例に係る光機械センサおよび光機械センサシステムでは、検知部の機械振動子の表面に熱歪材料による化学修飾を施す。その他の構成は、第１の実施例と同様である。

[0112] 熱歪材料では、熱（または温度変化）により、形状に歪（形状変化）が生じる。そこで、熱歪材料で化学修飾された検知部の機械振動子では、熱（または温度変化）によって振動特性が変化する。その結果、この振動特性変化が、第１の実施例と同様に光検出され、温度が測定される。

[0113] 本実施例に係る光機械センサおよびそのシステムによれば、温度を測定できる。

[0114] また、本実施例に係る光機械センサシステムの構成に、第２の実施例に係る光機械センサシステムの構成に適用すれば、検知感度を向上できる。

[0115] また、本実施例に係る光機械センサシステムに、第３の実施例と同様に、可動ステージを搭載すれば、温度の空間分布を測定できる。

[0116] 本発明の実施例に係る光機械センサシステムでは、レーザー光に１．５μｍ波長帯を用いる。レーザー光の波長は、これに限らず、光ファイバ（テーパーファイバー等）の材料によって適切に選択すればよい。

[0117] 本発明の第４～第６の実施例では、光機械センサの検知部の機械振動子に、タンパク質抗体、磁歪材料、熱歪材料が化学修飾される例を示したが、これに限らず、外部刺激に反応する物質が化学修飾されればよい。

[0118] 本発明の実施例に係る光機械センサシステムでは、受信部１３で近接場（エバネッセント場）を発生させるためにテーパーファイバ２２を用いる例を示したが、これに限らず、プリズム等の光学素子を用いてもよく、近接場（エバネッセント場）を発生させる光素子であればよい。この場合、光ファイバやレンズ、ミラー等を用いる光学系等で、プリズム等の光学素子にレーザー光を入射してもよい。

[0119] 本発明の実施の形態では、光機械センサおよび光機械センサシステムの構成、製造方法などにおいて、各構成部の構造、寸法、材料等の一例を示したが、これに限らない。光機械センサおよび光機械センサシステムの機能を発揮し効果を奏するものであればよい。

産業上の利用可能性

[0120] 本発明は、センサに関するものであり、水、溶液などの媒質、化学種、磁場、温度などの外部環境の測定に適用することができる。

符号の説明

[0121] １０　光機械センサ

１１　機械振動子

１２　機械振動子間の結合

１３　受信部（一の機械振動子）

１４　検知部（他の機械振動子）

請求の範囲

[請求項1] 連結される複数の機械振動子を備え、

前記複数の機械振動子のうち、一の機械振動子が光共振器構造を有し、

前記一の機械振動子と他の機械振動子が共振する

ことを特徴とする光機械センサ。

[請求項2] 前記他の機械振動子が測定対象内に配置され、

前記一の機械振動子に入射される光により、前記一の機械振動子と前記他の機械振動子との共振を介して、前記他の機械振動子の振動特性の変化が検出される

ことを特徴とする請求項１に記載の光機械センサ。

[請求項3] 前記一の機械振動子の振動周波数が、前記他の機械振動子の振動周波数以下で、

前記光の周波数が、前記光共振器構造の周波数以上である

ことを特徴とする請求項２に記載の光機械センサ。

[請求項4] 複数の前記他の機械振動子を備え、

前記複数の前記他の機械振動子がそれぞれ、異なる形状を有する

ことを特徴とする請求項１から請求項３のいずれか一項に記載の光機械センサ。

[請求項5] 前記他の機械振動子に、外部刺激に反応する物質が化学修飾される

ことを特徴とする請求項１から請求項４のいずれか一項に記載の光機械センサ。

[請求項6] 請求項１から請求項５のいずれか一項に記載の光機械センサと、

レーザーと、

近接場を発生させるための光素子と、

光検出器と

を備える光機械センサシステム。

[請求項7] 可変光減衰器

を備える請求項６に記載の光機械センサシステム。

[請求項8] 前記光機械センサに搭載される可動ステージ

を備える請求項６又は請求項７に記載の光機械センサシステム。

[請求項9] 連結する複数の機械振動子のうち、一の機械振動子と他の機械振動子が共振する光機械センサの製造方法であって、

ファイバの所定の箇所を加熱する第１の工程と、

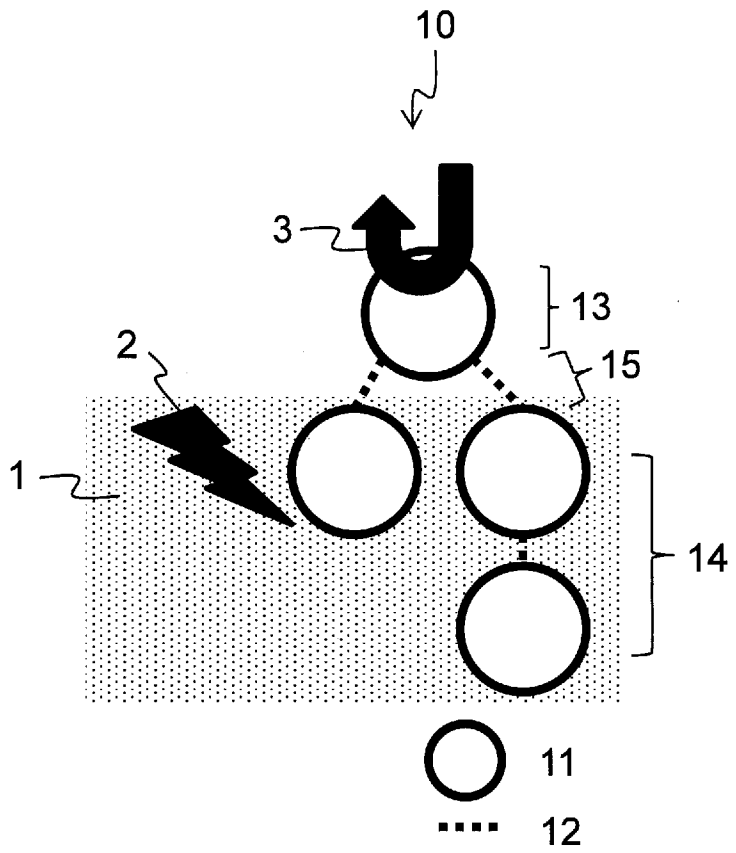
前記ファイバの２か所を、前記ファイバの軸方向において逆方向に牽引して、前記ファイバに、くびれ部を形成する第２の工程と

を備え、

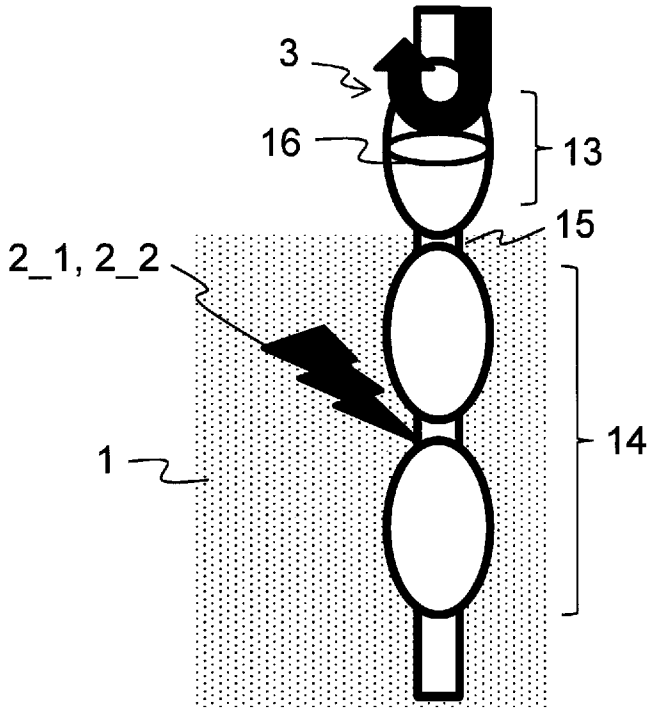
前記第１の工程と前記第２の工程とを繰り返し、複数の前記くびれ部を形成し、隣り合う前記くびれ部で挟まれる前記ファイバ部分のうち、一のファイバ部分を前記一の機械振動子とし、他のファイバ部分を前記他の機械振動子とする

ことを特徴とする光機械センサの製造方法。

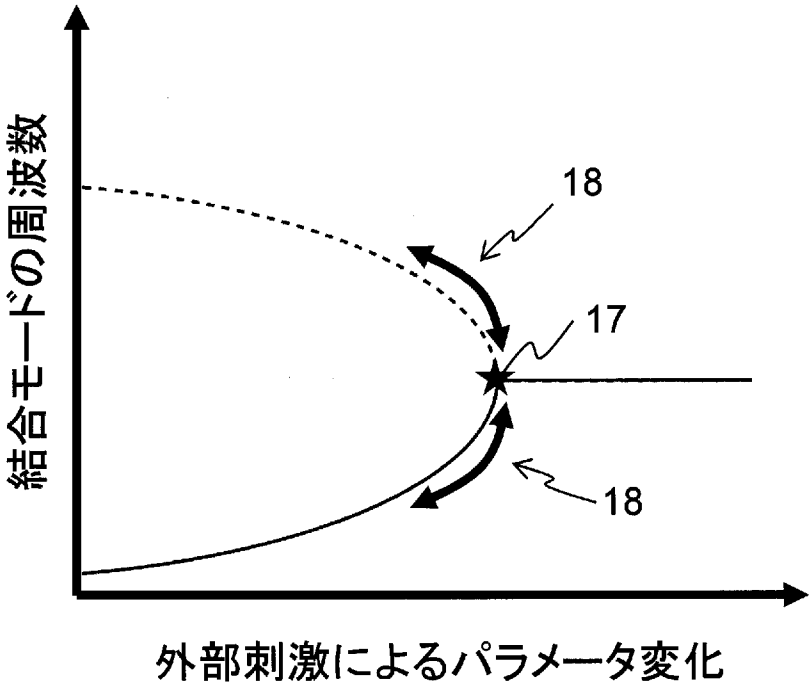
[図1]



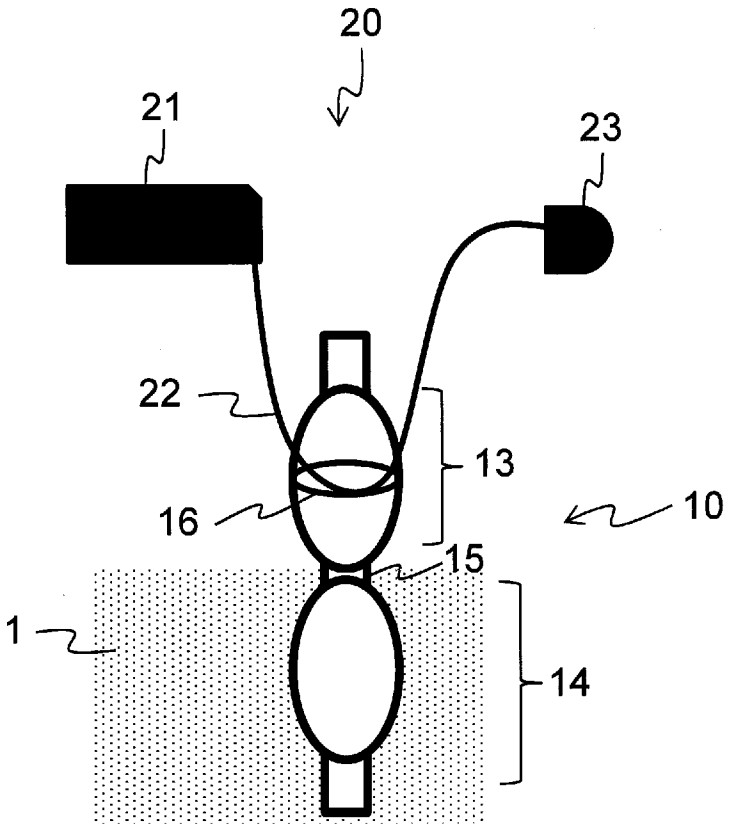
[図2]



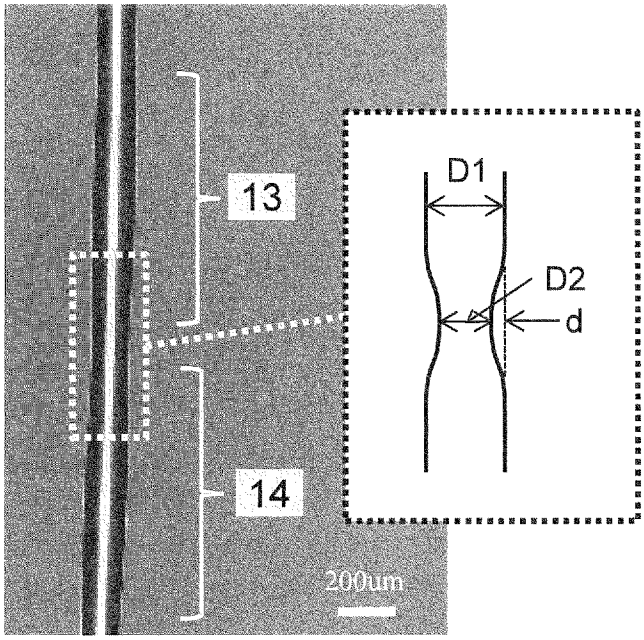
[図3]



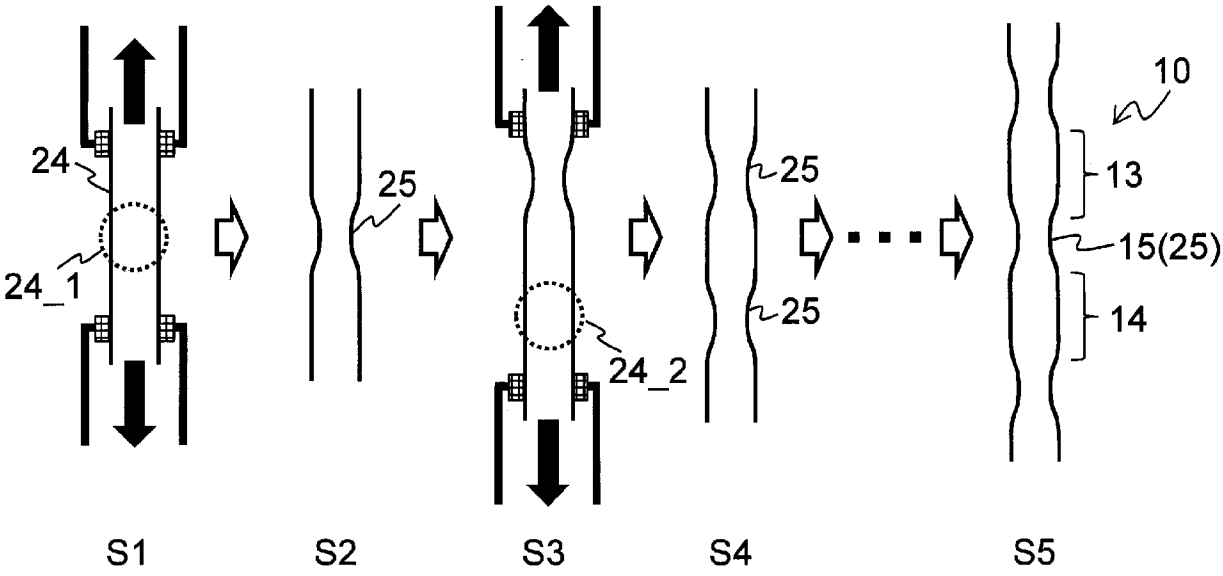
[図4]



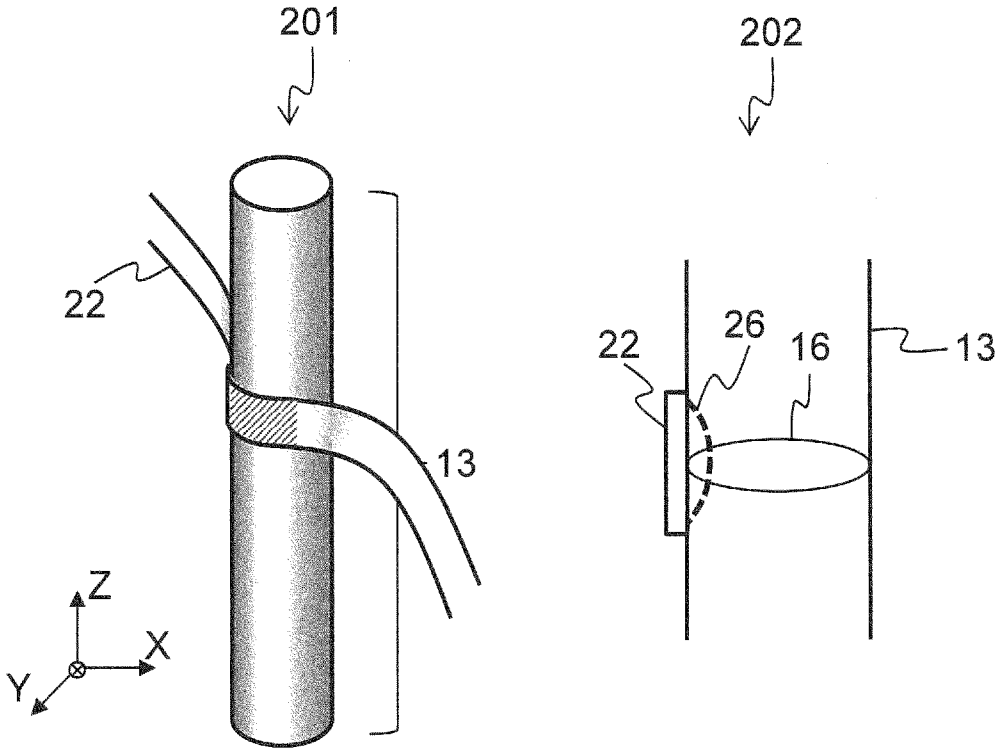
[図5]



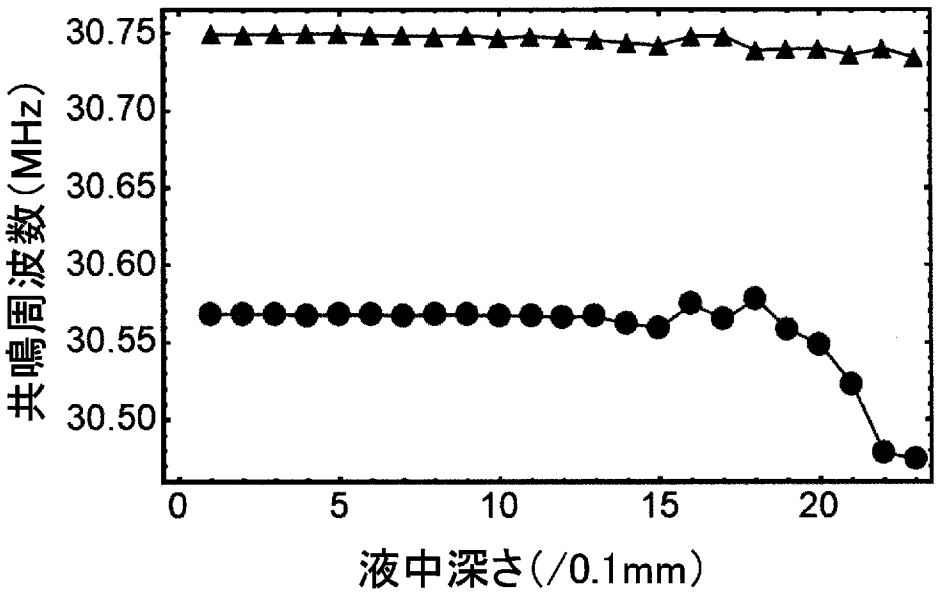
[図6]



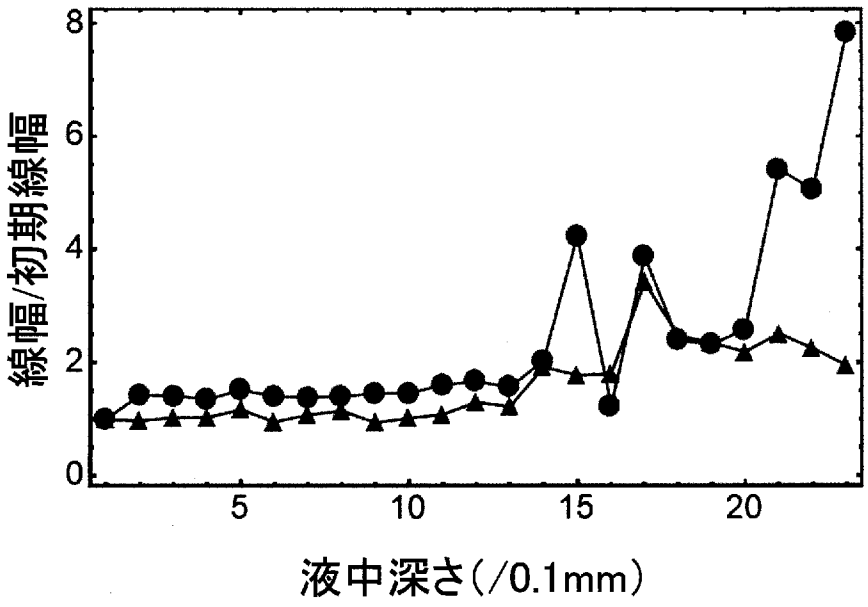
[図7]


201
202
22
13
Z
X
Y
22
26
16
13

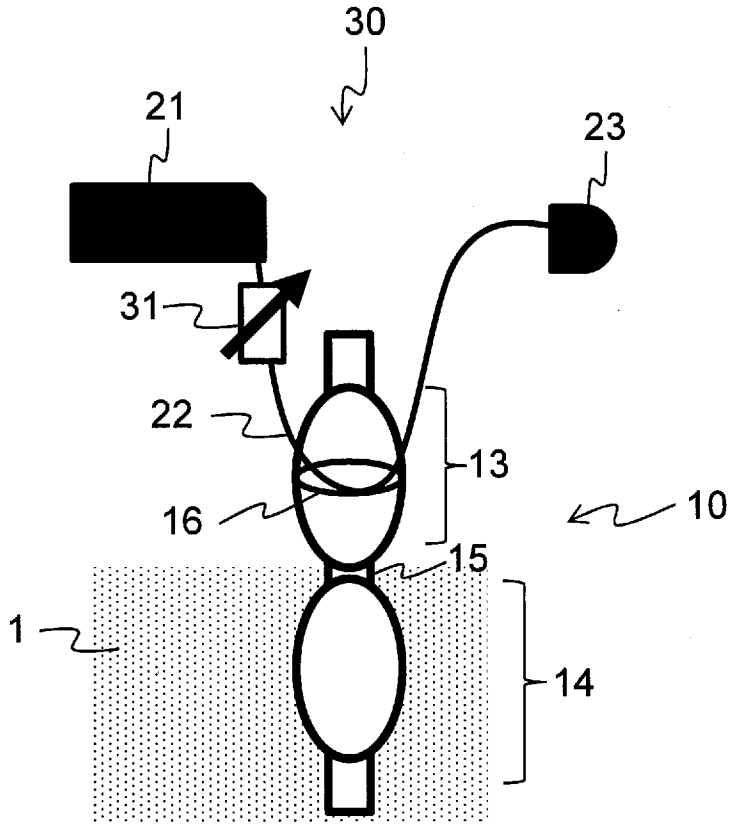
[図8]


30.75
30.70
30.65
30.60
30.55
30.50
共鳴周波数(MHz)
0
5
10
15
20
液中深さ(/0.1mm)

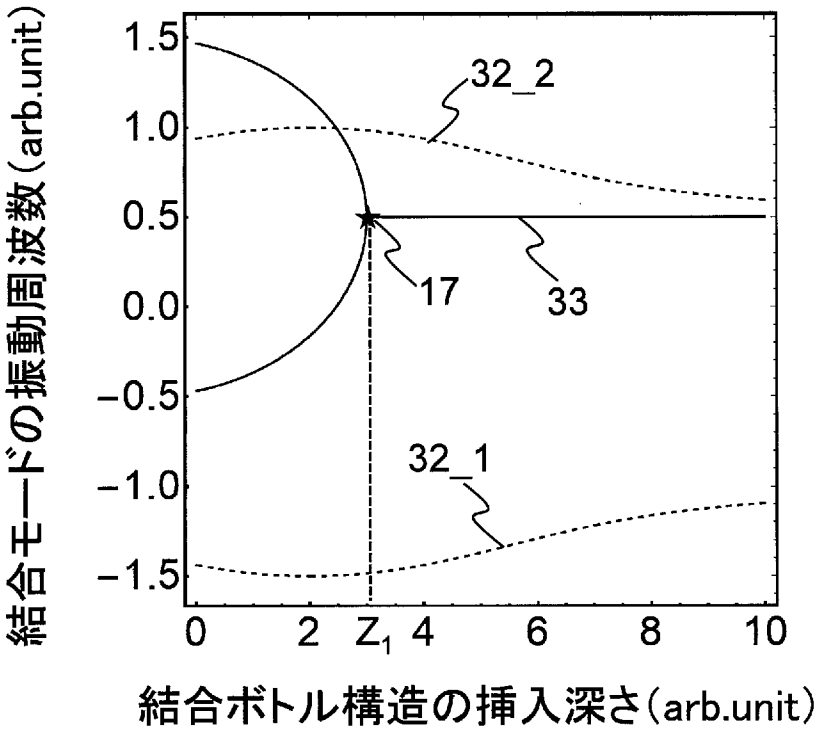
[図9]



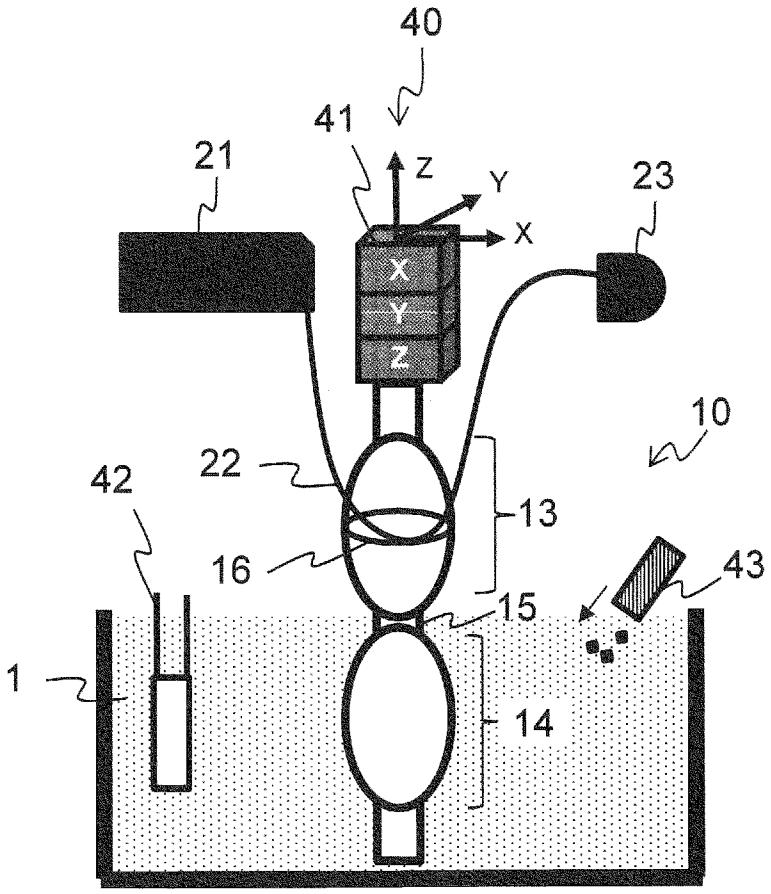
[図10]



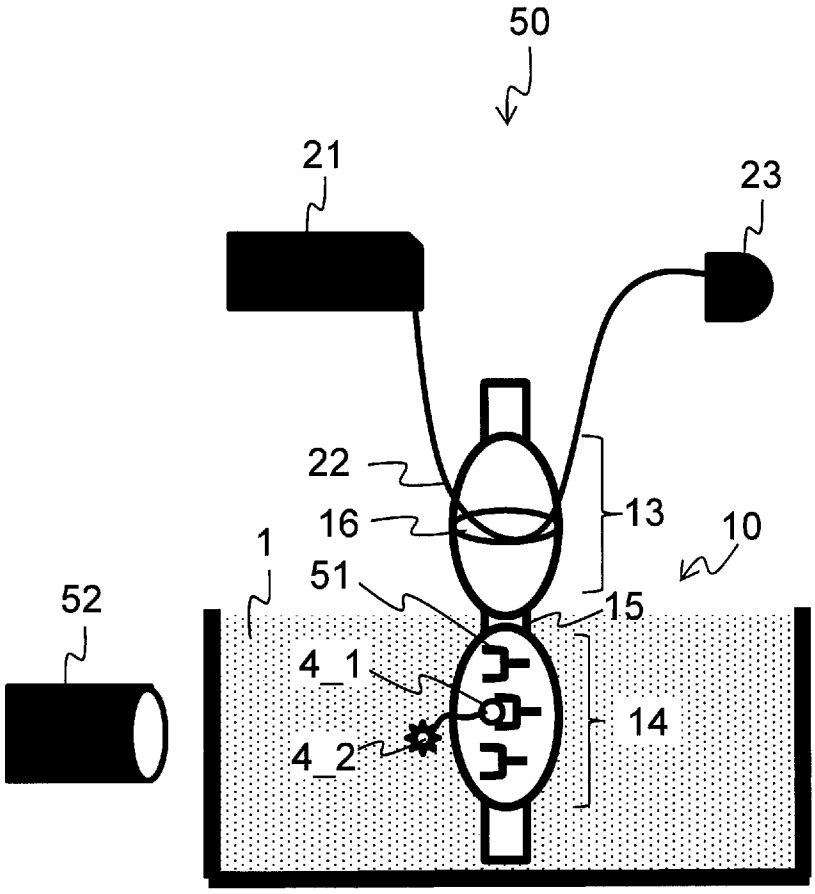
[図11]


結合モードの振動周波数(arb.unit)
1.5
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
32_2
17
33
32_1
0
2
Z1
4
6
8
10
結合ボトル構造の挿入深さ(arb.unit)

[図12]


40
41
21
Z
Y
X
23
X
Y
Z
10
22
42
13
16
43
15
1
14

[図13]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2021/043799

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01H 9/00(2006.01)i; ***G02B 6/00***(2006.01)i
FI: G01H9/00 E; G02B6/00 B

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)

G01H9/00; G02B6/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2009-53031 A (CANON INC.) 12 March 2009 (2009-03-12) fig. 1	1-3, 7-8
Y		5-6, 9
Y	JP 2008-500579 A (3M INNOVATIVE PROPERTIES CO.) 10 January 2008 (2008-01-10) fig. 1, 5, 10, 11	5-6, 9
Y	JP 2016-143739 A (FUJIKURA LTD.) 08 August 2016 (2016-08-08) paragraph [0033], fig. 2	9
A	JP 2010-511871 A (3M INNOVATIVE PROPERTIES CO.) 15 April 2010 (2010-04-15) entire text, all drawings	1–9
A	JP 2008-65186 A (OKI ELECTRIC IND CO., LTD.) 21 March 2008 (2008-03-21) entire text, all drawings	1–9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☑ 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	Date of mailing of the international search report
07 January 2022	**25 January 2022**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2021/043799

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2009-53031 A	12 March 2009	US 2011/0187868 A1 F1	
JP 2008-500579 A	10 January 2008	WO 2005/119221 A1 F1, 5, 10, 11	
JP 2016-143739 A	08 August 2016	(Family: none)	
JP 2010-511871 A	15 April 2010	US 2008/0129997 A1 entire text, all drawings	
JP 2008-65186 A	21 March 2008	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2021/043799

A.　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G01H 9/00(2006.01)i; G02B 6/00(2006.01)i
FI: G01H9/00 E; G02B6/00 B

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））

G01H9/00; G02B6/00

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

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２２年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２２年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２２年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

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
X Y	JP 2009-53031 A (キヤノン株式会社) 12.03.2009 (2009-03-12) [図1]	１－３，７－８ ５－６，９
Y	JP 2008-500579 A (スリーエム イノベイティブ プロパティズ カンパニー) 10.01.2008 (2008-01-10) [図1] [図5] [図10] [図11]	５－６，９
Y	JP 2016-143739 A (株式会社フジクラ) 08.08.2016 (2016-08-08) [0033] [図2]	９
A	JP 2010-511871 A (スリーエム イノベイティブ プロパティズ カンパニー) 15.04.2010 (2010-04-15) 全文全図	１－９
A	JP 2008-65186 A (沖電気工業株式会社) 21.03.2008 (2008-03-21) 全文全図	１－９

☐ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ 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
"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
"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
"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）
"O"　口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
"P"　国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献

"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
"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
"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
"&"　同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
07.01.2022	25.01.2022

名称及びあて先

日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）

森口　正治 2J 9403

電話番号 03-3581-1101 内線 3252

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2021/043799

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2009-53031 A	12.03.2009	US 2011/0187868 A1 Ｆ１	
JP 2008-500579 A	10.01.2008	WO 2005/119221 A1 Ｆ１，５，１０，１１	
JP 2016-143739 A	08.08.2016	（ファミリーなし）	
JP 2010-511871 A	15.04.2010	US 2008/0129997 A1 全文全図	
JP 2008-65186 A	21.03.2008	（ファミリーなし）	