

(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
2015 年 11 月 19 日(19.11.2015)



(10) 国際公開番号

WO 2015/174486 A1

- (51) 国際特許分類:
H02N 1/08 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/063878
- (22) 国際出願日: 2015 年 5 月 14 日(14.05.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-102132 2014 年 5 月 16 日(16.05.2014) JP
- (71) 出願人: ローム株式会社(ROHM CO., LTD.) [JP/JP]; 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町 2 1 番地 Kyoto (JP). 学校法人 関西大学 (THE SCHOOL CORPORATION KANSAI UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5648680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番 3 5 号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 吉川 泰弘(YOSHIKAWA Yasuhiro); 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町 2 1 番地 ローム株式会社内 Kyoto (JP). 青柳 誠司(AOYAGI Seiji); 〒5648680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番 3 5 号 学校法人関西大学システム理工学部内 Osaka (JP). 高橋 智一(TAKAHASHI Tomokazu); 〒5648680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3

番 3 5 号 学校法人関西大学システム理工学部内 Osaka (JP). 鈴木 昌人(SUZUKI Masato); 〒5648680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番 3 5 号 学校法人関西大学システム理工学部内 Osaka (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人 佐野特許事務所 (SANO PATENT OFFICE); 〒5400032 大阪府大阪市中央区天満橋京町 2 - 6 天満橋八千代ビル別館 5 F Osaka (JP).

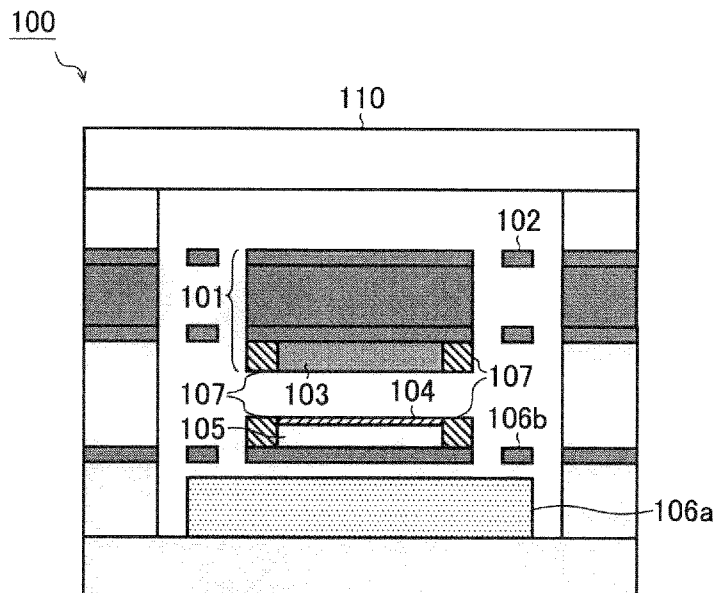
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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

[続葉有]

(54) Title: ELECTRICITY-GENERATING DEVICE

(54) 発明の名称: 発電装置



(57) Abstract: This electricity-generating device (100) contains a dielectric body (103) and an electret (104). The dielectric body (103) constitutes part of a movable mass (101), and the electret (104) holds an electric charge. This electricity-generating device (100), which generates electricity via changes in the distance between the dielectric body (103) and the electret (104), also contains electret-supporting members (a repulsing member (106a) and spring members (106b)) that elastically support the electret (104).

(57) 要約: 発電装置 (100) は、可動マス (101) の一部となる誘電体 (103) と、電荷を保持するエレクトレット (104) と、を有し、誘電体 (103) とエレクトレット (104) との距離が変化することによって発電を行うものであって、エレクトレット (104) を弾力的に支持するエレクトレット支持部材 (反発部材 106a とばね部材 106b) をさらに有する。



WO 2015/174486 A1



ロシア (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:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：発電装置

技術分野

[0001] 本発明は、誘電体とエレクトレットとの距離が変化することによって発電（運動エネルギー（振動エネルギー）から電気エネルギーへのエネルギー変換）を行う発電装置、特にMEMS [Micro Electromechanical System] 技術を用いて製造される振動駆動型の容量性発電装置に関するものである。

背景技術

[0002] 図46は、振動型発電装置の一従来例を示す模式図である。図46において、符号201は上部基板、符号202は下部基板、符号203はエレクトレット、符号204は対向電極、符号205はベース電極、符号206はバネを各々示している。なお、上部基板201は、下部基板202に対して2軸平面方向（X方向、Y方向）に変位自在に弾性支持された可動体である。

[0003] 上記構成から成る振動型発電装置の動作原理は、所定のギャップ距離を維持しながらエレクトレット203と対向電極204との重なり面積を2軸平面方向（X方向、Y方向）の振動によって変化させることにより、対向電極204に誘導される電荷の変化分を電流として引き出すという方式（いわゆる静電誘導方式）であった。

[0004] なお、MEMS技術を用いて製造される振動型発電装置の関連技術としては、例えば、特許文献1や非特許文献1及び2を挙げることができる。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2007-312551公報

非特許文献

[0006] 非特許文献1：Y. Naruse, N. Matsubara, K. Mabuchi, M. Izumi, K. Honma, "ELECTROSTATIC MICRO POWER GENERATOR FROM LOW FREQUENCY VIBRATION SUCH AS HUMAN MOTION", Proceedings of PowerMEMS 2008+ microEMS 2008, Sendai, Japan

, November 9-12, (2008)

非特許文献2 : M. Edamoto, Y. Suzuki, N. Kasagi, K. Kashiwagi, Y. Morizawa, T. Yokoyama, T. Seki, and M. Oba, "LOW-RESONANT-FREQUENCY MICRO ELECTRET GENERATOR FOR ENERGY HARVESTING APPLICATION", Proc. IEEE Int. Conf. MEMS 2009, Sorrento, (2009), pp.1059-1062

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] しかしながら、上記従来の振動型発電装置では、その発電電力が大きくても μW オーダーであり、その用途が限定されていた。
- [0008] また、上記従来の振動型発電装置は、エレクトレット203と対向電極204が互いに対面している構造であるため、エレクトレット203と対向電極204とのギャップ距離を小さく設計し過ぎると、エレクトレット203と対向電極204との間に静電引力が働いて両者が接触したり、或いは、エレクトレット203の注入電荷が放電されてしまうおそれがあった。そのため、エレクトレット203と対向電極204とのギャップ距離は、ある程度大きく設計しなければならないが、ギャップ距離を広げた上で、なおかつ、振動による容量変化を大きくするためには、エレクトレット203と対向電極204の面積を大きく設計する必要がある、その結果としてさらにギャップ距離を広げなければならないという悪循環が生じていた。このような悪循環から、上記従来の振動型発電装置では、発電電力を高めつつ装置の微細化や狭ギャップ化を実現することが困難であった。
- [0009] 本発明は、上記の問題点に鑑み、小型大出力の発電装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0010] 上記目的を達成すべく、本発明に係る発電装置は、可動マスとなる誘電体と、電荷を保持するエレクトレットと、を有し、前記誘電体と前記エレクトレットとの距離が変化することによって発電を行う発電装置であって、前記エレクトレットを弾性的に支持するエレクトレット支持部材をさらに有する

構成（第１の構成）とされている。

[0011] なお、上記第１の構成から成る発電装置において、前記エレクトレット支持部材は、所定の反発係数を持つ反発部材を含む構成（第２の構成）にする
とよい。

[0012] また、上記第２の構成から成る発電装置において、前記反発係数は０．３
以上である構成（第３の構成）にする
とよい。

[0013] また、上記第３の構成から成る発電装置において、前記反発部材は、ゲル
またはこれよりも反発係数の高い高反発材料によって形成された構成（第４
の構成）にする
とよい。

[0014] また、上記第１～第４いずれかの構成から成る発電装置は、前記誘電体と
前記エレクトレットとを離間させるように互いに反発し合う磁石をさらに有
する構成（第５の構成）にする
とよい。

[0015] また、上記第５の構成から成る発電装置において、前記磁石は、その表面
が前記誘電体及び前記エレクトレットの表面とそれぞれ面一となるように形
成されている構成（第６の構成）にする
とよい。

[0016] また、上記第１～第６いずれかの構成から成る発電装置において、前記エ
レクトレット支持部材は、所定のばね定数を持つばね部材を含む構成（第７
の構成）にする
とよい。

[0017] また、上記第７の構成から成る発電装置において、前記ばね定数は０．５
～５０Ｎ／ｍｍである構成（第８の構成）にする
とよい。

[0018] また、上記第１～第８いずれかの構成から成る発電装置は、前記可動マス
を弾性的に支持するマス支持部材をさらに有する構成（第９の構成）にする
とよい。

[0019] また、上記第１～第９いずれかの構成から成る発電装置は、前記誘電体と
前記エレクトレットを収納するパッケージをさらに有する構成（第１０の構
成）にする
とよい。

発明の効果

[0020] 本発明によれば、振動子のＺ軸成分の振動を拾って発電するため、エレクトレット

トレットや電極の微細パターニングが不要となる上、誘電体とエレクトレットが接触しても放電しないため、誘電体とエレクトレットとの接触を回避する必要もなくなる。従って、小型大出力の発電装置を提供することが可能となり、延いては、電池寿命を心配する煩わしさからユーザを解放することが可能となる。

図面の簡単な説明

- [0021] [図1]発電装置の第1構成例を示す模式図
- [図2]発電装置の等価回路図
- [図3]測定系の概略図
- [図4]コロナ放電装置の説明図
- [図5]可変抵抗と出力電圧及び発電電力との関係を示すテーブル
- [図6]可変抵抗と出力電圧との関係を示すグラフ
- [図7]可変抵抗と発電電力との関係を示すグラフ
- [図8A]最大電力出力時のオシロスコープ波形図
- [図8B]ギャップ距離Gに対する出力電圧 V_m のシミュレーション波形
- [図9]誘電体裏面の電氣的接続状態による発電量の比較図
- [図10]発電装置の第2構成例を示す模式図
- [図11]発電装置の第3構成例を示す模式図
- [図12]発電装置の第1パッケージング例を示す模式図
- [図13]発電装置の第2パッケージング例を示す模式図
- [図14]発電装置の第3パッケージング例を示す模式図
- [図15]発電装置の第4パッケージング例を示す模式図
- [図16]発電装置の第5パッケージング例を示す模式図
- [図17]発電装置の第6パッケージング例を示す模式図
- [図18]発電装置の第7パッケージング例を示す模式図
- [図19]発電装置の第8パッケージング例を示す模式図
- [図20]誘電体の第1ガイド例を示す模式図
- [図21]誘電体の第2ガイド例を示す模式図

- [図22]グランドリングの第1適用例を示す模式図
- [図23]グランドリングの第2適用例を示す模式図
- [図24]誘電体の形状と下部電極の形状との組み合わせ例を示す模式図
- [図25]下部電極の第1形状例を示す模式図
- [図26]下部電極の第2形状例を示す模式図
- [図27]下部電極の第3形状例を示す模式図
- [図28]3軸化を実現するための第1構造を示す模式図
- [図29]3軸化を実現するための第2構造を示す模式図
- [図30]3軸化を実現するための第3構造を示す模式図
- [図31]3軸化を実現するための第4構造を示す模式図
- [図32]誘電体の比誘電率と発電量との関係を示すグラフ
- [図33]発電装置の第1変形例を示す模式図
- [図34]反発係数と最大発電量との相関図
- [図35]発電装置の第2変形例を示す模式図
- [図36]衝突回数と最大発電量との相関図（磁石あり／磁石なし）
- [図37]発電装置の第3変形例を示す模式図
- [図38]出力電圧の時間変化を示す図（ばね／ゲル）
- [図39]瞬時電力の時間変化を示す図（ばね／ゲル）
- [図40]発電量及び抵抗値の測定結果を示すテーブル（ばね／ゲル）
- [図41]出力電圧の時間変化を示す図（実験／解析）
- [図42]出力電圧、マス変位、及び、エレクトレット変位の時間変化を示す図
- [図43]ばね定数と発電量との相関図
- [図44]加速度と全振幅との相関図
- [図45]発電装置の第4変形例を示す模式図
- [図46]振動型発電装置の一従来例を示す模式図

発明を実施するための形態

[0022] <第1構成例>

図1は、発電装置の第1構成例を示す模式図（横方向から見た断面図）で

ある。第1構成例の発電装置10は、誘電体11と、エレクトレット12と、下部電極13と、抵抗14と、上部電極15と、基板16と、空隙層17とを有する。なお、図1の上段には、発電装置10の第1状態（誘電体11とエレクトレット12とが離間した状態）が描写されており、図1の下段には、発電装置10の第2状態（誘電体11とエレクトレット12とが接近した状態）が描写されている。

[0023] 以下では、説明の便宜上、特に断りのない限り、紙面の上端側を鉛直上方向と定義し、誘電体11が上下方向（鉛直方向）に振動する構成を前提とした説明を行うが、誘電体11の振動方向はこれに限定されるものではなく、例えば、紙面を90度回転させることにより、誘電体が左右方向（水平方向）に振動する構成とすることも当然に可能である。

[0024] 誘電体11は、発電装置10に与えられる振動によってエレクトレット12に対する相対位置が変化する可動体である。誘電体11の下面は、空隙層17を挟んでエレクトレット12の上面と対向している。誘電体11としては、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）やチタン酸バリウム（BTO）などを用いることができる。これについては後述する。誘電体11は、板状に形成してもよいし膜状に形成してもよい。例えば、基板自体を誘電体で形成してもよいし、基板上に薄膜印刷技術で誘電体膜を形成してもよいし、或いは、別途の工程で形成しておいた板状の誘電体を基板上に貼り付けてもよい。

[0025] エレクトレット12は、電荷を半永久的に保持する部材である。エレクトレット12としては、サイトップ〔登録商標〕などの高分子化合物に電荷を保持させた有機エレクトレットを用いてもよいし、シリコン酸化物（ SiO_2 ）やシリコン窒化物（ SiN ）などの基材に電荷を保持させた無機エレクトレットを用いてもよい。エレクトレット12は、下部電極13の全面を被覆するように形成されている。このように、下部電極13を露出させない構成とすることにより、エレクトレット12への電荷注入に際して、露出した下部電極13への電荷流出を防止することができるので、エレクトレット12への電荷注入効率を高めることが可能となる。

- [0026] 下部電極 13 は、エレクトレット 12 の下面側（誘電体 11 と対向していない側）に接続された第 1 電極に相当する。下部電極 13 は、抵抗 14 を介して接地端に接続されている。下部電極 13 としては、アルミニウム電極などを用いることができる。
- [0027] 抵抗 14 は、発電装置 10 の振動によって下部電極 13 と接地端との間に流れる電流を電圧として取り出すための負荷である。
- [0028] 上部電極 15 は、誘電体 11 の上面（エレクトレット 12 と対向していない側）に接続された第 2 電極に相当する。上部電極 15 は、接地端に直接接続されている。上部電極 15 としては、アルミニウム電極などを用いることができる。
- [0029] 基板 16 は、エレクトレット 12 及び下部電極 13 を担持するための板状部材である。基板 16 としては、石英基板や酸化膜付きシリコンウェハなどを用いることができる。ただし、寄生容量抑制の観点から言えば、酸化膜付きシリコンウェハよりも石英基板などを用いる方が望ましい。
- [0030] 空隙層 17 は、誘電体 11 とエレクトレット 12 との間に挟まれた空間である。空隙層 17 の厚み（誘電体 11 とエレクトレット 12 を隔てるギャップ距離）は、振動に伴う誘電体 11 の変位によって変化する。空隙層 17 は、低真空状態（高真空状態や超高真空状態ではない状態）としてもよいし、若しくは、空気、不活性ガス（ N_2 など）、或いは、放電防止効果のあるガス（例えば主成分として SF_6 を含むガス）等を充填してもよい。空隙層 17 を低真空状態とする場合、脱気工程を用いてもよいし、或いは、何らかの高温処理時に空隙層 17 からガスが抜けて自然に低真空状態となる現象を利用してもよい。空隙層 17 を高真空状態や超高真空状態にしない方が好ましい理由は、エレクトレット 12 の放電を回避するためである。なお、本明細書中において、「低真空状態」とは大気圧～ 10^{-1} Pa の状態を指し、「高真空状態」とは 10^{-1} ～ 10^{-5} Pa の状態を指し、「超高真空状態」とは 10^{-5} 以下の状態を指すものとする。また、空隙層 17 に水分が含まれていると、エレクトレット 12 の表面に水分子が付着して電荷が抜けやすくなるので、空隙層

17に含まれる水分は十分に除去して湿度の低い状態としておくことが望ましい。

[0031] 上記したように、第1構成例の発電装置10は、少なくとも一对の誘電体11とエレクトレット12を有し、誘電体11とエレクトレット12とのギャップ距離が変化することによって発電を行う構成とされている。以下では、その発電原理について説明する。

[0032] 図1上段で示したように、発電装置10の第1状態（誘電体11とエレクトレット12とが離間した状態）では、エレクトレット12に保持された負の固定電荷（図1では、白色の四角印にマイナス符号を付したシンボルとして描写）に引き寄せられて、下部電極13の表面（エレクトレット12との界面）に金属内正電荷（図1では、白色の丸印にプラス符号を付したシンボルとして描写）が誘起される。この金属内正電荷は、下部電極13（金属）中のある箇所から自由電子が排除された結果、周囲に存在する自由電子との電位差により正電荷としての性質を帯びたものである。従って、上記の物理現象については、エレクトレット12に保持された負の固定電荷によって、下部電極13内の正電荷が引き寄せられると言うよりも、下部電極13内の自由電子が遠ざけられると言う方が正しい。なお、下部電極13内の金属内正電荷は接地端から供給される（下部電極13内の自由電子は接地端に移動する）ので、下部電極13の電位は0Vのままである。

[0033] 一方、図1下段で示したように、発電装置10が上記の第1状態から第2状態（誘電体11とエレクトレット12とが接近した状態）に遷移すると、エレクトレット12に保持された負の固定電荷によって誘電体11の内部が分極され、誘電体11の下面に正の分極電荷（図1では、黒色の丸印にプラス符号を付したシンボルとして描写）が局在化する。このとき、第1状態で生じていたエレクトレット12内の負電荷と下部電極13内の正電荷との対応関係（の一部）が解消される。この現象により、下部電極13内には一時的に余剰の正電荷が生じる。ただし、下部電極13は抵抗14を介して接地端に接続されているので、一時的に上昇した下部電極13の電位が0Vにな

るまで、下部電極 13 から接地端に向けた余剰の正電荷の移動（電流）が生じる。なお、図 1 の下段では、下部電極 13 から正電荷の一部が移動した後の状態が示されている。下部電極 13 から流出しなかった残りの電荷が Q_1 である。

[0034] また、上記とは逆に、発電装置 10 が第 2 状態から第 1 状態に遷移したときには、接地端から下部電極 13 に向けた正電荷の移動（すなわち電流）が生じるので、この電流を電気エネルギーとして取り出すことができる。

[0035] なお、発電装置 10 の第 2 状態では、誘電体 11 の内部分極によって誘電体 11 の上面に負の分極電荷（図 1 では、黒色の丸印にマイナス符号を付したシンボルとして描写）が局在化する。従って、上部電極 15 の上面（誘電体 11 との界面）には、上記した負の分極電荷に引き寄せられて金属内正電荷が誘起される。ただし、上部電極 15 内の金属内正電荷は接地端から供給されるので、上部電極 15 の電位は 0 V のままである。

[0036] 電磁気学的に見ると、発電装置 10 の第 2 状態は、第 1 状態よりも静電ポテンシャルエネルギーが低い状態（第 1 状態よりも正電荷と負電荷との距離が近い安定状態）である。従って、外部から運動エネルギー（振動）を与えることにより、発電装置 10 を第 1 状態と第 2 状態との間で遷移させてやれば、運動エネルギーを電気エネルギーに変換することが可能となる。

[0037] 特に、第 1 構成例の発電装置 10 は、誘電体 11 の上面に上部電極 15 が設けられると共に、この上部電極 15 が接地端に接続された構成とされている。このような構成とすることにより、発電装置 10 の第 2 状態において、上部電極 15 の内部に電位差を生じることがないので、第 2 状態のポテンシャルエネルギーを引き下げて、発電効率を高めることが可能となる。

[0038] <等価回路図>

図 2 は、発電装置 10 の等価回路図である。なお、符号 C_1 はエレクトレット 12 の静電容量（固定値）を示しており、符号 C_2 は誘電体 11 の静電容量（固定値）を示しており、符号 C_3 は空隙層 17 の静電容量（可変値）を示しており、符号 C_4 は誘電体 11 と空隙層 17 の直列合成容量（ $C_4 =$

$C_2 \times C_3 / (C_2 + C_3)$) を示している。また、符号 R は抵抗 14 の抵抗値（固定値）を示している。

[0039] この等価回路において最も注目すべき点は、電源の役割を果たすエレクトレット 12 が一定の電荷 Q を保持する「定電荷源」と呼称すべき存在であるということである。

[0040] 発電装置 10 を第 1 状態（図 1 上段）から第 2 状態（図 1 下段）に遷移させると、誘電体 11 側にも電荷が分配される。一定の電荷に対して分配するコンデンサの静電容量が増加すればコンデンサの電位は低下する。現象としては、コンデンサに電荷を充電した後、電源から切り離して別のコンデンサと接続した場合に等しい。

[0041] このとき、エレクトレット 12 と下部電極 13 との間のコンデンサに残存する電荷を Q_1 とし、誘電体 11 中の誘導電荷と対になる電荷を Q_2 とし、接点 A - A' 間の電位差を V とした場合、次の（1）式及び（2）式が成立する。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \dots \quad (1)$$

$$V = Q_1 / C_1 = Q_2 / C_4 \quad \dots \quad (2)$$

[0042] また、上記の（1）式及び（2）式により、電荷 Q_1 は、次の（3）式で表される。

$$Q_1 = Q \times C_1 / (C_1 + C_4) \quad \dots \quad (3)$$

[0043] （3）式において、エレクトレット 12 の電荷 Q 及び静電容量 C_1 は固定値であり、誘電体 11 と空隙層 17 の直列合成容量 C_4 は、空隙層 17 の厚み（延いては、空隙層 17 の静電容量 C_3 ）に応じて変化する可変値である。従って、振動に伴う誘電体 11 の変位に応じて直列合成容量 C_4 が変化すると、電荷 Q_1 と電荷 Q_2 の割合が変化する。発電装置 10 では、この容量変化に伴う電荷の再分配が電流として取り出される。

[0044] 以下、発電量について定式化する。ある時間 t に回路中を流れる電流 i は、電荷 Q_1 の時間微分として与えられる。ある関数 f の時間微分を f' と表記するとき、電流 i は上記（3）式に基づいて次の（4）式で表される。

$$\begin{aligned}
 i &= Q_1' = \{Q \times C_1 \times (C_1 + C_4)^{-1}\}' \\
 &= Q \times C_1 \times \{(C_1 + C_4)^{-1}\}' \\
 &= Q \times C_1 \times \{-(C_1 + C_4)^{-2}\} \times C_4' \quad \dots \quad (4)
 \end{aligned}$$

[0045] また、空隙層 17 の直列合成容量 C_4 は、誘電体 11 の静電容量 C_2 と空隙層 17 の静電容量 C_3 を用いて次の (5) 式で表される。

$$C_4 = (C_2^{-1} + C_3^{-1})^{-1} \quad \dots \quad (5)$$

[0046] 上記 (5) 式より、直列合成容量 C_4 の時間微分 C_4' は、次の (6) 式で表される。

$$\begin{aligned}
 C_4' &= \{(C_2^{-1} + C_3^{-1})^{-1}\}' \\
 &= \{(C_3 / C_2 + 1)^{-2}\} \times C_3' \quad \dots \quad (6)
 \end{aligned}$$

[0047] 誘電体 11 とエレクトレット 12 とのギャップ距離が時間的に変化するとき、同時に空隙層 17 の静電容量 C_3 も変化する。ここで、初期状態における誘電体 11 とエレクトレット 12 とのギャップ距離を X_0 とし、さらに、誘電体 11 が振幅 A 、角速度 ω で単振動している場合、空隙層 17 の容量 C_3 、及び、その時間微分 C_3' は、次の (7) 式及び (8) 式で表される。なお、式中の符号 ϵ_0 は、真空の誘電率 ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) である。

$$C_3 = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times S \times \{X_0 + A \times \sin(\omega \times t)\}^{-1} \quad \dots \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 C_3' &= -\epsilon_0 \times \epsilon_r \times S \times A \times \omega \times \cos(\omega \times t) \\
 &\quad \times \{X_0 + A \times \sin(\omega \times t)\}^{-2} \quad \dots \quad (8)
 \end{aligned}$$

[0048] そして、電流 i が流れることにより、発電装置 10 に設けられた抵抗 14 の両端から出力される電圧 V_2 は、抵抗 14 の抵抗値 R を用いて次の (9) 式で表される。

$$V_2 = i \times R \quad \dots \quad (9)$$

[0049] また、抵抗 14 より取り出される電力 P は、電流 i の平均値 I 及び抵抗 14 の抵抗値 R を用いて次の (10) 式で表される。なお、式中の符号 T は、誘電体 11 の振動周期であり、 $T = 2 \times \pi / \omega$ で与えられる。

$$P = I^2 \times R = T^{-1} \times \int_0^T i^2 dt \times R \quad \dots \quad (10)$$

[0050] 上記の (9) 式に基づいた出力電圧波形のシミュレーション値を図 8 B に

示す。定式化に基づく出力波形は、正弦波ではなく理論的に正弦波から歪んだ波形となる（詳細については後述）。

[0051] ここで有用な役割を果たすのが、誘電体 11 とエレクトレット 12 との間に存在する空隙層 17 である。この空隙層 17 の静電容量 C_3 が大きくなるほど、すなわち、空隙層 17 の厚み（ギャップ距離）が小さくなるほど、誘電体 11 中の分極電荷量が大きくなり、それに応じて発電量も増大する。

[0052] 先にも述べたように、第 1 構成例の発電装置 10 は、エレクトレットと対向電極を互いに対面させた従来構成（図 46 を参照）と異なり、誘電体 11 とエレクトレット 12 を互いに対面させているので、誘電体 11 とエレクトレット 12 を接近（ないしは接触）させても、基本的にエレクトレット 12 の放電を生じることはない。

[0053] 従って、第 1 構成例の発電装置 10 であれば、誘電体 11 とエレクトレット 12 を隔てるギャップ距離の変化に応じて発電を行う際、そのギャップ距離が最小でゼロとなるまで誘電体 11 とエレクトレット 12 とを接近させることができるので、極めて大きな発電量（mW オーダー）を得ることが可能となる。

[0054] <発電実験>

[測定系]

図 3 は、発電実験に用いた測定系の概略図である。今回の発電実験に用いられた測定系 X は、誘電体 X1 と、アルミ板 X2 と、電磁式加振機 X3 と、試料 X4 と、アルミ板 X5 と、3 軸ステージ X6 と、土台 X7 と、同軸ケーブル X8 と、同軸ケーブル X9 と、シールドケース X10 と、同軸ケーブル X11 と、ローパスフィルタ X12 と、同軸ケーブル X13 と、オシロスコープ X14 と、を含む。

[0055] 誘電体 X1（図 1 の誘電体 11 に相当）は、上面が試料 X4 の下面と対向されており、下面がアルミ板 X2 に接続されている。誘電体 X1 としては、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）が用いられている（本実験で使用した PZT の誘電率は 2,600 である）。

- [0056] アルミ板X2（図1の上部電極15に相当）は、その上面に誘電体X1が接続されている。アルミ板X2は、測定系Xの接地端に直接接続されている。
- [0057] 電磁式加振機X3は、アルミ板X2の上面に接続された誘電体X1に対して上下方向の振動（周波数40Hz）を与える。
- [0058] 試料X4（図1のエレクトレット12、下部電極13、及び、基板16に相当）は、上面側の石英基板（厚さ：1.0mm）がアルミ板X5に接続されており、下面側のエレクトレット（厚さ：5.6 μ m）が誘電体X1の上面と対向されている。エレクトレットとしては、サイトップ〔登録商標〕が用いられている。エレクトレットには、パターニングが施されていない。一方、エレクトレットに被覆された下部電極には、櫛歯アレイ状（幅：30 μ m、ピッチ：60 μ m）のパターニングが施されている。下部電極は、同軸ケーブルX8の第1端に接続されている。
- [0059] アルミ板X5は、試料X4を支持する。
- [0060] 3軸ステージX6は、アルミ板X5に担持された試料X4を3軸方向に移動させる。
- [0061] 土台X7は、3軸ステージX6を支持する。
- [0062] 同軸ケーブルX8は、第1端が試料X4の下部電極と接続されており、第2端が同軸ケーブルX9の第1端に接続されている。
- [0063] 同軸ケーブルX9は、第1端が同軸ケーブルX8の第2端に接続されており、第2端がシールドケースX10の第1コネクタX10aに接続されている。
- [0064] シールドケースX10は、ロード抵抗 R_v 、 R （図1の抵抗14は R_v と R の直列合成抵抗に相当）を格納する。シールドケースX10の本体は、測定系Xの接地端に接続されている。シールドケースX10の第1コネクタX10aは、ロード抵抗 R_v 、 R を介して測定系Xの接地端に接続されている。このように、測定系Xでは、試料X4とロード抵抗 R_v 、 R との間がリード線ではなく、同軸線によって接続されている。ロード抵抗 R_v 、 R の接続

ノードは、出力電圧 V_m の計測ノードとしてシールドケース X 10 の第 2 コネクタ X 10 b に接続されている。第 2 コネクタ X 10 b のグラウンドラインは、測定系 X の接地端に接続されている。ロード抵抗 R_v 、 R のうち、第 1 コネクタ X 10 a と第 2 コネクタ X 10 b との間に接続される抵抗 R_v （その両端電圧が計測されない抵抗）は、可変抵抗（ポテンショメータ）とされており、第 2 コネクタ X 10 b と接地端との間に接続される抵抗 R （その両端電圧が出力電圧 V_m として計測される抵抗）は、固定抵抗（ $100\text{ k}\Omega$ ）とされている。

[0065] 同軸ケーブル X 11 は、シールドケース X 10 の第 2 コネクタ X 10 b とローパスフィルタ X 12 の入力端との間を接続する。

[0066] ローパスフィルタ X 12 は、出力電圧 V_m に重畳するノイズを除去する。ローパスフィルタ X 12 のカットオフ周波数 f_c は、 200 Hz に設定されている。

[0067] 同軸ケーブル X 13 は、ローパスフィルタ X 12 の出力端とオシロスコープ X 14 の入力端との間を接続する。

[0068] オシロスコープ X 14 は、出力電圧 V_m の波形（電気信号の時間的变化）をグラフとして表示する。オシロスコープ X 14 に表示されるグラフでは、縦軸が電圧値となり、横軸が時間となる。オシロスコープ X 14 のグラウンド端子は、測定系 X の接地端に接続されている。

[0069] [実験手順]

測定系 X を用いた実験手順は次の通りである。ステップ S 1 では、試料 X 4 のエレクトレットに対して図 4 で示したコロナ放電装置 Y を用いて所定の条件（コロナ放電電圧： 10 kV 、 0.1 mA 、グリッド電圧 1.5 kV ）で電荷の注入を行う。なお、図 4 において、符号 X 41、X 42、X 43 は、それぞれ、試料 X を形成する構成要素（エレクトレット、下部電極、基板）を示している。また、符号 Y 1～Y 4 は、それぞれ、コロナ放電装置 Y を形成する構成要素（グリッド、放電電極針、グリッド用電源、直流高圧電源）を示している。ステップ S 2 では、試料 X 4 の表面電位を測定する。ステ

ップS 3では、測定系Xに試料X 4を接続する。ステップS 4では、誘電体X 1を電磁式加振機X 3によって振動させる。ステップS 5では、誘電体X 1と試料X 4との接近／離間に応じて生じる出力電圧V_mの波形をオシロスコープで観察する。ステップS 6では、可変抵抗R_vの抵抗値を変更しながらステップS 4～ステップS 6を繰り返す。ステップS 7では、得られた出力電圧V_mに基づいて発電装置10の発電電力Pを算出する。

[0070] まず、出力電圧V_mの平均値V_{ms}を次の(11)により算出する。

$$V_{ms} = T^{-1} \times \int_0^T V_m dt \quad \dots \quad (11)$$

[0071] ただし、出力電圧V_mの波形が正弦波に近い場合、出力電圧V_mの最大振幅V_{pp}（ピークトゥピーク値）を計測することで、 $V_{ms} \div 0.354 \times V_{pp}$ という式により、平均値V_{ms}の概算値を求めることが可能である。

[0072] 次に、ロード抵抗(R + R_v)に発生する電圧V_Lを次の(12)式により算出する。

$$V_L = V_{ms} \times (R + R_v) / R \quad \dots \quad (12)$$

[0073] そして、次の(13)式を用いて電圧V_Lから発電電力Pを算出することができる。

$$P = V_L^2 / (R + R_v) \quad \dots \quad (13)$$

[0074] [実験結果]

まず、試料X 4の表面電位測定結果について説明する。ステップS 1の電荷注入後における試料X 4表面の平均電位は、約−525Vとなっていた。

[0075] 次に、可変抵抗R_vの抵抗値を変化させながら実施された振動発電実験の結果について説明する。図5は、可変抵抗R_v [MΩ]と出力電圧V_mの最大振幅V_{pp} [V]及び発電電力P_m [μW]との関係を示すテーブルである。図6は、可変抵抗R_v [MΩ]と出力電圧V_mの最大振幅V_{pp} [V]との関係を示すグラフである。図7は、可変抵抗R_v [MΩ]と発電電力P_m [μW]との関係を示すグラフである。可変抵抗R_vが10MΩであるときに、発電電力P_mが最大値(975 [μW] = 0.97 [mW])となることが確認された。このように、測定系Xを用いた振動発電実験では、極め

て大きな発電量（mWオーダ）を得ることができた。

[0076] 図8Aは、最大電力出力時のオシロスコープ波形図である。図8Aの上段には振動シミュレータの駆動波形が描写されており、駆動信号が正弦波であることから、電磁式加振機X3に設置された誘電体X4は単振動していることが分かる。一方、図8Aの下段には出力電圧 V_m の出力波形が描写されている。この出力電圧 V_m の出力波形は、正弦波とは異なる形状をしている。ただし、この波形はノイズ等の外乱要素により正弦波が歪んだものではなく、理論的に正しい波形である。このことを次項で説明する。

[0077] 図8Bは、ギャップ距離 G に対する出力電圧 V_m のシミュレーション波形である。図8Bの上段には試料X1と誘電体X4とのギャップ距離が描写されており、図8Bの下段には先出の(3)式から(9)式を用いて理論的に算出した測定系Xの出力電圧 V_m が描写されている。計算に使用したパラメータには、実際の発電実験において測定系Xで用いた試料X1、誘電体X4、抵抗 R 及び R_v の持つパラメータと同一の数値を入力した。ただし、試料X1と誘電体X4とのギャップ距離 G の初期値（すなわち(7)式中の X_0 ）、及び、電磁式加振機X3が誘電体X4に与えた振動の振幅（すなわち(7)式中の A ）については、正確な数値が測定できなかった。そこで、試料X1と誘電体X4とのギャップ距離 G が図8Bの上段に描写した波形のように変化したと仮定して演算を行った。図8Aと図8Bの波形は非常によく一致しており、測定された出力電圧 V_m が提案する原理に基づいた発電の結果として出力されたことが証明されたと言える。

[0078] 次に、誘電体X1の裏面におけるアルミ板X2の電氣的接続と発電量との関係について説明する。アルミ板X2を測定系Xの接地端から切り離した状態で、先と同様の振動発電実験を行った。図9は、誘電体X1裏面の電氣的接続状態による発電量の比較図である。図9で示したように、アルミ板X2を測定系Xの接地端に接続した場合（黒塗りの棒グラフ）と接続しない場合（ハッチング付きの棒グラフ）とでは、出力電圧 V_m の最大振幅 V_{pp} 及び発電電力 P_m の双方に差違を生じることが確認された。この現象について、

次の第2構成例及び第3構成例を挙げながら詳細に説明する。

[0079] <第2構成例>

図10は、発電装置の第2構成例を示す模式図である。第2構成例の発電装置10は、第1構成例とほぼ同様の構成であり、誘電体11の上面側に設けられていた上部電極15が取り除かれた点に特徴を有している。すなわち、第2構成例の発電装置10は、誘電体11に何ら電極が接続されていない構成であると言える。別の見方をすれば、第2構成例の発電装置10は、誘電体11を含む可動部の全体が電氣的にフローティング状態（何らかの電位点に接続されていない状態）とされた構成であるとも言える。なお、誘電体11を含む可動部の全体は、例えば絶縁体（絶縁性のバネなど）で保持するとよい。

[0080] 先述の第1構成例と異なり、第2構成例の発電装置10では、誘電体11とエレクトレット12とを接近させた第2状態（図10下段）において、静電ポテンシャルエネルギーが高い状態（不安定な状態）となるので、第1構成例と比べると発電量が低下する。しかし、第2構成例の発電装置10では、振動する誘電体11に配線を接続する必要がないので、デバイス作製の容易性や発電動作の安定性の点では、第1構成例よりも有利である。

[0081] <第3構成例>

図11は、発電装置の第3構成例を示す模式図である。第3構成例の発電装置10は、第1構成例とほぼ同様の構成であり、誘電体11の上面側に電氣的にフローティング状態の金属体18が形成されている点に特徴を有している。金属体18は、何らかの電位点（接地端）に接続されることを意図した上部電極15とは異なり、電氣的にフローティング状態とされた金属製の部材である。従って、第3構成例の発電装置10は、誘電体11を含む可動部の全体が電氣的にフローティング状態とされた構成であるという点で、先の第2構成例と共通する。なお、金属体18は、板状であっても膜状であっても構わない。

[0082] 第3構成例の発電装置10では、誘電体11とエレクトレット12とを接

近させた第2状態（図11下段）において、誘電体11の内部分極によって誘電体11の上面に負の分極電荷が局在化する。従って、金属体18の下面（誘電体11との界面）には、上記した負の分極電荷に引き寄せられて金属内正電荷が誘起される。

[0083] 先述の第1構成例と異なり、第3構成例の発電装置10では、金属体18が接地端に接続されていないので、接地端から金属体18に正電荷を引き寄せることはできない。しかしながら、金属体18には、多数の自由電子（図11では、白色の丸印にマイナス符号を付したシンボルとして描写）が存在するので、この自由電子が金属体18と誘電体11との界面から遠ざかることにより、接地端から金属体18に正電荷が引き寄せられたときと同様の効果が得られる。

[0084] 上記の効果により、第3構成例の発電装置10は、上部電極15を完全に排除した第2構成例よりも高い発電量を得ることが可能となる。ただし、第3構成例の発電装置10では、金属体18内部に生じる電荷の偏り（電位差）によって上記の効果が阻害される。従って、第3構成例の発電装置10は、上部電極15が接地端に接続された第1構成例と比べると発電量が低下する。しかし、第3構成例の発電装置10では、先述の第2構成例と同じく、振動する誘電体11に配線を接続する必要がないので、デバイス作製の容易性や発電動作の安定性の点では、第1構成例よりも有利である。

[0085] このように、発電量に関して見れば、第1構成例＞第3構成例＞第2構成例という優劣があり、また、デバイス作製の容易性や発電動作の安定性に関して見れば、第2構成例＝第3構成例＞第1構成例という優劣がある。従って、発電装置10の構成については、いずれか一つが常に最善であると言うことはできず、その用途や要求される特性に応じて、第1～第3構成例のいずれかを採用することが望ましい。

[0086] ＜パッケージング＞

図12は、発電装置の第1パッケージング例を示す模式図（横方向から見た断面図）である。第1パッケージング例の発電装置20は、基板21と、

下部電極 22 と、エレクトレット 23 と、誘電体 24（誘電体、電極、重錘が一体となったもの）と、パッケージ 25 と、接着剤 26 と、ワイヤ 27 と、を有する。なお、以下の説明において、誘電体 24 に接続される上部電極の有無は問わない。

[0087] 下部電極 22 は、基板 21 の上面に形成されている。エレクトレット 23 は、下部電極 22 を被覆するように形成されている。ただし、下部電極 22 の一端は、エレクトレット 23 から露出して基板 21 の端部まで延出されており、その端部においてワイヤ 27 と接続されている。ワイヤ 27 は、不図示の抵抗を介して接地端に接続されている。パッケージ 25 は、一面に開口部が設けられたカバー部材（円筒、柱筒、半球など）であり、内部にエレクトレット 23 と誘電体 24 を収納する形で開口部が基板 21 と接着剤 26 により接合されている。パッケージ 25 は、レジンやアクリルなどの樹脂製とすればよい。

[0088] 第 1 パッケージング例の発電装置 20 において、誘電体 24 は、何ら支持されることなくパッケージ 24 の内壁に沿って変位自在（上下動自在）に収納されている。発電装置 20 が静止状態であるとき、誘電体 24 は静電引力によってエレクトレット 23 と接近した状態（図 1 下段の第 2 状態に相当）となる。従って、外部から運動エネルギー（振動）を与えることにより、誘電体 24 をエレクトレット 23 から離間させてやれば、運動エネルギーを電気エネルギーに変換することが可能となる。

[0089] 図 1 3 は、発電装置の第 2 パッケージング例を示す模式図である。第 2 パッケージング例は、第 1 パッケージング例とほぼ同様の構成であり、パッケージ 25 の内部で誘電体 24 を吊下支持する弾性部材 31 を有する点に特徴を有している。弾性部材 31 としては、コイルバネや蛇腹バネ（ミアンダ形状）を用いればよい。このような構成とすることにより、誘電体 24 をエレクトレット 23 から離間するための運動エネルギーを引き下げることができるので、より小さな振動によって発電を行うことが可能とある。また、パッケージ 25 の天面と誘電体 24 との接触を防止することも可能となる。

[0090] 図14は、発電装置の第3パッケージング例を示す模式図である。第3パッケージング例は、第1パッケージング例とほぼ同様の構成であり、パッケージ25の内部で誘電体24を両端支持する弾性部材32を有する点に特徴を有している。弾性部材32としては、コイルバネや蛇腹バネ（ミアンダ形状）を用いればよい。このような構成とすることにより、誘電体24の上下動を阻害することなく、パッケージ25の内側面と誘電体24との接触を防止することが可能となる。

[0091] 図15は、発電装置の第4パッケージング例を示す模式図である。第4パッケージング例は、第1パッケージング例とほぼ同様の構成であり、パッケージ25の天面で誘電体24を反発する弾性部材33を有する点に特徴を有している。弾性部材33としては、板バネを用いればよい。このような構成とすることにより、誘電体24の上下動を阻害することなく、パッケージ25の天面と誘電体24との接触を防止することが可能となる。

[0092] 図16は、発電装置の第5パッケージング例を示す模式図（上方向から見た断面図）である。第5パッケージング例は、第1パッケージング例とほぼ同様の構成であり、パッケージ25の内部で誘電体24の水平移動を抑制しつつ上下動を支持する弾性部材34を有する点に特徴を有している。第5パッケージング例の振動装置20において、誘電体24及びパッケージ25は、平面視したときの断面が矩形状となるように形成されている。弾性部材34としては、誘電体24の4側面を各々と直交する支持面（パッケージ25の内側面）から片持支持する4つの板バネを組み合わせたもの（いわゆる𠄎バネ）を用いればよい。このような構成とすることにより、誘電体24の上下動を阻害することなく、パッケージ25の内側面と誘電体24との接触を防止することが可能となる。

[0093] 図17は、発電装置の第6パッケージング例を示す模式図である。第6パッケージング例は、第1パッケージング例とほぼ同様の構成であり、誘電体24とパッケージ25に各々反発し合う磁石35a及び35b（磁力バネ）を有する点に特徴を有している。このような構成とすることにより、誘電体

24の上下動を阻害することなく、パッケージ25の天面と誘電体24との接触を防止することが可能となる。

[0094] 図18は、発電装置の第7パッケージング例を示す模式図である。第7パッケージング例は、第1パッケージング例とほぼ同様の構成であり、誘電体24とエレクトレット23に各々反発し合う磁石36a及び36b（磁力バネ）を有する点に特徴を有している。このような構成とすることにより、誘電体24をエレクトレット23から離間するための運動エネルギーを引き下げることができるので、より小さな振動によって発電を行うことが可能とある。また、エレクトレット23と誘電体24との接触を防止することもできる。

[0095] 図19は、発電装置の第8パッケージング例を示す模式図である。第8パッケージング例は、第1パッケージング例とほぼ同様の構成であり、エレクトレット23の表面から突起したストッパ37を有する点に特徴を有している。なお、ストッパ37は、誘電体24の表面に設けてもよい。このような構成とすることにより、誘電体24をエレクトレット23から離間するための運動エネルギーを引き下げることができるので、より小さな振動によって発電を行うことが可能とある。また、エレクトレット23と誘電体24との接触を防止することもできる。

[0096] なお、上記の第1～第8パッケージング例で個別に説明した構成については、任意の組み合わせが可能である。また、バネを設けた構成では、発電装置20に与えられる振動の周波数がバネ固有の共振周波数と一致するように、バネ定数を設計することが望ましい。一方、発電装置20に与えられる振動の周波数が不定である場合には、バネを設けない構成を採用するか、柔らかいバネ（バネ定数の小さいバネ）を用いることが望ましい。

[0097] <誘電体のガイド機構>

図20は、誘電体の第1ガイド例を示す模式図（上面図及び横方向からの断面図）である。第1ガイド例の振動装置20において、誘電体24及びパッケージ25は、発電装置20を平面視したときに、各々の外縁ないし内縁

が円形状となるように形成されている。誘電体 24 は、パッケージ 25 の内壁との間にボール部材 38（鋼球）を挟み込んだ形で収納されている。ボール部材 38 は、発電装置 20 を平面視したときに、誘電体 24 の外縁周（パッケージ 25 の内縁周）を 4 等分する位置に各々設けられている。誘電体 24 には、ボール部材 38 の当接位置にそれぞれ上下方向のレール溝 24 a が形成されている。一方、パッケージ 25 の内壁には、ボール部材 38 の当接位置にそれぞれ凹状の球受部 25 a が形成されている。このような構成とすることにより、誘電体 24 の上下動を阻害することなく、パッケージ 25 の内側面と誘電体 24 との接触を防止することができる。

[0098] 図 21 は、誘電体の第 2 ガイド例を示す模式図（上面図及び横方向からの断面図）である。第 1 ガイド例と同様、第 2 ガイド例の振動装置 20 において、誘電体 24 及びパッケージ 25 は、発電装置 20 を平面視したときに、各々の外縁ないし内縁が円形状となるように形成されている。誘電体 24 は、パッケージ 25 の内壁に対してレール部材 39 を当接させた形で収納されている。レール部材 39 は、発電装置 20 を平面視したときに、誘電体 24 の外縁周（パッケージ 25 の内縁周）を 4 等分する位置に各々設けられている。パッケージ 25 の内壁には、レール部材 39 の当接位置にそれぞれ上下方向のレール溝 25 b が形成されている。このような構成とすることにより、誘電体 24 の上下動を阻害することなく、パッケージ 25 の内側面と誘電体 24 との接触を防止することができる。なお、レール部材 39 は、誘電体 24 を加工して一体的に形成してもよいし、誘電体 24 とは異なる摺動性の良い素材（フッ素樹脂など）で別途形成してもよい。

[0099] <グランドリング>

次に、誘電体側に電極を設けない構成（図 10 の第 2 構成例を参照）を採用する上で、有益となるグランドリングについて説明する。図 22 は、グランドリングの第 1 適用例を示す模式図（横方向からの断面図）である。なお、図中の矢印は電気力線を示している。第 1 適用例の発電装置 40 は、誘電体 41 と、エレクトレット 42 と、下部電極 43 と、抵抗 44 と、グランド

リング４５と、を有する。グランドリング４５は、所定の距離を隔ててエレクトレット４２と下部電極４３の周囲を取り囲むように形成された導電部材（例えばアルミニウム）である。なお、グランドリング４５は接地端に直接接続されている。

[0100] 発電装置４０において、誘電体４１とエレクトレット４２を接近させると、誘電体４１の内部分極により誘電体４１の上面に負の分極電荷が局在化する。ここで、第１適用例の発電装置４０であれば、誘電体４１の負電荷からグランドリング４５の正電荷に向けて電気力線を逃がすことができるので、誘電体４１の負電荷とエレクトレット４２の負電荷との反発を抑制することが可能となり、延いては、発電効率を高めることが可能となる。

[0101] 図２３は、グランドリングの第２適用例を示す模式図（横方向からの断面図）である。なお、図２３中の矢印は電気力線を示している。本図で示したように、グランドリング４５は、必ずしもエレクトレット４２と下部電極４３の周囲を取り囲むように形成する必要はなく、エレクトレット４２とグランドリング４５を互いに隣接させて交互に配置してもよい。このような構成であれば、誘電体４１内部で水平方向の分極が生じたときに、誘電体４１の負電荷からグランドリング４５の正電荷に向けて電気力線を逃がすことができるので、誘電体４１の負電荷とエレクトレット４２の負電荷との反発を抑制することが可能となり、延いては、発電効率を高めることが可能となる。

[0102] ＜誘電体及び下部電極の形状＞

図２４は、誘電体の形状と下部電極の形状との組み合わせ例を示す模式図である。本例の発電装置５０は、誘電体５１と、エレクトレット５２と、下部電極５３と、基板５４と、を有する。

[0103] 誘電体５１は、エレクトレット５２と対向する下面が平坦化された構成（図２４の左側を参照）としてもよいし、下面がパターンニングされた構成（図２４の右側を参照）としてもよい。前者の構成では、誘電体５１とエレクトレット５２とのギャップ距離を均一化することができる。後者の構成では、パターンニングにより先鋭化された箇所に電気力線が集まりやすくなるので、

パターニングの最適化によっては発電効率の向上が期待できる。

[0104] また、下部電極 5 3 は、パターニングを施すことなく面状（図 2 5）に形成してもよいし、或いは、パターニングを施して櫛歯状（図 2 6）や渦巻き状（図 2 7）に形成してもよい。ただし、発電効率を鑑みれば、前者の構成を採用することが望ましい。

[0105] なお、誘電体 5 1 の形状（パターニングあり／なし）と下部電極の形状（パターニングあり／なし）の組み合わせについては任意である。

[0106] <3 軸化>

図 2 8 は、3 軸化を実現するための第 1 構造を示す模式図である。第 1 構造の発電装置 6 0 は、誘電体 6 1 と、エレクトレット 6 2 と、下部電極 6 3 と、を有する。誘電体 6 1 には、凸部 6 1 a が複数形成されており、エレクトレット 6 2 には、所定の間隔を設けて凸部 6 1 a が嵌合される凹部 6 2 a が複数形成されている。また、図 2 8 では描写されていないが、発電装置 6 0 は、紙面の奥行方向にも同様の構造を有する。このような構造を採用することにより、誘電体 6 1 が紙面の上下方向に振動する場合であっても、誘電体 6 1 が紙面の左右方向に振動する場合であっても、或いは、誘電体 6 1 が紙面の奥行方向に振動する場合であっても、誘電体 6 1 とエレクトレット 6 2 とのギャップ距離が変化するので、効率よく発電を行うことが可能となる。

[0107] また、第 1 構造の発電装置 6 0 において、エレクトレット 6 2 は、誘電体 6 1 の両側にそれぞれ配置されている。このような構成とすることにより、発電効率をさらに高めることが可能となる。また、図 2 8 では描写されていないが、誘電体 6 1 を多段に重ねて設けておき、各々の両面にエレクトレット 6 2 を配置する構成とすれば、さらなる発電効率の向上が期待できる。なお、このような多層構造は、凸部 6 1 a や凹部 6 2 a を備えていない先述の基本構成（図 1 など）にも当然に適用することが可能である。

[0108] 図 2 9 は、3 軸化を実現するための第 2 構造を示す模式図である。第 2 構造の発電装置 7 0 において、エレクトレット 7 2 は密閉容器の内壁に形成さ

れており、誘電体 7 1 は粒子化されて密閉容器の内側に封入されている。下部電極 7 3 は、エレクトレット 7 2 の外周側を取り囲むように形成されており、抵抗 7 4 を介して接地端に接続されている。このような構造を採用することにより、発電装置 7 0 に対していかなる方向の振動が与えられた場合であっても、誘電体 7 1 とエレクトレット 7 2 とのギャップ距離が変化するので、効率よく発電を行うことが可能となる。

[0109] 図 3 0 は、3 軸化を実現するための第 3 構造を示す模式図である。第 3 構造の発電装置 8 0 において、エレクトレット 8 2 は密閉球体の内壁に形成されており、誘電体 8 1 は球体化されて密閉球体の内側に封入されている。下部電極 8 3 は、エレクトレット 8 2 の外周側を取り囲むように形成されており、抵抗 8 4 を介して接地端に接続されている。このような構造を採用することにより、発電装置 8 0 に対していかなる方向の振動が与えられた場合であっても、誘電体 8 1 とエレクトレット 8 2 とのギャップ距離が変化するので、効率よく発電を行うことが可能となる。

[0110] 図 3 1 は、3 軸化を実現するための第 4 構造を示す模式図である。第 4 構造の発電装置 9 0 において、誘電体 9 1 は球体とされており、エレクトレット 9 2 は誘電体 9 1 を取り囲むように複数形成されている。下部電極 9 3 は、複数のエレクトレット 9 2 毎に形成されており、抵抗 9 4 を介して接地端に接続されている。このような構造を採用することにより、発電装置 9 0 に対していかなる方向の振動が与えられた場合であっても、誘電体 9 1 とエレクトレット 9 2 とのギャップ距離が変化するので、効率よく発電を行うことが可能となる。

[0111] <誘電体の比誘電率と発電量>

図 3 2 は、誘電体の比誘電率と発電量との関係を示すグラフである。図 3 2 の横軸は誘電体の比誘電率 ϵ_r を示しており、図 3 2 の縦軸は発電量 P [%] (比誘電率 ϵ_r が無限大である場合の発電量で規格化) を示している。なお、本グラフは、エレクトレットの比誘電率が 2、エレクトレットの膜厚が $5 \mu\text{m}$ 、誘電体の振動の振幅が $20 \mu\text{m}$ 、誘電体がエレクトレットに最接

近したときの空隙層（空気層）の厚み（ギャップ距離）が $1\ \mu\text{m}$ 、という仮定条件の下で、先出の（３）式～（９）式を用いて得られた演算結果を示すものである。ただし、図中の各発電電力は、誘電体の比誘電率 ϵ_r が無限大である場合の発電量を 100% として規格化している。また、図 32 の丸シンボル、四角シンボル、及び、菱形シンボルは、それぞれ、誘電体の厚みが 0.01 mm、0.1 mm、及び、1 mm であるときの演算結果を示している。

[0112] 図 32 から分かるように、誘電体の厚みによって演算結果が変化する。誘電体の厚みが 0.01 mm のときは、比誘電率 ϵ_r が約 30 のときに最大発電量の 90% が得られる。一方、誘電体の厚みが 1 mm のときには、最大発電量の 90% を得るために約 3000 の比誘電率 ϵ_r が必要である。従って、発電量を高めるためには誘電体をできる限り薄くすることが望ましい。

[0113] ただし、誘電体を薄くし過ぎるとエレクトレットと接触したときにエレクトレット内の電荷を放電させてしまう恐れがある。従って、発電量の増大と放電の防止の双方を鑑みれば、例えば、厚みが 0.1 mm であり、比誘電率 ϵ_r が 300 以上の誘電体を使用することが適当であると考えられる。ただし、ここでの厚みと比誘電率の数値は一例であり、それ以外の値でも構わない。電荷の保持特性、発電量、装置サイズ、及び、製造コストなどを総合的に鑑みると、実用的な設計範囲として、誘電体は、厚みが 0.01～1.0 mm（より好ましくは 0.01～0.1 mm）であり、かつ、最大発電量の 80% 以上の発電量を得ることのできる素材を用いることが妥当である。

[0114] 誘電体の作製方法については、誘電体の厚みに応じて種々の手法を採用することが可能である。例えば、厚み $1\ \mu\text{m}$ 以下～数 μm の誘電体については、スパッタ法や電子ビーム蒸着法によって作製することができる。また、厚み $1\ \mu\text{m}$ 以下～数十 μm の誘電体については、ゾルゲル法を含む水熱合成法＋スピンコート＋焼成により作製することができる。また、厚み数十 μm 以上の誘電体については、粉体の焼成＋加圧成型等の成型＋スライス、カット、研磨などによる厚み調整によって作製することができる。

[0115] <誘電体の材料>

最も有望である材料は、チタン酸バリウム (BaTiO_3 , BTO) である。使用温度 ($0 \sim 100^\circ\text{C}$ 程度を想定) における比誘電率は約 1000 であり、上記の条件を満たしている。比較的安価でかつ非鉛であるため環境負荷も小さいので、製品化の際にも有利である。 120°C 以上の環境下では比誘電率が落ちる。また、動作周波数が 100kHz 以上の場合もやはり比誘電率が低下する。ただし、想定する動作周波数は $1 \sim$ 数百 Hz なので、本デバイスに関して上記特徴は欠点にならない。唯一の問題は強誘電体である為に、誘電特性にヒステリシスがある点である。

[0116] 次に有望である材料は、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) である。比誘電率が非常に大きい ($2000 \sim 3000$) ので、発電量を出来るだけ大きくしたい場合に有効である。ただし、比較的高価であることや鉛を含んでいるため環境負荷が高いことが欠点である。また、チタン酸バリウムと同様に強誘電体であるので、特性にヒステリシスを持つ点にも留意が必要である。

[0117] さらに、チタン酸バリウム中にカリウム (K)、カルシウム (Ca)、ストロンチウム (Sr) などのアルカリ土類金属や、イットリウム (Y)、ネオジム (Nd) などの希土類金属を添加したものも有望である。一般に、これらの添加により、チタン酸バリウムの比誘電率は低下するが、以下の様な効果が期待される。

[0118] 第1の効果は、キュリー温度を下げる点である。強誘電体にはキュリー温度と呼ばれる特異点となる温度があり、この温度付近で誘電率が極大値を持つ。従って、誘電体のキュリー温度を発電デバイスの使用温度付近に設定することで、動作温度における比誘電率を純粋なチタン酸バリウムよりも大きくすることができる。ただし、温度変化による誘電率の変化が大きくなり、発電効率の不安定化に繋がる欠点がある。

[0119] 第2の効果は、添加量を大きくしていくと性質が強誘電性から常誘電性に変化する点である。常誘電体は温度変化による誘電率の変化が小さく、ヒステリシスも持たないので、安定した発電が得られることが期待される。常誘

電体の中では誘電率が高い方なので、発電量もある程度確保できる。

[0120] 次に、チタン酸ストロンチウムが挙げられる。チタン酸ストロンチウムはチタン酸バリウムのバリウムがストロンチウムに置き換わったものである。常誘電体であるが、比誘電率が約300あり、上記の条件を満たすことが利点である。ただし、やはりチタン酸バリウムと比較すると誘電率が小さい。また、ストロンチウムがレアメタルであり、コストが高くなるという欠点がある。

[0121] 次に、非鉛圧電性高誘電体として、酸化鉄ランタン (LaFeO_3)、ニオブ酸カリウム (KNbO_3)、チタン酸ランタン (LaTiO_3)、ケイ酸マグネシウム (MgSiO_3)、及び、チタン酸ジルコン酸バリウム ($\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$) が挙げられる。

[0122] 酸化鉄ランタン (LaFeO_3) の特徴は、単結晶層において比誘電率が1000以上であり、高温では比誘電率が数万以上になる点である。酸化鉄ランタン (LaFeO_3) をニオブ酸カリウム (KNbO_3) に微量添加することにより、誘電率を引き上げる効果がある。例えば、酸化鉄ランタン (LaFeO_3) を0.2%添加することにより、室温におけるニオブ酸カリウム (KNbO_3) の比誘電率が500から1250へ上昇する。

[0123] ニオブ酸カリウム (KNbO_3) の結晶構造は、ペロブスカイト構造である。−10℃以下では菱面体晶となり、常温では斜方晶となり、225～435℃では正方晶となり、435℃（キュリー温度）以上では立方晶となる。利点としては、（1）強誘電体であり大きな圧電性を示すこと、（2）ピスマス層状構造の強誘電体であり非鉛圧電セラミックスであること、（3）分極しやすい（150℃、5～6kV/mm以下での分極が可能）こと、（4）チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）と同等の比誘電率（800～1000）を有していること、及び、（5）室温から200℃程度まで比較的フラットな比誘電率曲線を有することが挙げられる。逆に欠点としては、（1）セラミックスとして焼結しにくいこと、（2）未反応の酸化カリウムが残留すると、その潮解性のために耐湿性が悪化すること、及び、（3）レアメタルで

あるニオブを主成分とするため、コストが高いことが挙げられる。

[0124] チタン酸ジルコン酸バリウム ($\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$) は、キュリー温度を 120°C よりも低くすることができる。 $\text{Ti} : \text{Zr} = 8 : 2$ において、キュリー温度は 40°C であり、比誘電率は 4000 である。

[0125] 次に、ポリマー系強誘電体として、ポリ乳酸やポリ尿素酸が挙げられる。ポリマー系強誘電体は、柔軟であり、誘電率が比較的高いので、接触面における保護膜などへの応用が期待される。ポリ乳酸の比誘電率は約 22 である。ポリ尿素酸は有機圧電材料であり、比誘電率は $3.6 \sim 11.8$ である。

[0126] 次に、リラクサー強誘電体が挙げられる。リラクサー強誘電体に共通の特徴としては、(1) 圧電効果が大きい、(2) 誘電率が非常に大きく温度変化も小さい、(3) 数万に及ぶ巨大な比誘電率を有する、(4) ブロードな誘電率のピークと周波数分散を有する、及び、(5) 高温まで緩慢な変化を示す自発分極特性を有することが挙げられる。

[0127] リラクサー強誘電体の多くは、 $\text{A}(\text{B}', \text{B}'')\text{O}_3$ の複合ペロブスカイト型化合物構造を有する。A サイトには 2 価のイオンが入り、B サイトには平均して 4 価の電荷を持つ 2 種類のイオンが入る。+2 価と +5 価のイオンが $1 : 2$ の割合で入るタイプ ($\text{A}(\text{B}'_{1/3}\text{B}''_{2/3})\text{O}_3$) と、+3 価と +5 価のイオンあるいは +2 価と +6 価のイオンが $1 : 1$ の割合で入るタイプ ($\text{A}(\text{B}'_{1/2}\text{B}''_{1/2})\text{O}_3$) に大きく分けられる。多くのリラクサーが強誘電体 PbTiO_3 と混晶を形成し、興味深い現象を引き起こす。

[0128] リラクサー材料の例としては、 $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 \cdot x\text{PbTiO}_3$ 、 $(1-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 \cdot x\text{PbTiO}_3$ 、ないしは、 $(1-x)\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 \cdot x\text{PbTiO}_3$ を挙げることができる。

[0129] $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ と PbTiO_3 の固溶体 ($\text{PZN}/x\text{PT}$) の特徴としては、(1) 強誘電体かつ圧電体である、及び、(2) $\text{PZN}/9\text{PT}$ の場合に圧電定数 d_{33} が約 2500 pC/N であることが挙げられる。 PZN と PT の組成比がちょうど三方晶と正方晶を分けるモルフォトロピック相境界 (通称 MPB) と呼ばれる領域にあり、MPB での対称性の低下とい

う観点から様々な実験手法を用いて高い圧電効果の起因が探られている。

[0130] $(Ba, La)(Ti, Cr)O_3$ の特徴としては、非鉛系のリラクサー強誘電体であることが挙げられる。正確な組成は、 $(Ba_{1-x}La_x)(Ti_{1-x}Cr_x)O_3$ (ただし $0 \leq x < 1$) という組成になる。 $x = 0.035$ で比誘電率 2000 となり、室温付近で安定した誘電率を示す。

[0131] <発電量を向上するための変形例>

図33は、これまでに説明してきた発電装置の第1変形例を示す模式図である。第1変形例の発電装置100は、可動マス101と、ばね部材102と、誘電体103と、エレクトレット104と、ガラス基板105と、反発部材106aと、パッケージ110と、を有し、誘電体103とエレクトレット104との距離が変化することによって発電を行う振動型発電装置である。

[0132] 可動マス101は、誘電体103と重錘が一体となったものであり、パッケージ110の内部で上下振動が可能ないように収納されている。

[0133] ばね部材102は、可動マス101を弾性的に支持するマス支持部材の一例である。本図では、パッケージ110の内側面で可動マス101を両端支持する構成を例示したが、可動マス101の支持形態はこれに限定されるものではなく、例えば、パッケージ110の天井から可動マス101を吊下支持する構成としても構わない。このように、ばね部材102を用いて可動マス101を弾性的に支持する構成とすることにより、誘電体103をエレクトレット104から離間するための運動エネルギーを引き下げることができるので、より小さな振動によって発電を行うことが可能となる。ばね部材102としては、コイルバネや蛇腹バネ（ミアンダ形状）を用いればよい。

[0134] 誘電体103は、発電装置100に与えられる振動によってエレクトレット104に対する相対位置が変化する可動体（可動マス101の一部）となる。なお、誘電体103としては、先にも述べたように、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）やチタン酸バリウム（BTO）などを好適に用いることができる。

- [0135] エレクトレット１０４は、電荷を半永久的に保持する部材である。エレクトレット１２としては、有機エレクトレット及び無機エレクトレットのいずれを用いても構わない。
- [0136] ガラス基板１０５は、エレクトレット１０４を担持するための板状部材である。
- [0137] 反発部材１０６ａは、エレクトレット１０４を弾性的に支持するエレクトレット支持部材の一例である。本図では、ガラス基板１０５の下面とパッケージ１１０の底面との間に反発部材１０６ａが挿入されている。従って、エレクトレット１０４は、誘電体１０３と対向しない下面側で反発部材１０６ａに支持された形となる。
- [0138] パッケージ１１０は、可動マス１０１、ばね部材１０２、誘電体１０３、エレクトレット１０４、ガラス基板１０５、及び、反発部材１０６ａを収納するカバー部材（円筒、柱筒、半球など）である。パッケージ１１０は、例えば、レジンやアクリルなどの樹脂製とすればよい。
- [0139] 図３４は、反発部材１０６ａの反発係数と最大発電量との相関図である。本図は大型デバイス（先出の図３を参照）を用いた発電試験の結果であり、反発部材１０６ａの材料としては、ゲル（０．５３）、ニトリルゴム（０．４２～０．５２）、フッ素ゴム（０．３４～０．３８）、及び、低弾性ゴム（０．３３）を用いた（括弧内は反発係数）。なお、上記の反発係数は、いずれも本願発明者らが独自に計測した値である。
- [0140] 本図で示したように、エレクトレット１０４を支持する反発部材１０６ａの反発係数が高いほど、可動マス１０１のエネルギー損失が少なくなり、延いては、最大発電量が大きくなることが分かる。
- [0141] なお、今回の実験で用いたゲル、ニトリルゴム、フッ素ゴム、及び、低弾性ゴムのいずれかを反発部材１０６ａの材料として選択するのであれば、最も反発係数の大きいゲルを選択することが望ましいと言える。ただし、さらなる発電量の向上を見込んで、ゲルよりも反発係数の高い高反発材料（例えば、高弾性ゴムボール玩具に用いられる高反発材料）を用いることも可能で

ある。

[0142] 図35は、発電装置の第2変形例を示す模式図である。第2変形例は、先の第1変形例と基本的に同様の構成であり、誘電体103とエレクトレット104とを離間させるように互いに反発し合う磁石107をさらに有する点に特徴がある。そこで、第1変形例と同様の構成要素については、図33と同一の符号を付すことで重複した説明を割愛し、以下では、第2変形例の特徴部分について重点的な説明を行う。

[0143] 発電装置100の発電量は、エレクトレット104の表面電位が高いほど大きくなる。しかしながら、エレクトレット104の表面電位が高いほど、静電引力によって誘電体103とエレクトレット104が貼り付きやすくなるので、可動マス101が振動しなくなるおそれが高くなる。

[0144] 一方、第2変形例の発電装置100において、新たに追加された磁石107は、誘電体103とエレクトレット104とを離間させるように互いに反発し合うので、静電引力による誘電体103とエレクトレット104との貼り付きを防止することが可能となり、延いては、より高い発電量を見込むことが可能となる。

[0145] なお、第2変形例の電源装置100は、基本的に図18とも同様の構成であるが、磁石107は、その表面が誘電体103及びエレクトレット104の表面とそれぞれ面一となるように形成されている。このような構成とすることにより、誘電体103とエレクトレット104との間のギャップ距離をできる限り大きく変化させることが可能となり、延いては、発電量を増大することが可能となる。

[0146] 図36は、誘電体103とエレクトレット104との衝突回数と、発電装置100の最大発電量との相関図である。なお、菱形マークは磁石あり（図35の第2変形例）の挙動を示しており、三角マークは磁石なし（図33の第1変形例）の挙動を示している。

[0147] 約50万回までの衝突では、磁石107の有無により最大発電量に差違が生じている。すなわち、磁石なしでは、誘電体103とエレクトレット10

4 との貼り付きが生じるので高い発電量を得られなくなるが、磁石ありでは、誘電体 103 とエレクトレット 104 との貼り付きを防止することができるので、より高い発電量を得ることが可能となる。

[0148] ただし、衝突回数が 10 万回を超えた辺りから、磁石 107 の有無による発電量の差違が小さくなり始め、衝突回数が 50 万回を超える範囲では、磁石 107 があってもなくても最大発電量には殆ど変わりがなくなる。その原因としては、ばね部材 102 に金属疲労を生じている可能性が考えられる。従って、ばね部材 102 の設計を工夫すれば、最大発電量の低下を改善することが可能であると考えられる。

[0149] 図 37 は、発電装置の第 3 変形例を示す模式図である。第 3 変形例は、先の第 1 変形例と基本的に同様の構成であり、反発部材 106a ではなく、ばね部材 106b を用いてエレクトレット 104 を支持している点に特徴がある。そこで、第 1 変形例と同様の構成要素については、図 33 と同一の符号を付すことで重複した説明を割愛し、以下では、第 3 変形例の特徴部分について重点的な説明を行う。

[0150] ばね部材 106b は、エレクトレット 104 を弾性的に支持するエレクトレット支持部材の一例である。本図では、パッケージ 110 の内側面でガラス基板 105 を両端支持するように、ばね部材 106b が形成されている。従って、エレクトレット 104 は、誘電体 103 と対向しない下面側でばね部材 106b に支持された形となる。ただし、ばね部材 106b による支持形態はこれに限定されるものではなく、例えば、ガラス基板 105 の下面とパッケージ 110 の底面との間に、ばね部材 106b を挿入しても構わない。なお、ばね部材 106b としては、ばね部材 102 と同様、コイルバネや蛇腹バネ（ミアンダ形状）を用いればよい。

[0151] 図 38 及び図 39 は、それぞれ、出力電圧及び瞬時電力の時間変化を示す図である。なお、両図の実線はエレクトレット支持部材としてばね部材 106b を用いた構成（図 37 の第 3 変形例）の挙動を示しており、破線はエレクトレット支持部材として反発部材 106a（ゲル）を用いた構成（図 33

の第1変形例)の挙動を示している。また、図40は発電量及び抵抗値の測定結果を示すテーブルである。

[0152] 各図から分かるように、エレクトレット支持部材としてばね部材106bを用いれば、反発部材106a(ゲル)を用いるよりも、誘電体103とエレクトレット104との接触時間が短くなるので、出力電圧の最大値が高くなる。また、エレクトレット支持部材としてばね部材106bを用いれば、反発部材106a(ゲル)を用いるよりも、出力電圧の周期が短くなる(周波数が高くなる)ので、発電量が最大となる抵抗値が低くなる($R = 1 / 2\pi f C$)。以上のことから、エレクトレット支持部材としてばね部材106bを用いれば、発電装置100の発電量を向上することが可能となる($P = V^2 / R$)。

[0153] 図41は、第3変形例における出力電圧の時間変化を示す図である。なお、図41中の実線は実験結果を示しており、破線は解析結果を示している。また、図42は、第3変形例における出力電圧、マス変位、及び、エレクトレット変位の時間変化を示す図である。なお、図42中の実線は出力電圧の解析結果(図41の破線に相当)を示しており、破線は可動マス101(誘電体103)の変位を示しており、一点鎖線はエレクトレット104の変位を示している。

[0154] ばね部材106bをうまく設計すれば、可動マス101(誘電体103)とエレクトレット104が一度近づいたときに、両者の衝突を複数回起こすこともできるので、発電量の向上に寄与することが見込まれる。

[0155] 図43は、ばね部材106bのばね定数と発電量との相関図である。ばね定数を変えながら発電試験を行った結果、ばね部材106bのばね定数を適切に調整することにより、発電量を向上し得ることが判明した。本図からは、ばね部材106bのばね定数を0.5~50N/mm(より望ましくは、1.0~10N/mm)とすればよいことが分かる。

[0156] 図44は、可動マス101(誘電体103)の加速度と全振幅との相関図である。なお図中の丸マークはエレクトレット支持部材としてばね部材10

6 bを用いた構成（図37の第3変形例）の挙動を示しており、三角マークはエレクトレット支持部材として反発部材106 a（ゲル）を用いた構成（図33の第1変形例）の挙動を示している。

[0157] 本図で示したように、エレクトレット104をばね部材106 bで支持する構成では、エレクトレット104を反発部材106 a（ゲル）で支持する構成よりも、可動マス101（誘電体103）の全振幅が大きくなる。これを鑑みると、ばね部材106 bは、ゲルよりも反発係数の大きい高反発材料で形成された反発部材106 aと看做することができるので、先の図34で示した実験結果とも合致する。

[0158] 図45は、発電装置の第4変形例を示す模式図である。第4変形例は、これまでに説明した第1変形例～第3変形例を組み合わせたものであり、エレクトレット支持部材として反発部材106 aとばね部材106 bの双方を含むほかに、誘電体103とエレクトレット104とを離間させるための磁石107も備えている。

[0159] なお、第4変形例では、反発部材106 aがばね部材106 bの振動を不必要に妨げてしまわないように、両部材間に所定の変位しろが設けられている。従って、反発部材106 aは、発電装置100に高い加速度が加わって、ばね部材106 bが反発部材106 aに接触する位置まで変位したときに、これを押し戻すストッパとして機能する。

[0160] 第4変形例の発電装置100においても、ばね部材102のばね定数、反発部材106 aの反発係数、ばね部材106 bのばね定数、及び、磁石107の磁力強度を適宜調整することにより、発電量の向上を図ることが可能である。

[0161] <アプリケーション>

各種センサや無線機器（例えば、Z i g B e e [登録商標]・300MHz帯特定小電力無線機器）用の電源として、上記の発電装置を適用することにより、無線センサや無線センサネットワークによるユビキタス環境を構築することができる。すなわち、各種のセンサや無線装置の電源配線が不要と

なるので、各々の機器を分散配置して、ネットワーク内での情報連携を実現することが可能となる。

[0162] なお、一部で実用化されているタイヤ空気圧モニタリングシステム（T P M S [Tire Pressure Monitoring System]）への応用のほか、上記の発電装置を用いたユビキタス環境の使用シーンとしては、例えば、医療・健康分野（健康管理や安否確認）、構造物監視（ワイヤ断線やボルト緩みの監視）、プラント監視（設備異常の監視）、並びに、物流管理（流通状態や品質の監視）などを挙げることができる。また、モータ等の電動機は電源周波数（50Hzまたは60Hz）で振動するので、発電装置に組み込まれたばね系の共振条件を上記の電源周波数に合わせれば、さらに大きな発電量が期待されることから、この発電電力をデータ処理装置等の電源として使用することが考えられる。さらに、上記の発電装置を人体に取り付けて発電するアプリケーションや、上記の発電装置を携帯電話等のモバイル機器に搭載して発電するアプリケーションなども想定される。

[0163] <その他の変形例>

なお、本発明の構成は、上記実施形態ないし変形例のほか、発明の主旨を逸脱しない範囲で種々の変更を加えることが可能である。すなわち、上記実施形態は、全ての点で例示であって、制限的なものではないと考えられるべきであり、本発明の技術的範囲は、上記実施形態の説明ではなく、特許請求の範囲によって示されるものであり、特許請求の範囲と均等の意味及び範囲内に属する全ての変更が含まれると理解されるべきである。

産業上の利用可能性

[0164] 本発明に係る発電装置は、各種センサや無線機器（無線センサネットワークやヘルスマニタリングなど）に用いられる電源として、好適に利用可能な技術である。

符号の説明

[0165] 10 発電装置
 11 誘電体

- 1 2 エレクトレット
- 1 3 下部電極
- 1 4 抵抗
- 1 5 上部電極
- 1 6 基板
- 1 7 空隙層
- 1 8 金属体
- 2 0 発電装置
- 2 1 基板
- 2 2 下部電極
- 2 3 エレクトレット
- 2 4 誘電体（誘電体、電極、重錘が一体となったもの）
- 2 4 a レール溝
- 2 5 パッケージ
- 2 5 a 球受部
- 2 5 b レール溝
- 2 6 接着剤
- 2 7 ワイヤ
- 3 1 ～ 3 4 弾性部材
- 3 5 a、3 5 b、3 6 a、3 6 b 磁石
- 3 7 ストッパ
- 3 8 ボール部材
- 3 9 レール部材
- 4 0 発電装置
- 4 1 誘電体
- 4 2 エレクトレット
- 4 3 下部電極
- 4 4 抵抗

4 5	グランドリング
5 0	発電装置
5 1	誘電体
5 2	エレクトレット
5 3	下部電極
5 4	基板
6 0	発電装置
6 1	誘電体
6 1 a	凸部
6 2	エレクトレット
6 2 a	凹部
6 3	下部電極
7 0、8 0、9 0	発電装置
7 1、8 1、9 1	誘電体
7 2、8 2、9 2	エレクトレット
7 3、8 3、9 3	下部電極
7 4、8 4、9 4	抵抗
1 0 0	発電装置
1 0 1	可動マス
1 0 2	ばね部材（マス支持部材）
1 0 3	誘電体
1 0 4	エレクトレット
1 0 5	ガラス基板
1 0 6 a	反発部材（エレクトレット支持部材）
1 0 6 b	ばね部材（エレクトレット支持部材）
1 0 7	磁石
1 1 0	パッケージ
X 1	誘電体

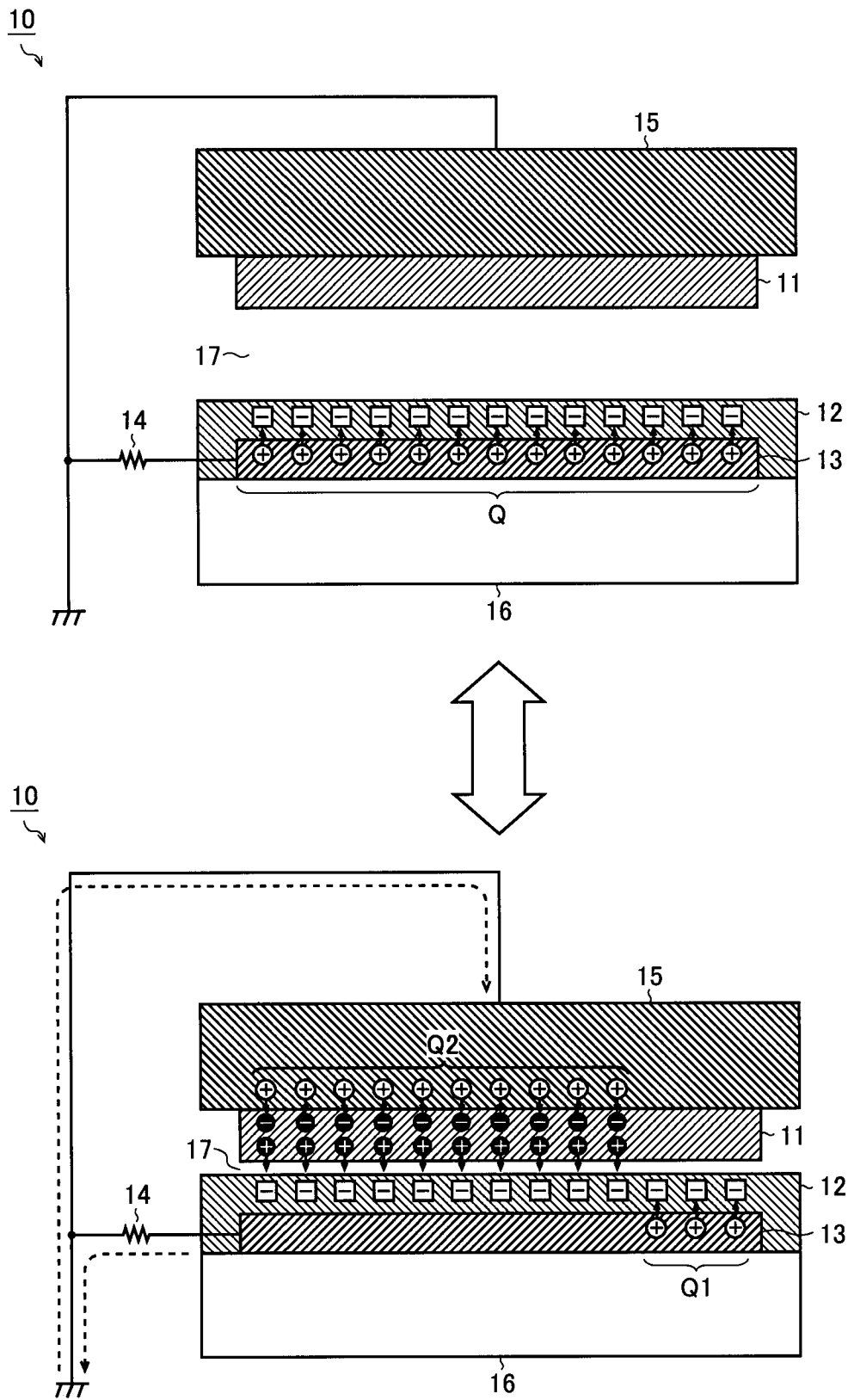
X 2	アルミ板
X 3	電磁式加振機
X 4	試料
X 4 1	エレクトレット
X 4 2	下部電極
X 4 3	基板
X 5	アルミ板
X 6	3軸ステージ
X 7	土台
X 8	同軸ケーブル
X 9	同軸ケーブル
X 1 0	シールドケース
X 1 0 a	第1コネクタ
X 1 0 b	第2コネクタ
X 1 1	同軸ケーブル
X 1 2	ローパスフィルタ
X 1 3	同軸ケーブル
X 1 4	オシロスコープ
R _v 、R	ロード抵抗
Y	コロナ放電装置
Y 1	グリッド
Y 2	放電電極針
Y 3	グリッド用電源
Y 4	直流高圧電源

請求の範囲

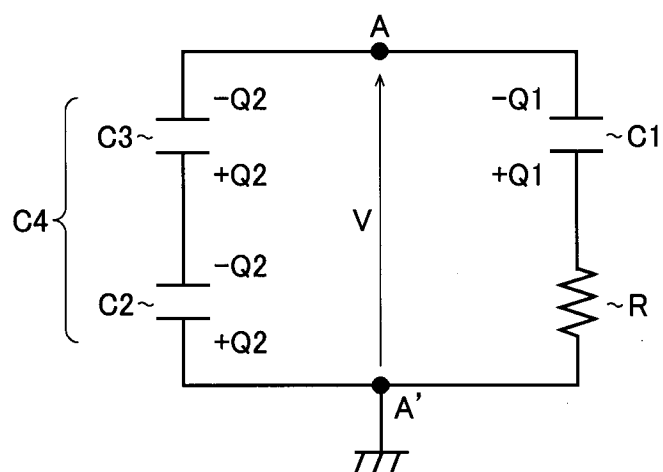
- [請求項1] 可動マスとなる誘電体と、電荷を保持するエレクトレットと、を有し、前記誘電体と前記エレクトレットとの距離が変化することによって発電を行う発電装置であって、
前記エレクトレットを弾性的に支持するエレクトレット支持部材をさらに有することを特徴とする発電装置。
- [請求項2] 前記エレクトレット支持部材は、所定の反発係数を持つ反発部材を含むことを特徴とする請求項1に記載の発電装置。
- [請求項3] 前記反発係数は0.3以上であることを特徴とする請求項2に記載の発電装置。
- [請求項4] 前記反発部材は、ゲルまたはこれよりも反発係数の高い高反発材料によって形成されていることを特徴とする請求項3に記載の発電装置。
- [請求項5] 前記誘電体と前記エレクトレットとを離間させるように互いに反発し合う磁石をさらに有することを特徴とする請求項1～請求項4のいずれか一項に記載の発電装置。
- [請求項6] 前記磁石は、その表面が前記誘電体及び前記エレクトレットの表面とそれぞれ面一となるように形成されていることを特徴とする請求項5に記載の発電装置。
- [請求項7] 前記エレクトレット支持部材は、所定のばね定数を持つばね部材を含むことを特徴とする請求項1～請求項6のいずれか一項に記載の発電装置。
- [請求項8] 前記ばね定数は0.5～50N/mmであることを特徴とする請求項7に記載の発電装置。
- [請求項9] 前記可動マスを弾性的に支持するマス支持部材をさらに有することを特徴とする請求項1～請求項8のいずれか一項に記載の発電装置。
- [請求項10] 前記誘電体と前記エレクトレットを収納するパッケージをさらに有することを特徴とする請求項1～請求項9のいずれか一項に記載の発

電装置。

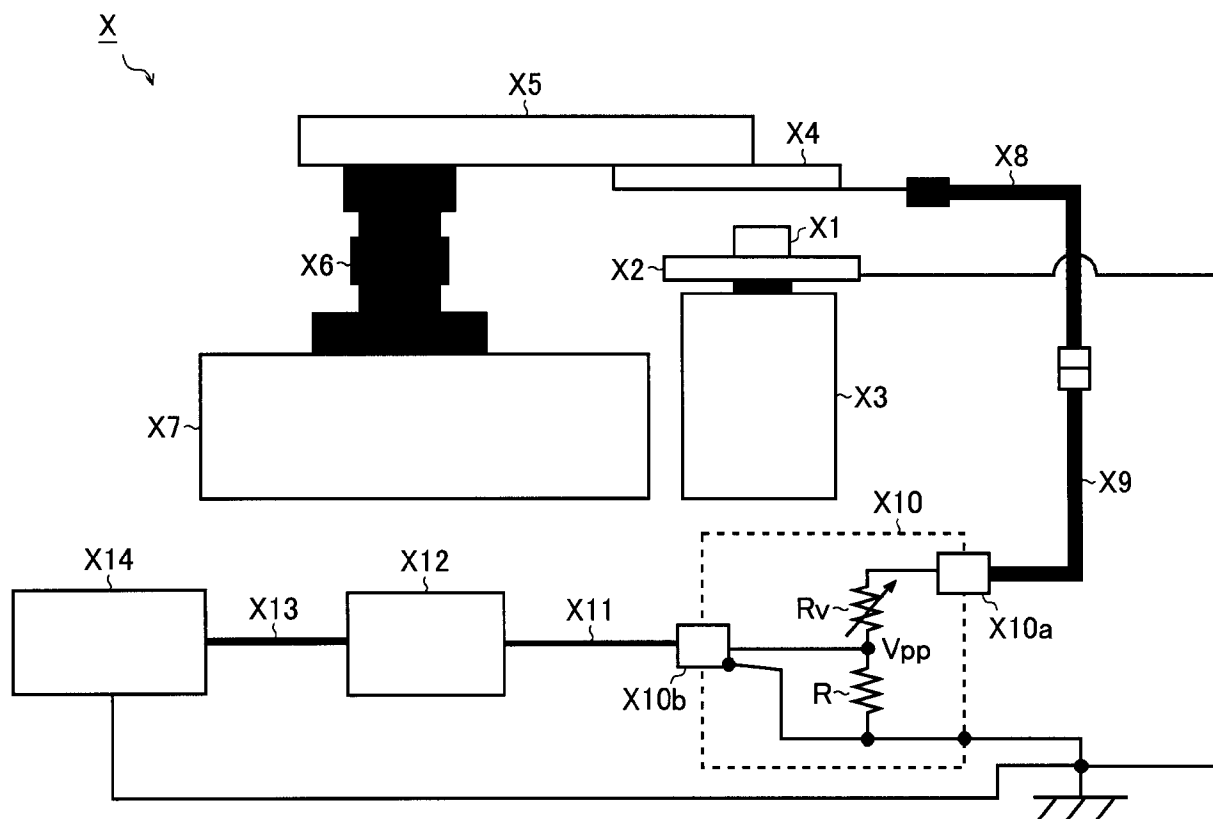
[図1]



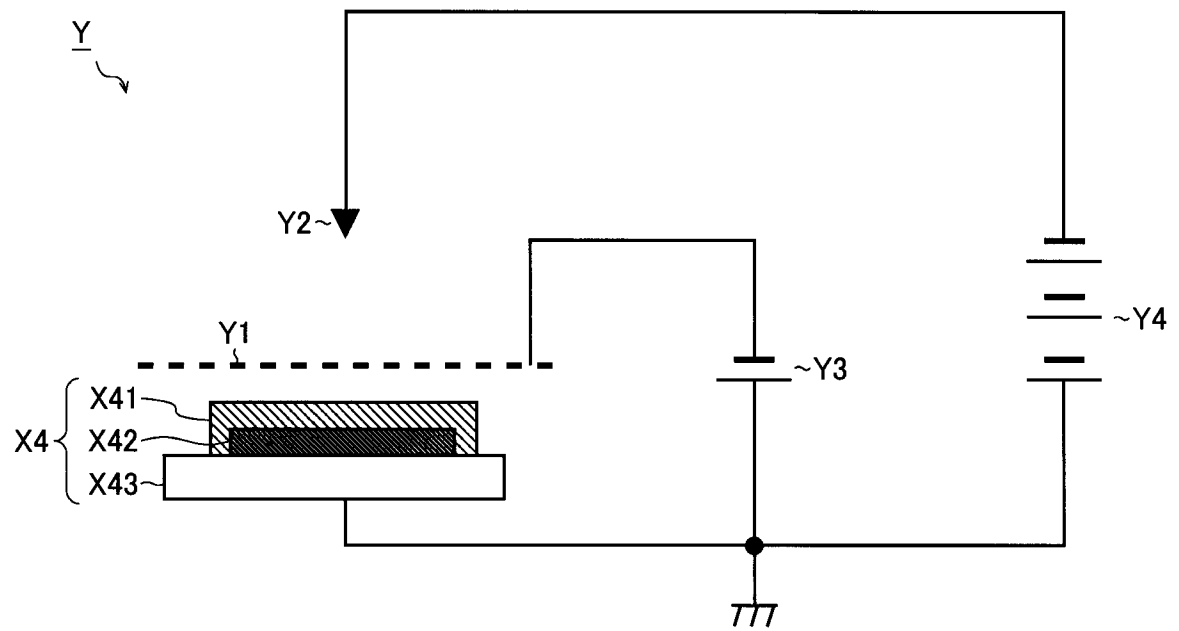
[図2]



[図3]



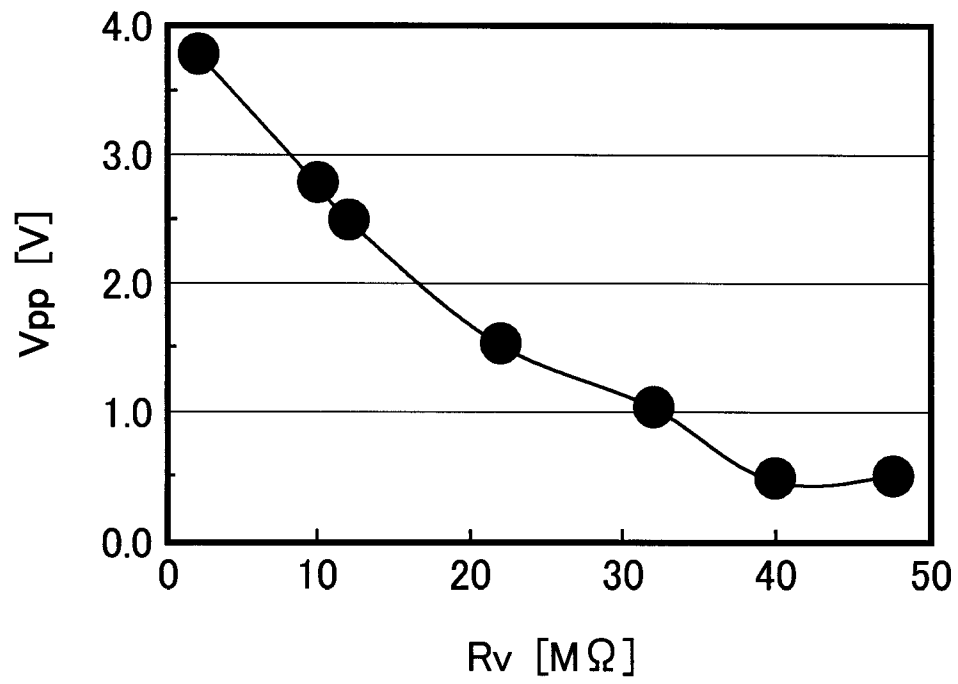
[図4]



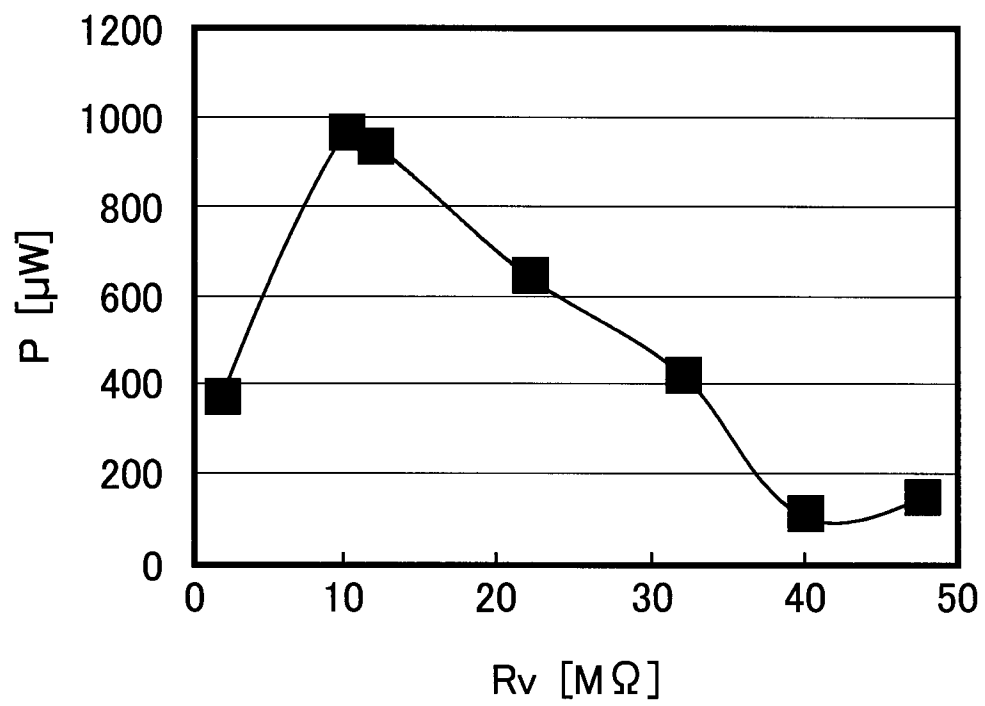
[図5]

R_v [$M\Omega$]	V_{pp} [V]	P_m [μW]
47.6	0.52	161
40	0.5	125
32	1.04	434
22	1.54	655
12	2.5	945
10	2.78	975
2	3.78	375

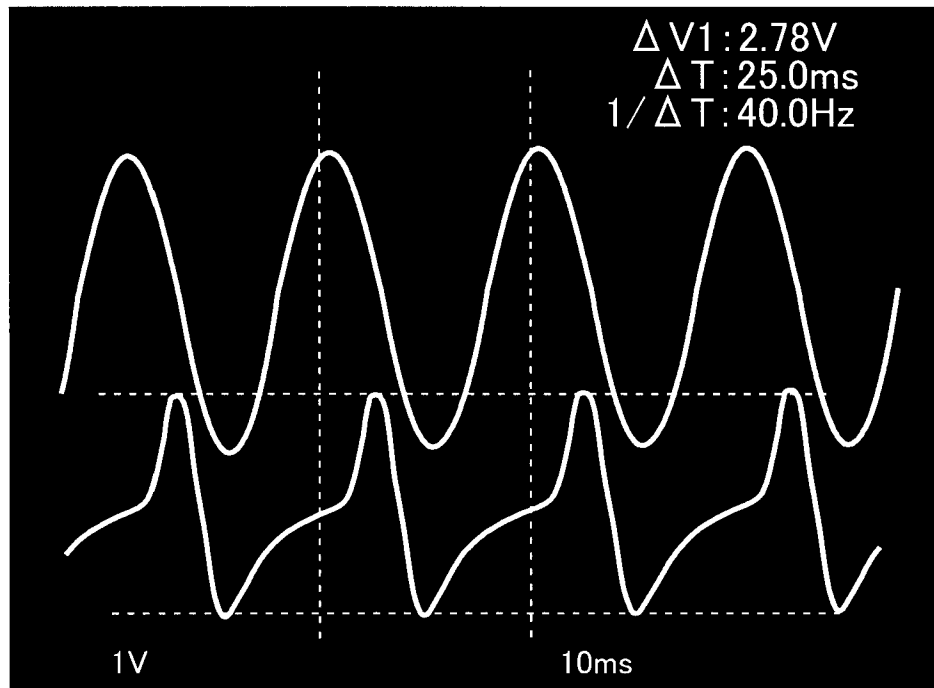
[図6]



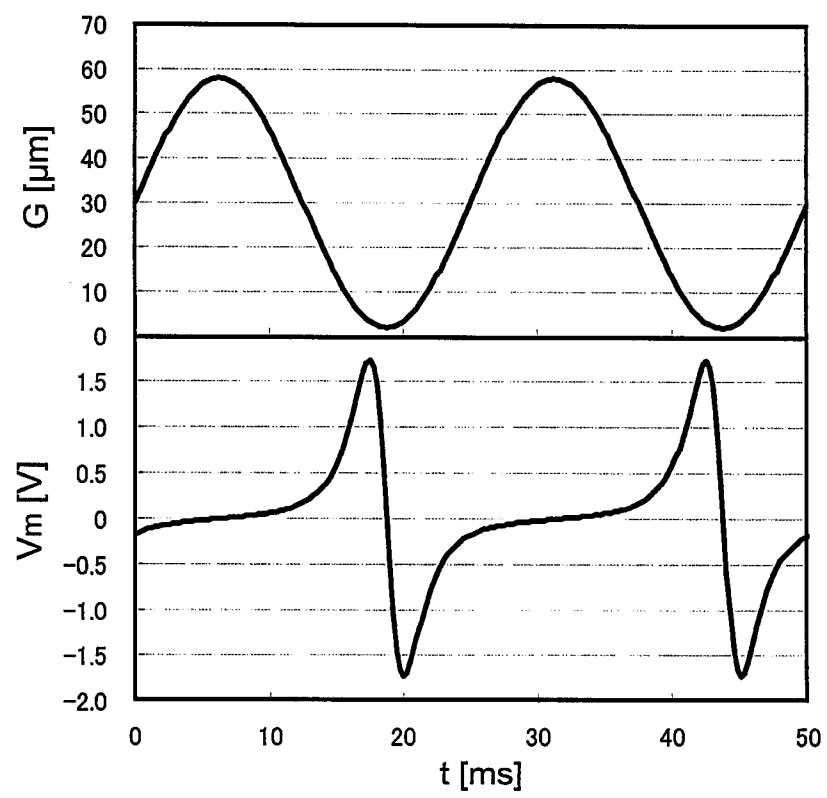
[図7]



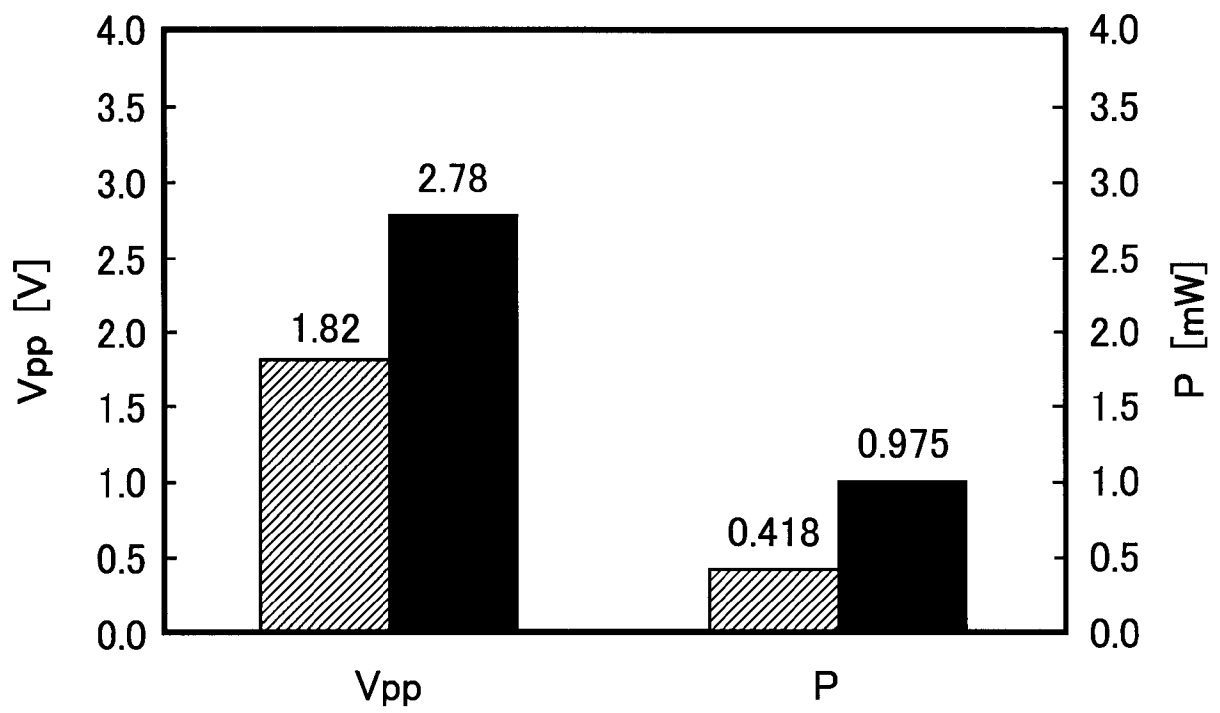
[図8A]



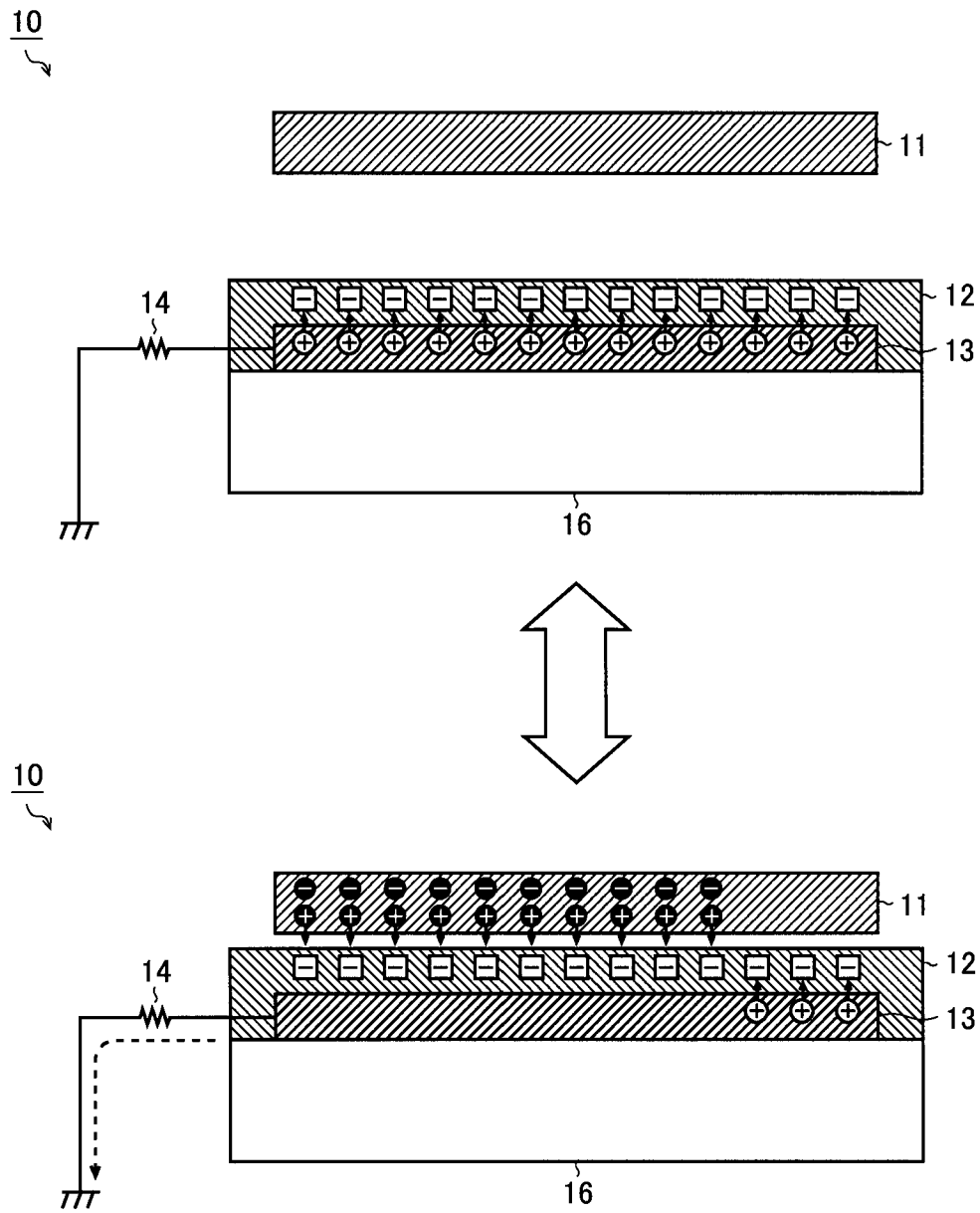
[図8B]



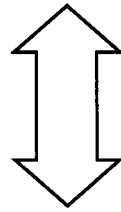
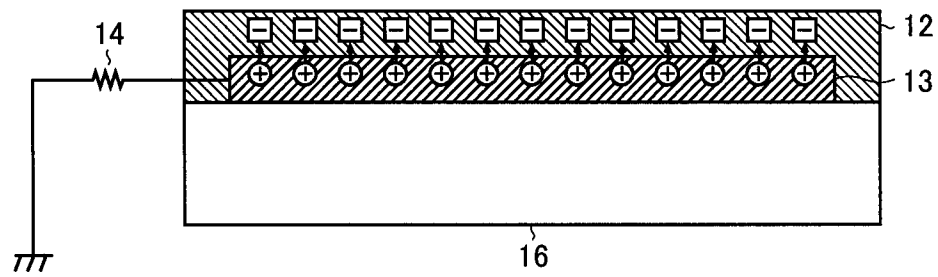
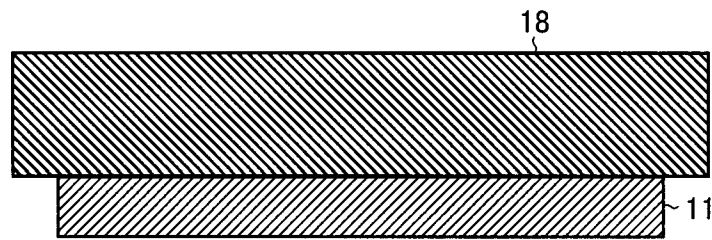
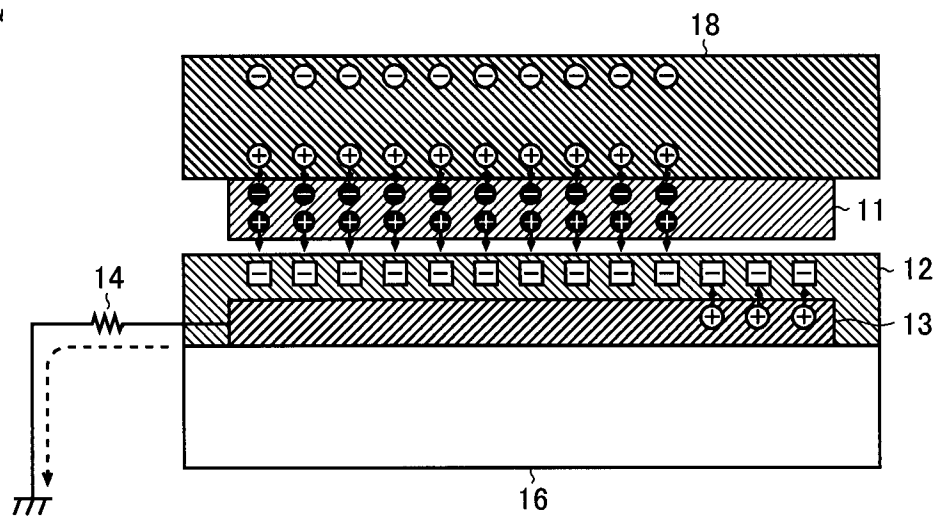
[図9]



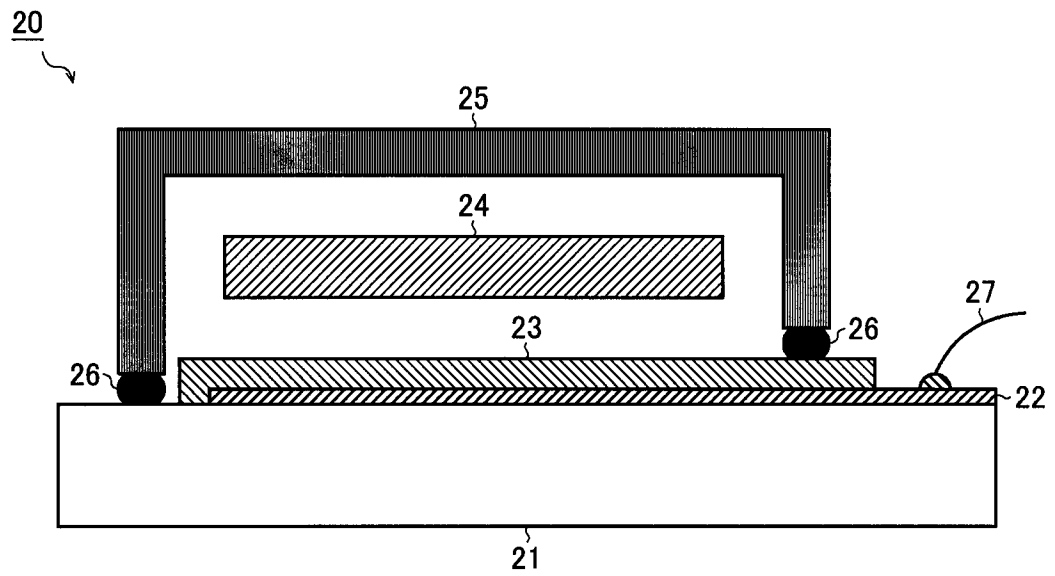
[図10]



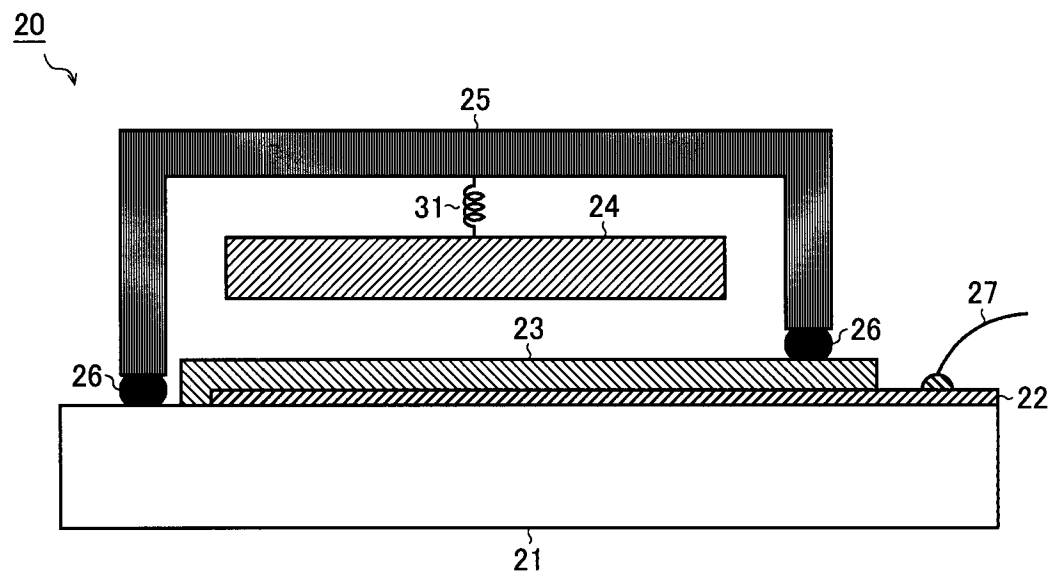
[図11]

10
↙10
↙

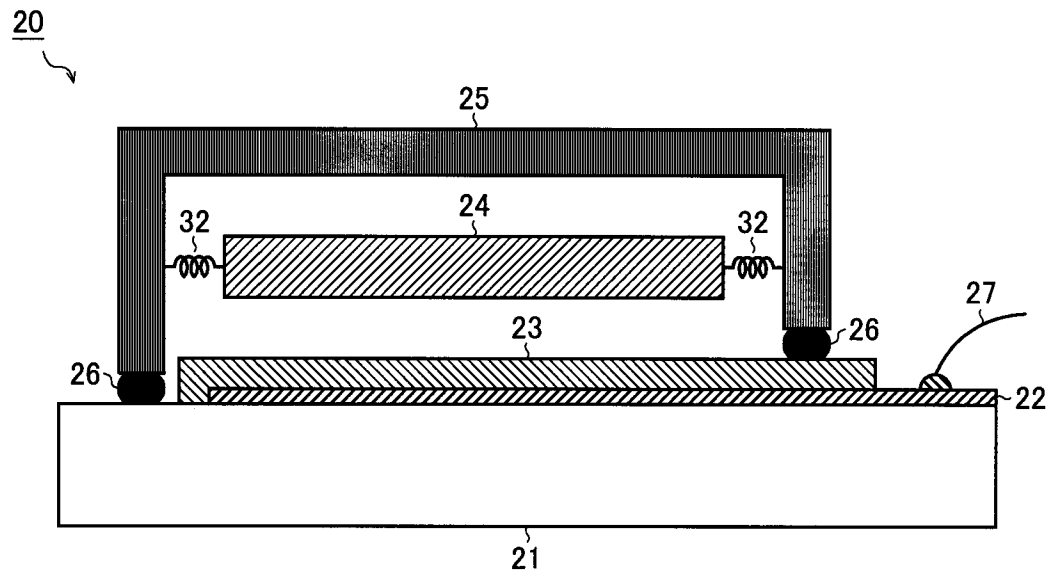
[図12]



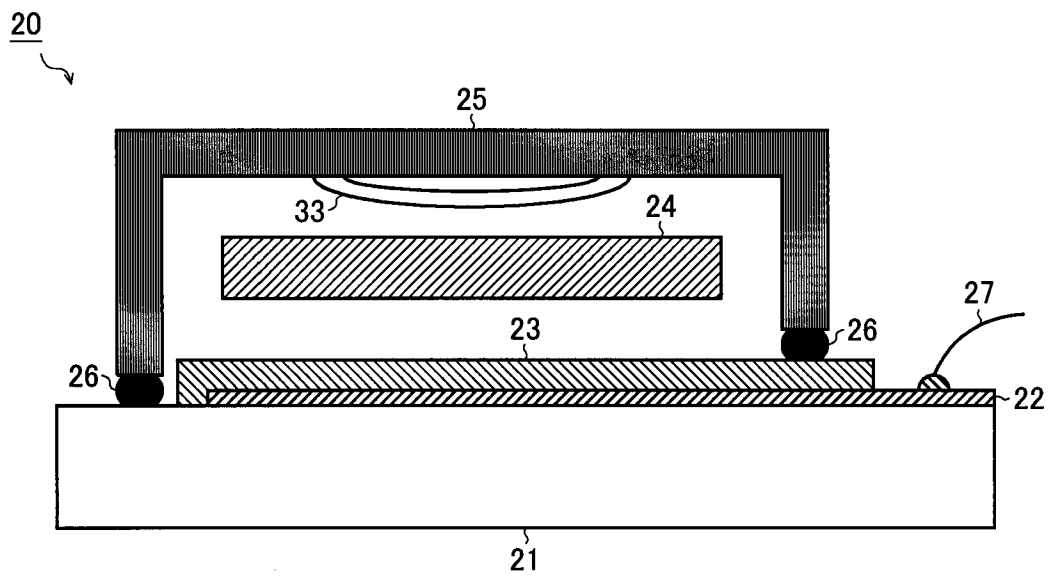
[図13]



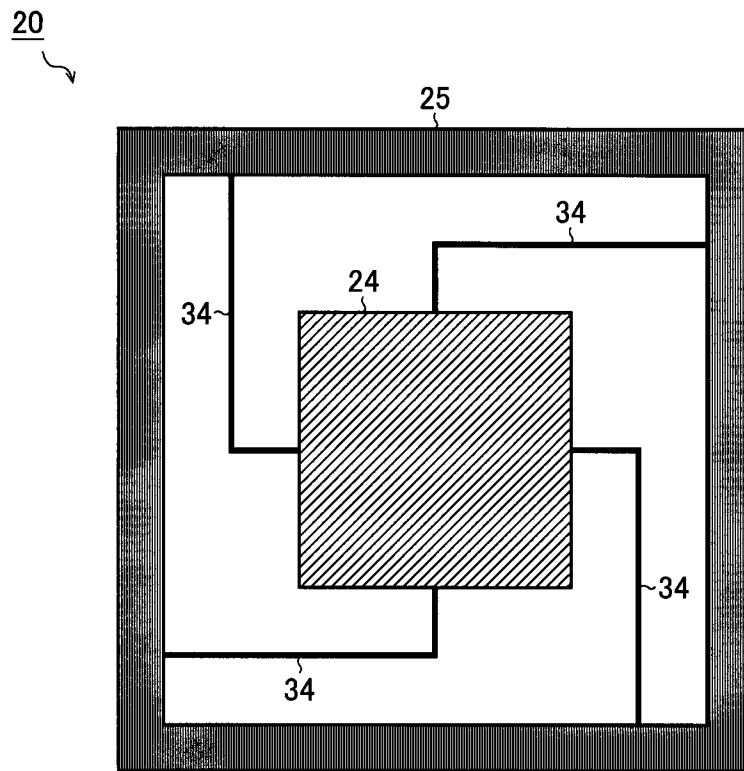
[図14]



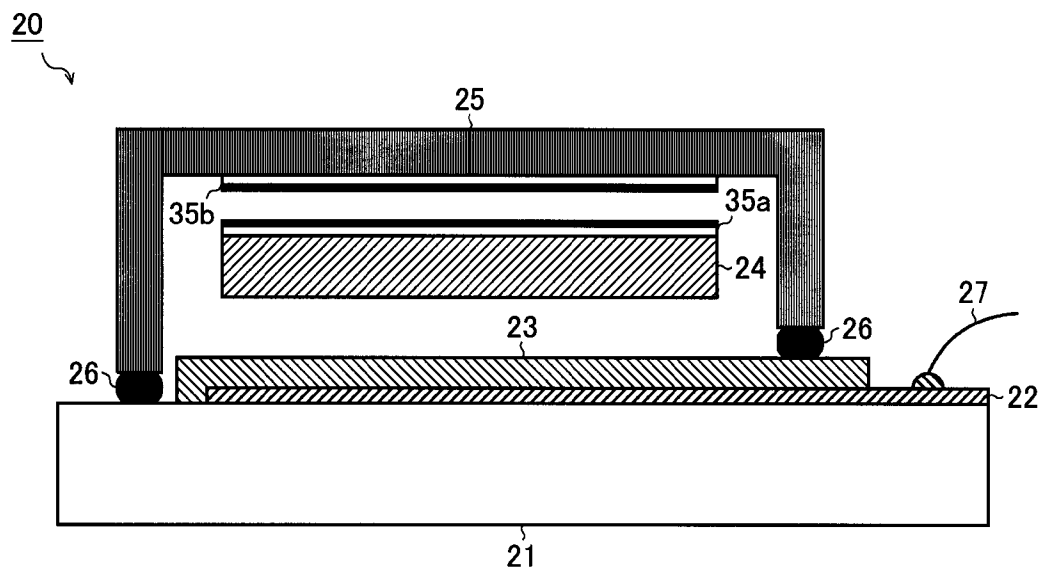
[図15]



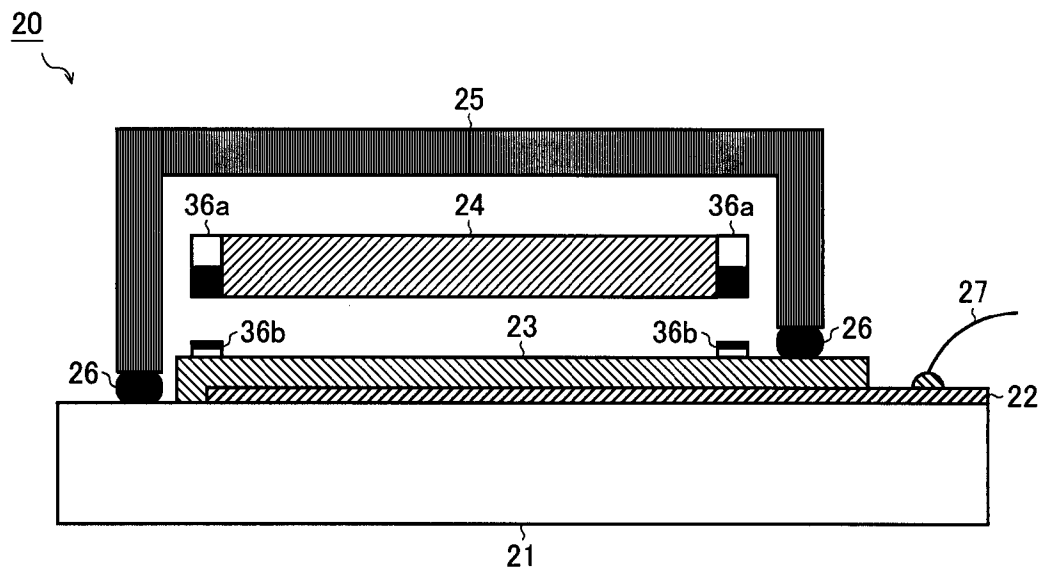
[図16]



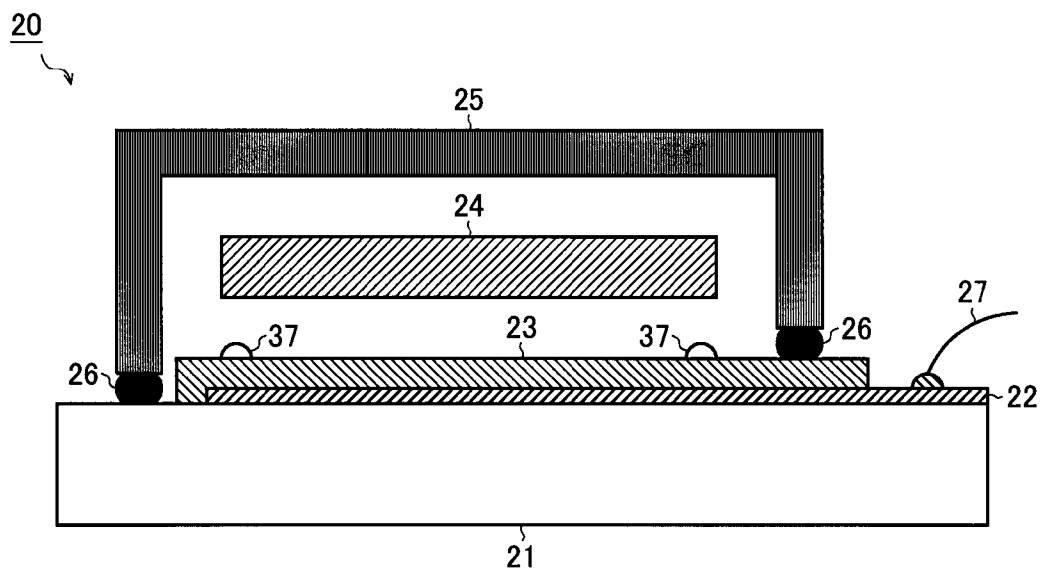
[図17]



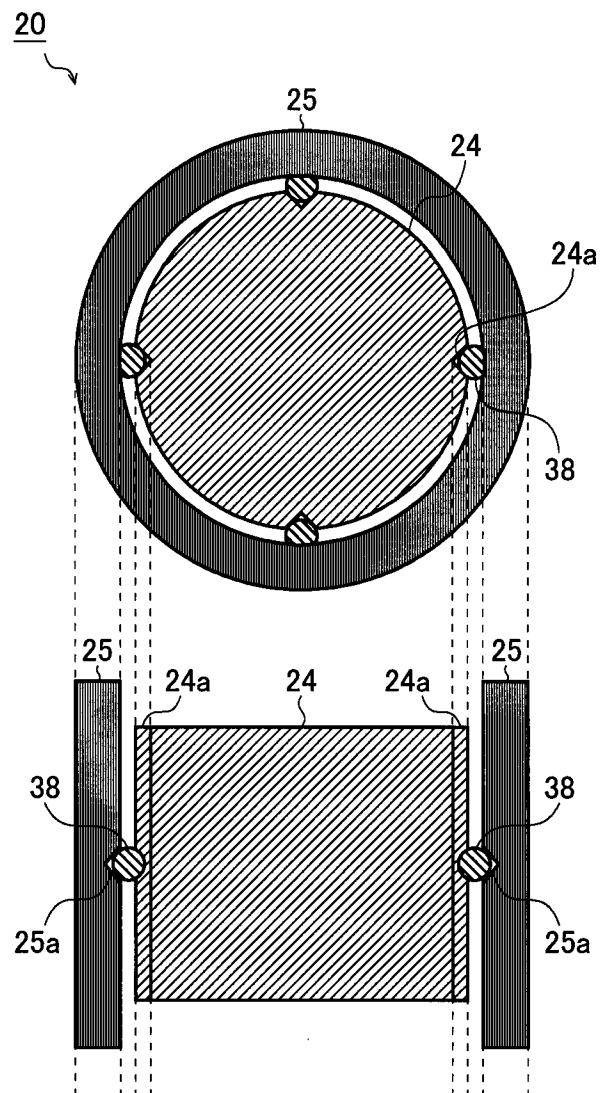
[図18]



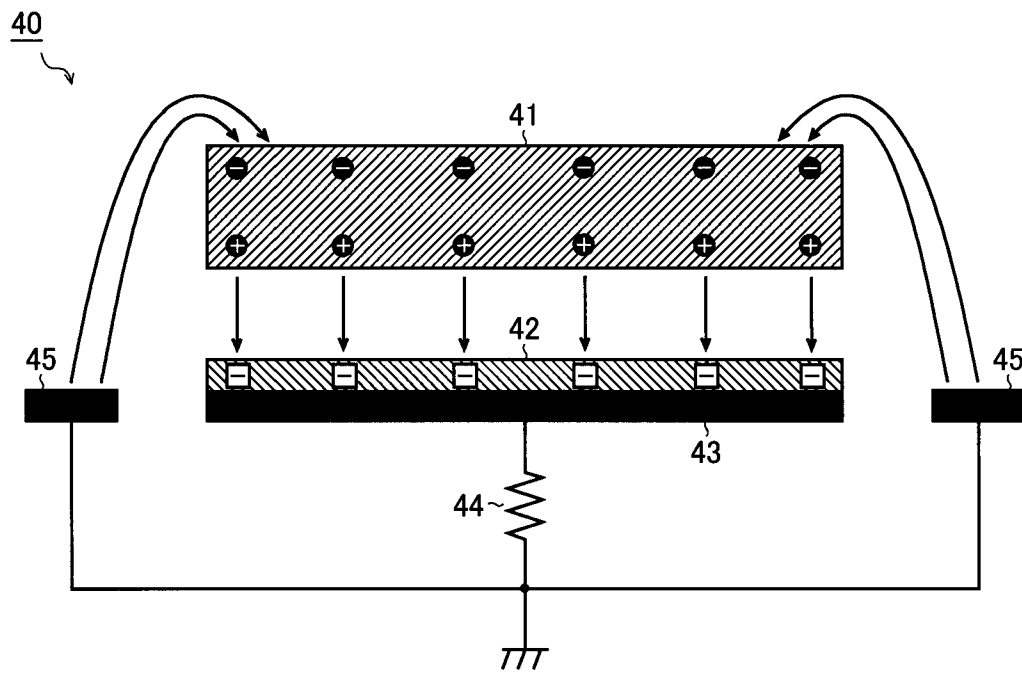
[図19]



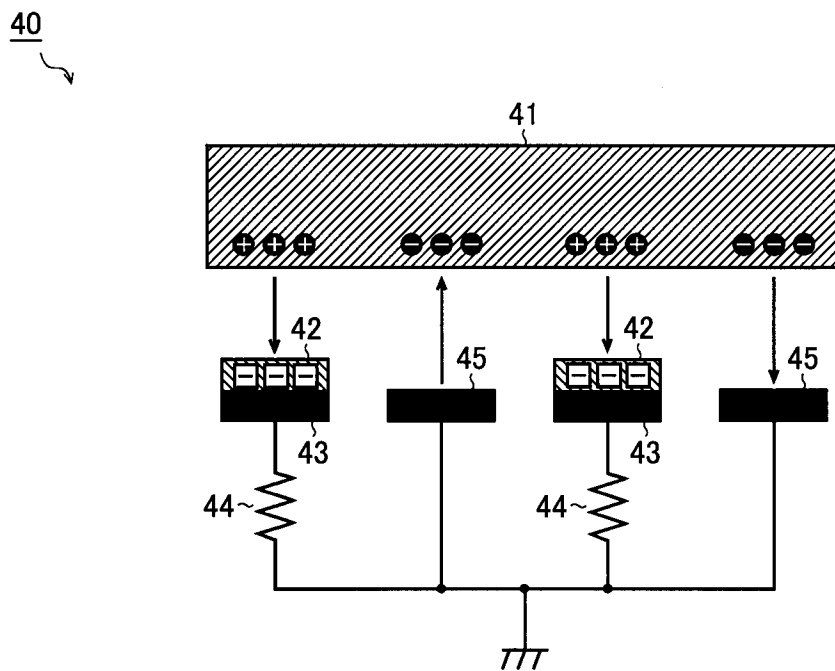
[図20]



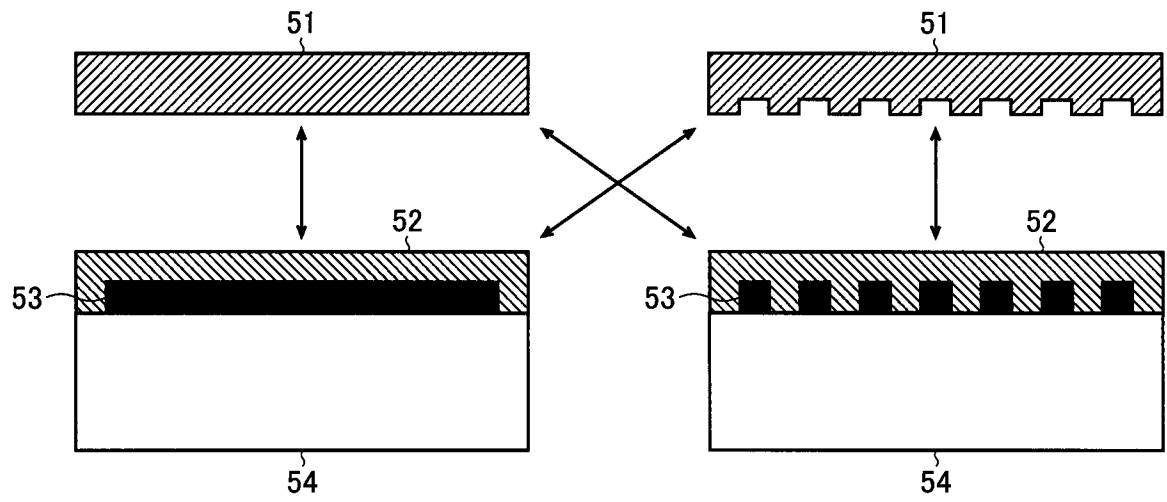
[図22]



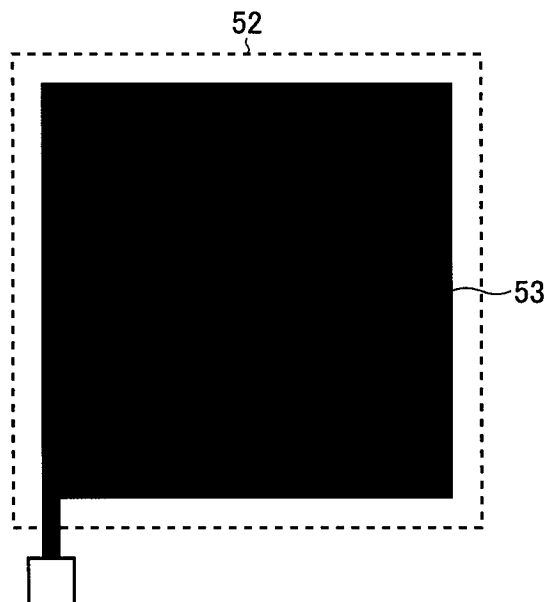
[図23]



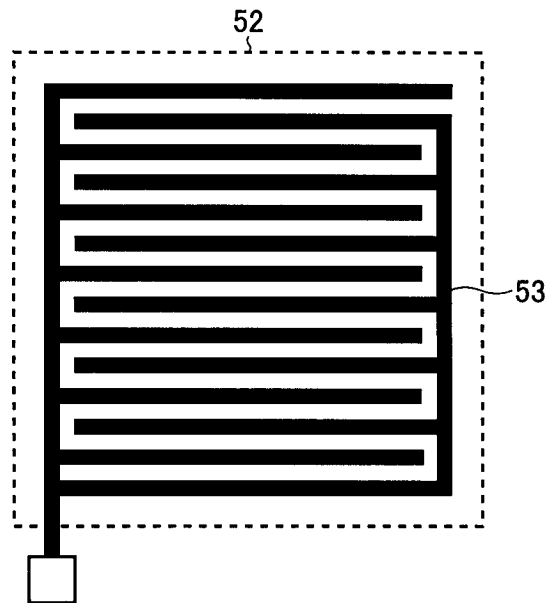
[図24]

50
↘

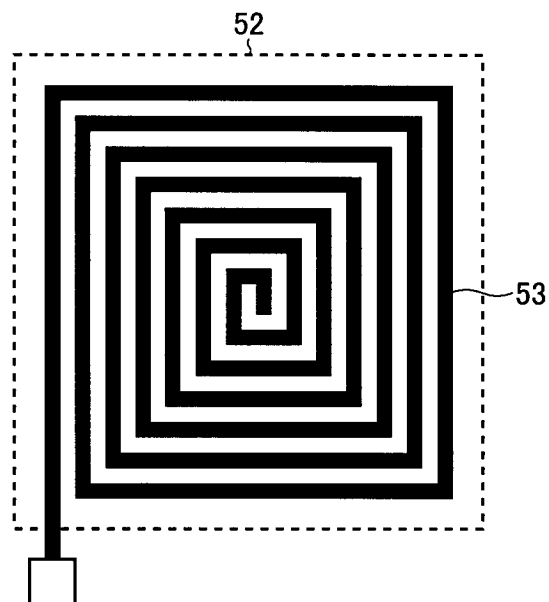
[図25]



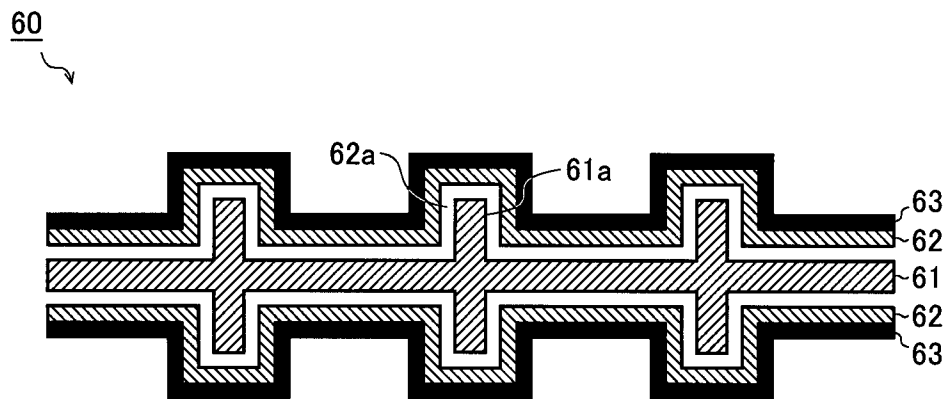
[図26]



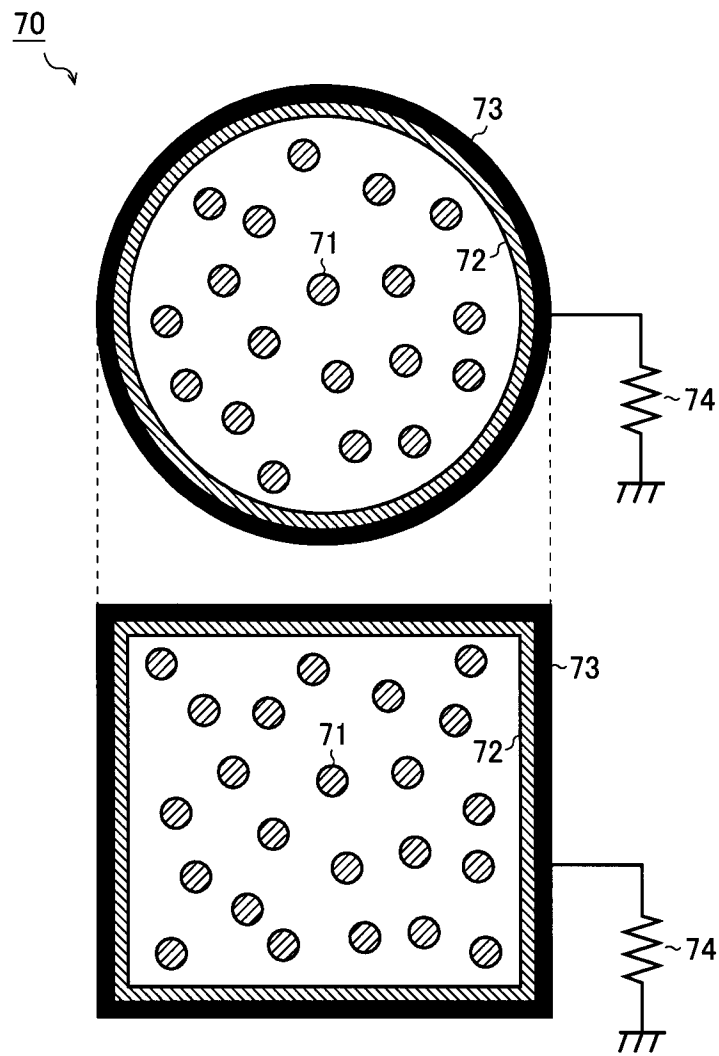
[図27]



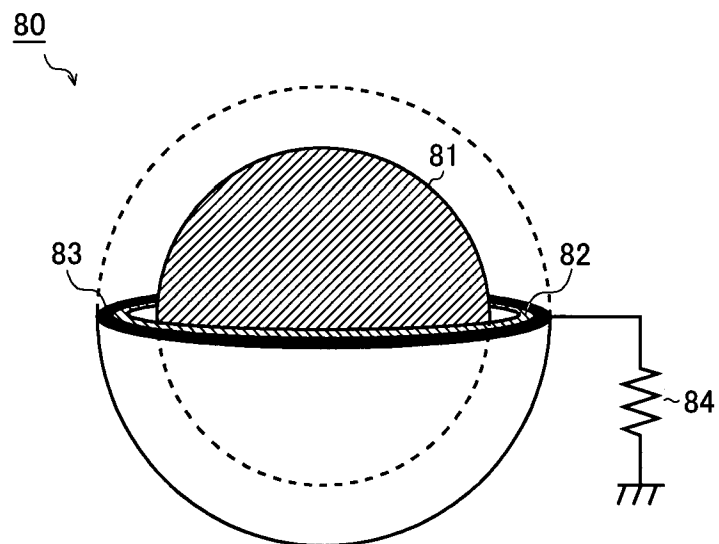
[図28]



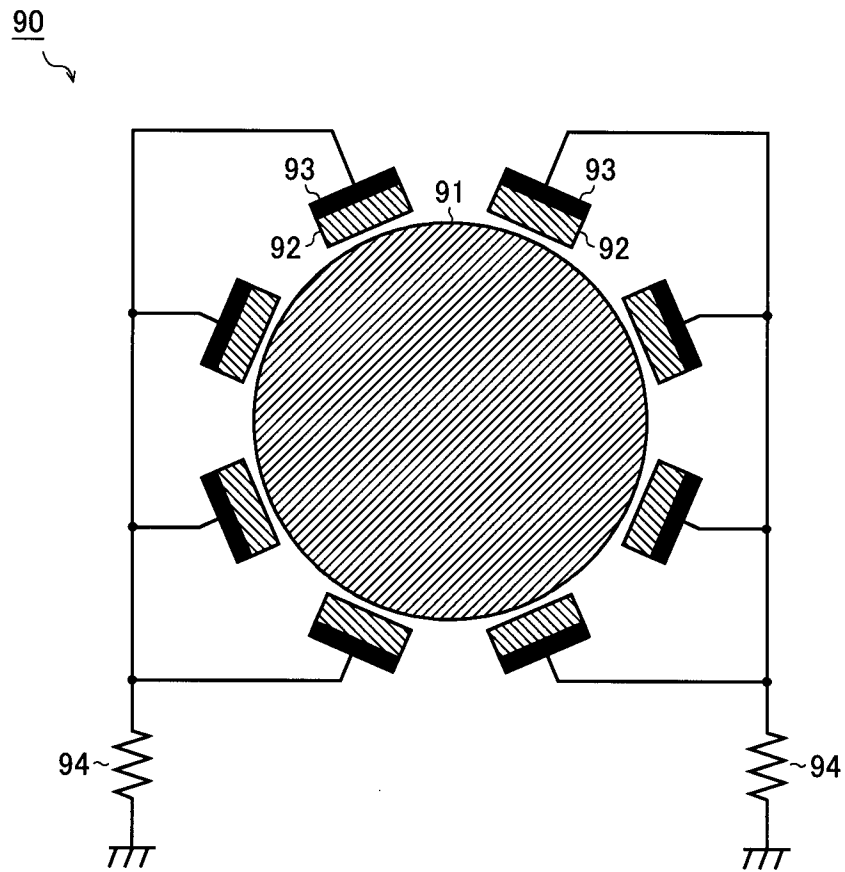
[図29]



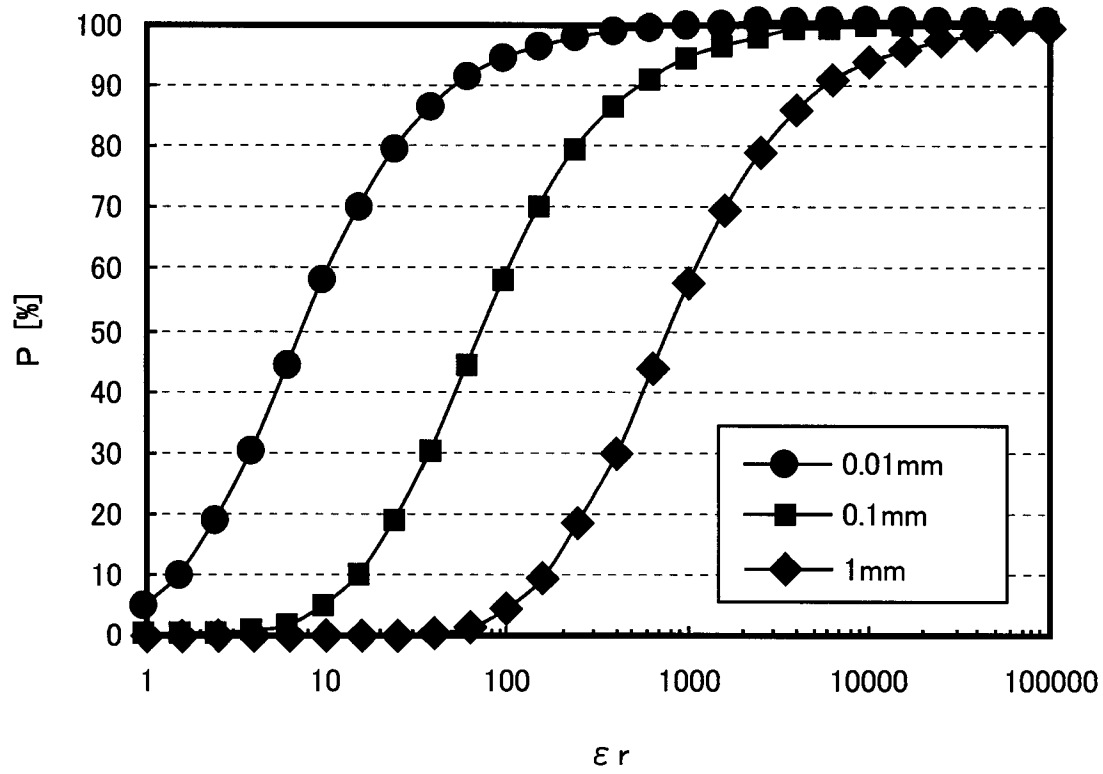
[図30]



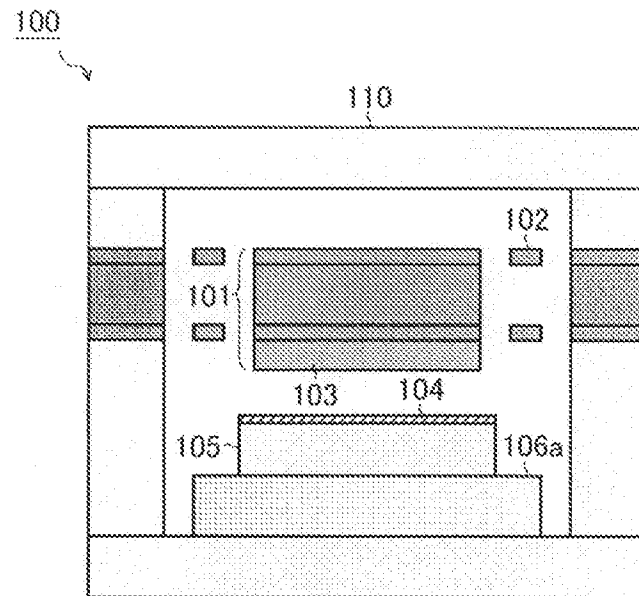
[図31]



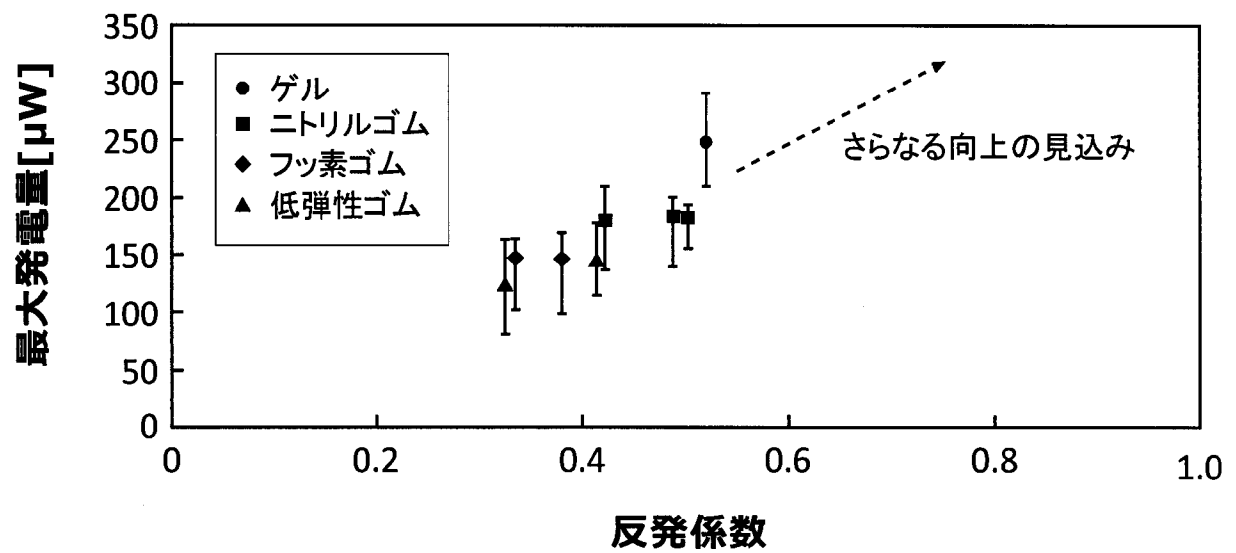
[図32]



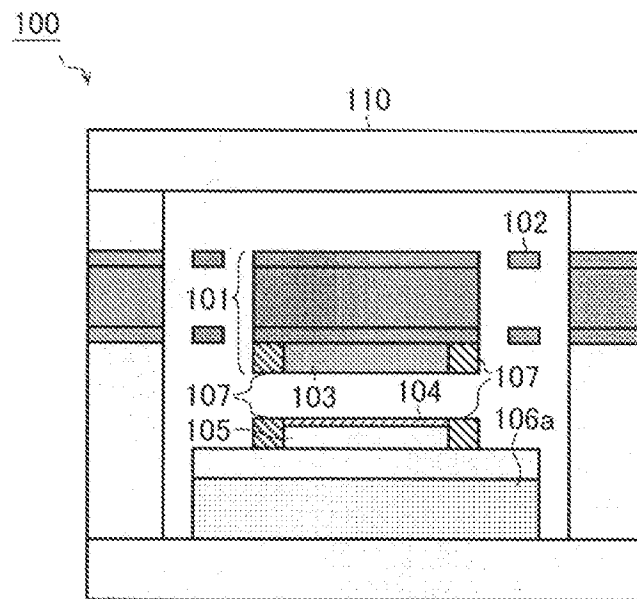
[図33]



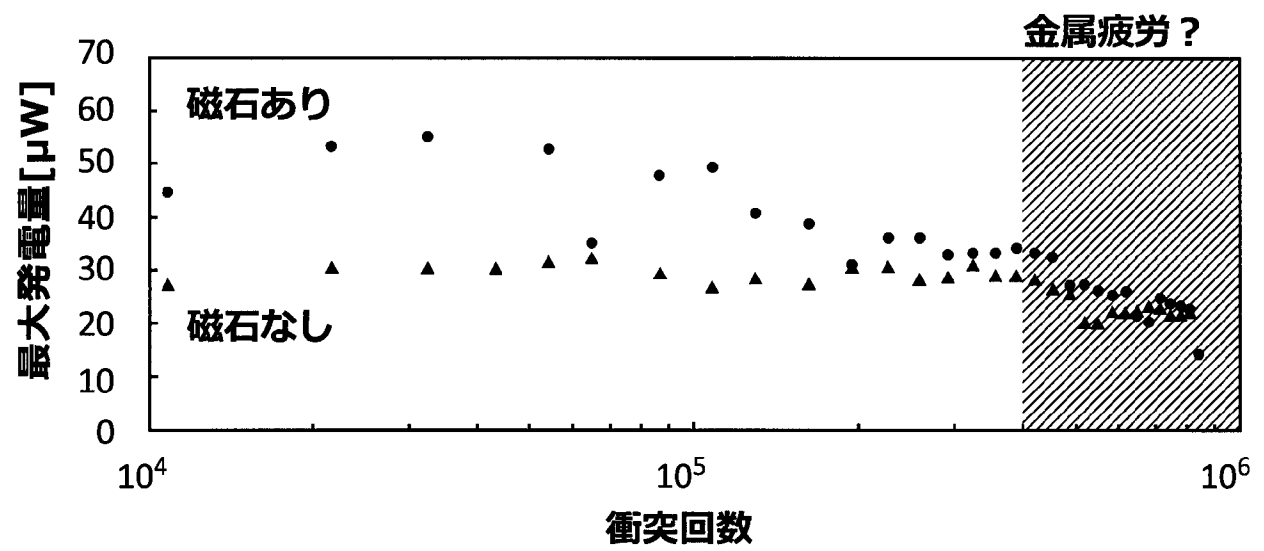
[図34]



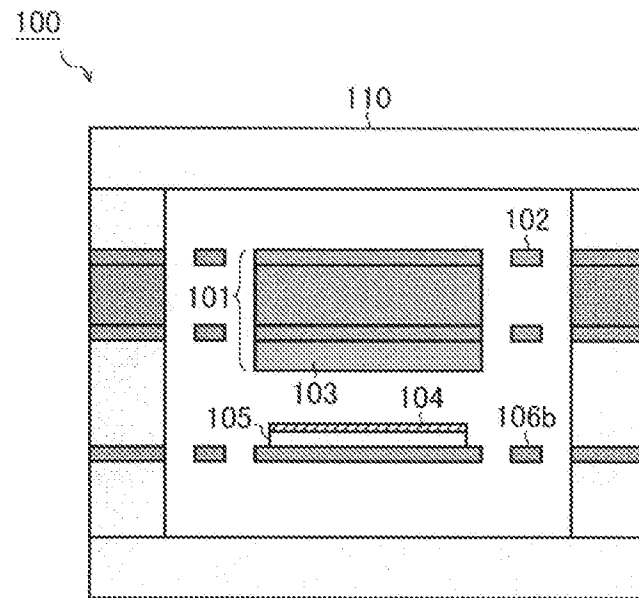
[図35]



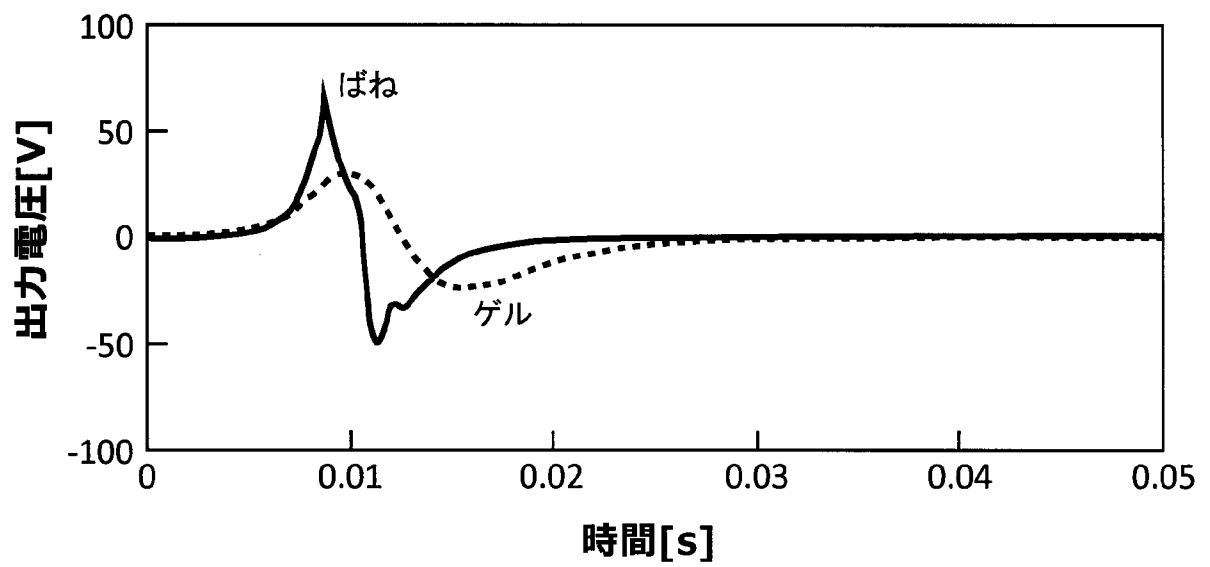
[図36]



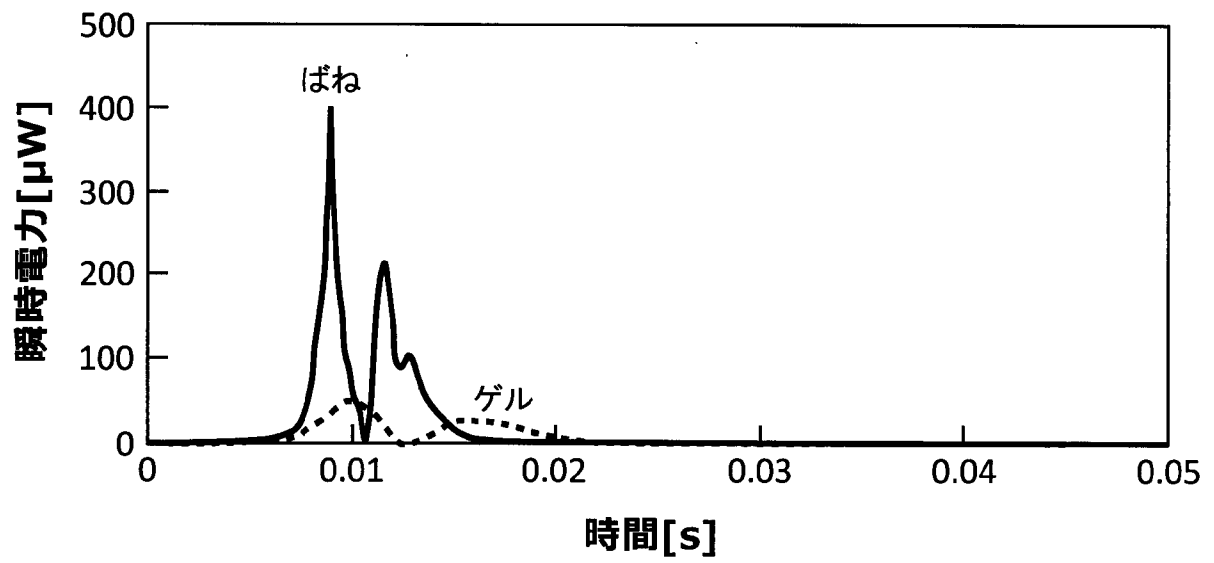
[図37]



[図38]



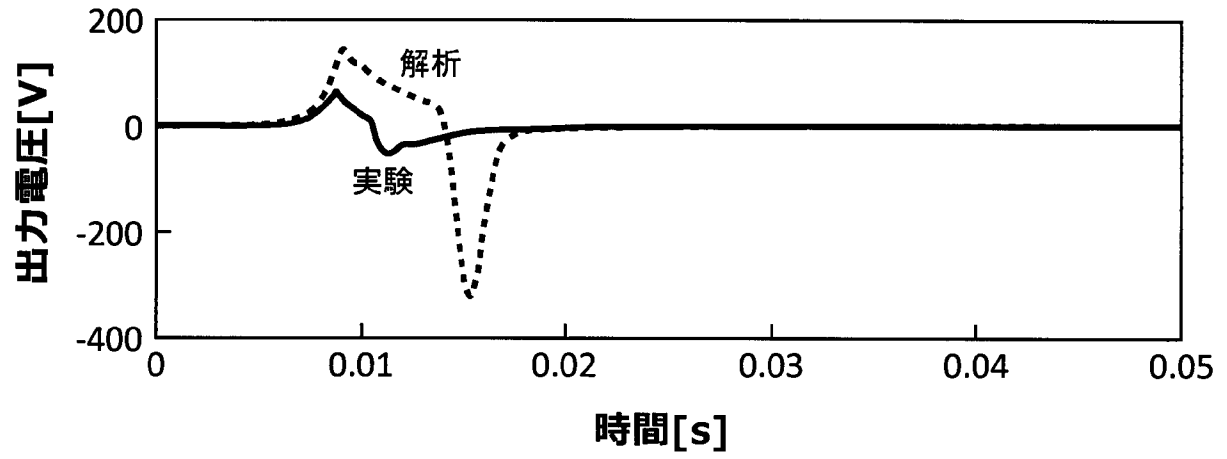
[図39]



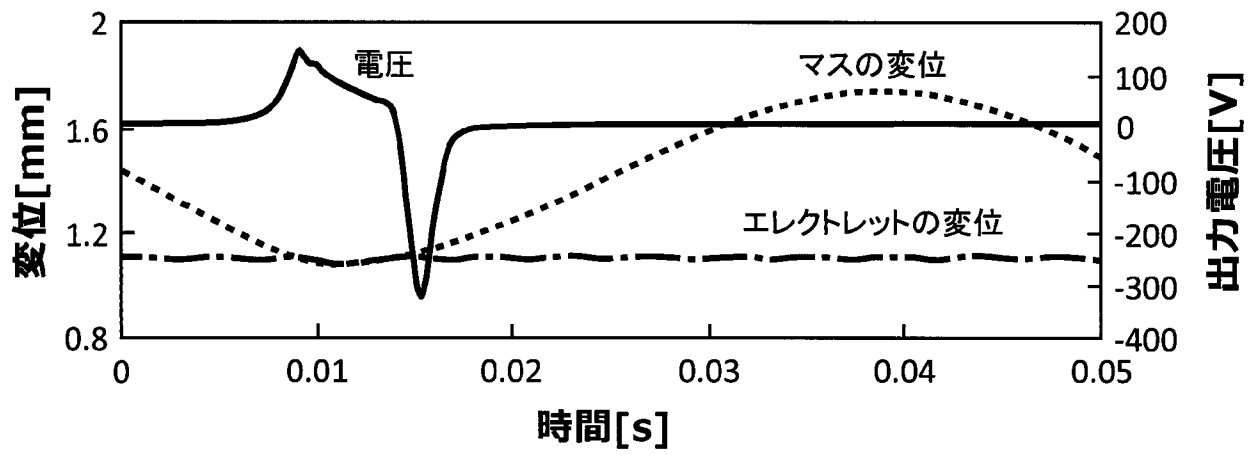
[図40]

	発電量	抵抗値
ばね	16μW	11MΩ
ゲル	5μW	19MΩ

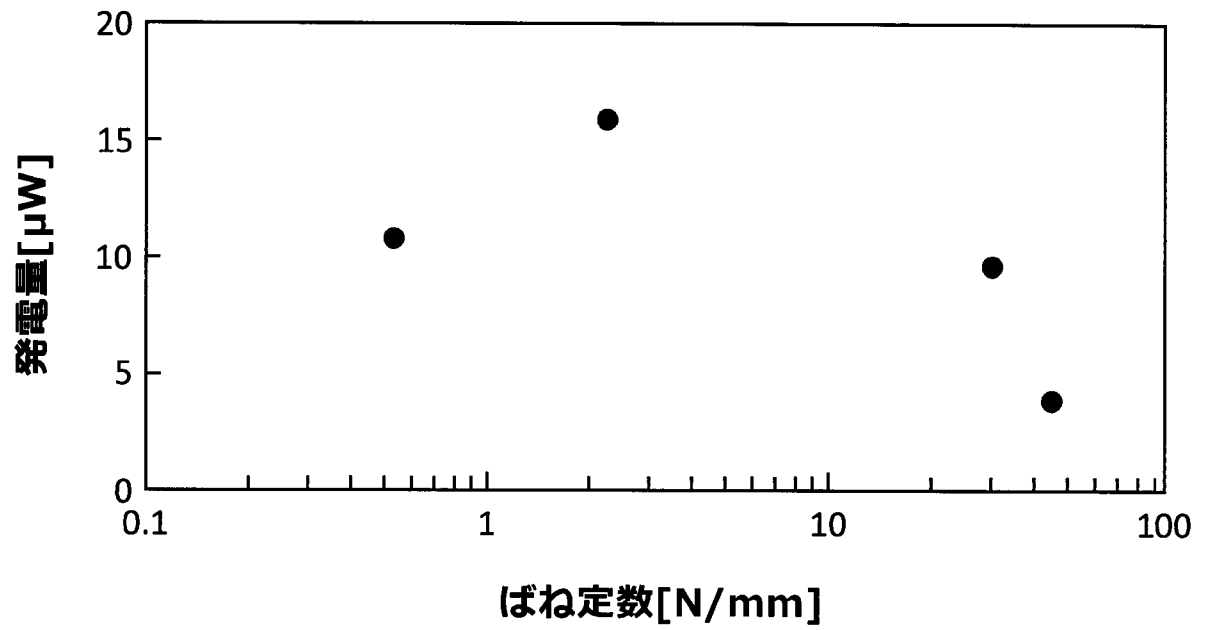
[図41]



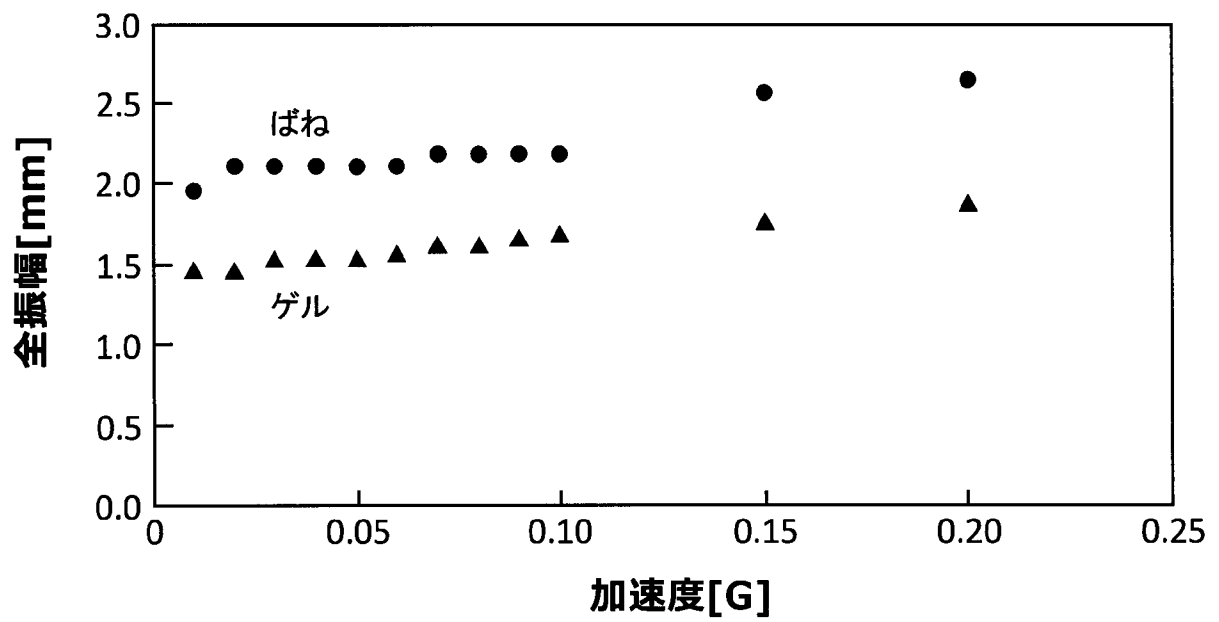
[図42]



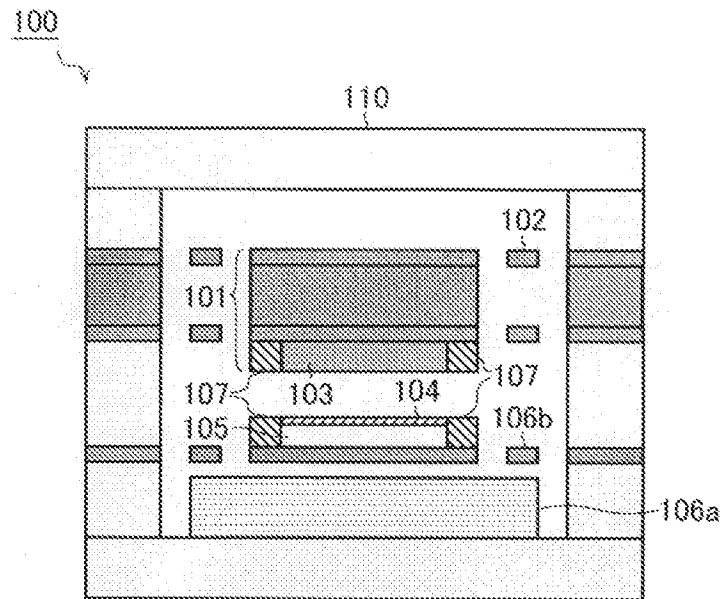
[図43]



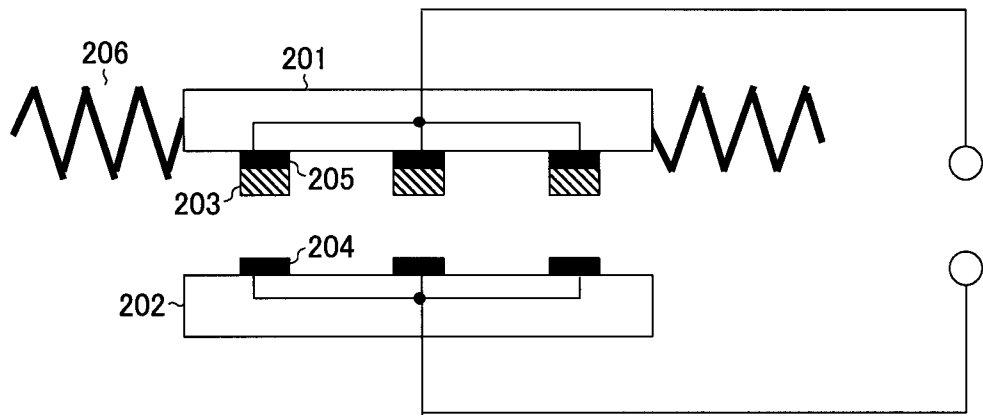
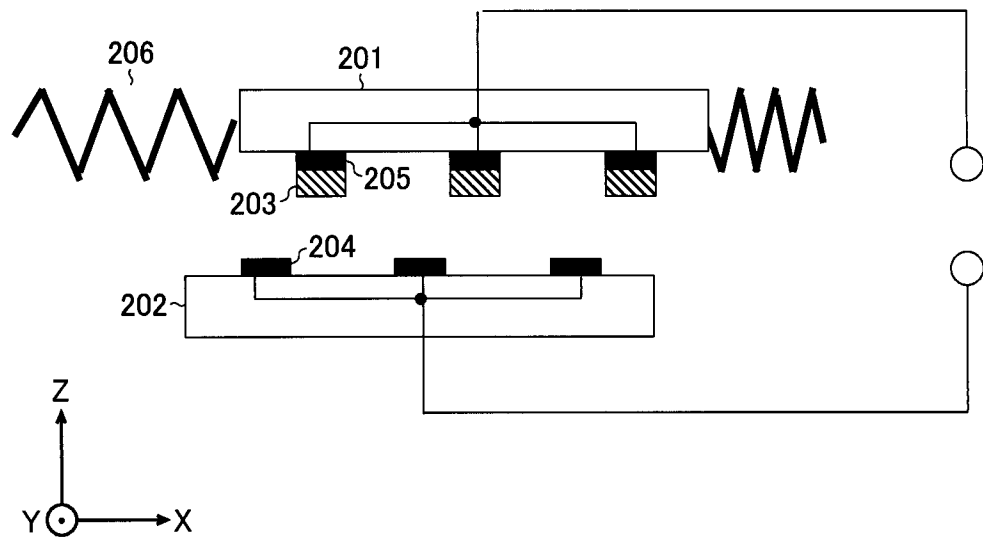
[図44]



[図45]



[図46]

200200

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/063878

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02N1/08 (2006.01) 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)

H02N1/08

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	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

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.
Y A	JP 2013-055724 A (Kansai University, Rohm Co., Ltd.), 21 March 2013 (21.03.2013), paragraphs [0053] to [0068]; fig. 1 & US 2013/0057110 A1	1, 5-10 2-4
Y	JP 2012-200132 A (Casio Computer Co., Ltd.), 18 October 2012 (18.10.2012), paragraphs [0014], [0020], [0042] to [0046]; fig. 1 to 4, 8 & US 2012/0228964 A1 & CN 102684545 A	1, 5-8, 10
Y	US 2003/0081397 A1 (Michael D. POTTER), 01 May 2003 (01.05.2003), paragraphs [0016], [0025], [0048]; fig. 13 & WO 2003/038969 A2 & US 2004/0145271 A1 & US 2004/0155555 A1	1, 7-9

☒ 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
22 July 2015 (22.07.15)

Date of mailing of the international search report
04 August 2015 (04.08.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/063878

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, A	WO 2014/148371 A1 (Tohoku University), 25 September 2014 (25.09.2014), paragraphs [0073] to [0074]; fig. 15 to 16 (Family: none)	1-10

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H02N1/08(2006.01)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（I P C））

Int.Cl. H02N1/08

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	1971-2015年
日本国実用新案登録公報	1996-2015年
日本国登録実用新案公報	1994-2015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
Y A	JP 2013-055724 A（学校法人 関西大学、ローム株式会社） 2013.03.21, 【0053】-【0068】、図1 & US 2013/0057110 A1	1, 5-10 2-4
Y	JP 2012-200132 A（カシオ計算機株式会社）2012.10.18, 【001 4】、【0020】、【0042】-【0046】、図1-4、図8 & US 2012/0228964 A1 & CN 102684545 A	1, 5-8, 10
Y	US 2003/0081397 A1 (Michael D. POTTER) 2003.05.01, [0016]、 [0025]、[0048]、FIG. 13 & WO 2003/038969 A2 & US 2004/0145271 A1 & US 2004/0155555 A1	1, 7-9

☒ 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
「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

22.07.2015

国際調査報告の発送日

04.08.2015

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A/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）

槻木澤 昌司

3V

9326

電話番号 03-3581-1101 内線 3357

C (続き) . 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
P, A	WO 2014/148371 A1 (国立大学法人東北大学) 2014. 09. 25, [0073]-[0074]、図 1 5 - 1 6 (ファミリーなし)	1-10