

(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



(10) 国際公開番号

WO 2011/111493 A1

PCT

(43) 国際公開日
2011年9月15日(15.09.2011)

- (51) 国際特許分類:
G01R 15/20 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/053343
- (22) 国際出願日: 2011年2月17日(17.02.2011)
- (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 2010-056154 2010年3月12日(12.03.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): アルプス・グリーンデバイス株式会社 (ALPS GREEN DEVICES CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1458501 東京都大田区雪谷大塚町1番7号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 一戸 健司 (ICHINOHE, Kenji) [JP/JP]; 〒1458501 東京都大田区雪谷大塚町1番7号 アルプス・グリーンデバイス株式会社内 Tokyo (JP). 斎藤 正路 (SAITO, Masamichi) [JP/JP]; 〒1458501 東京都大田区雪谷大塚町1番7号 アルプス・グリーン

デバイス株式会社内 Tokyo (JP). 高橋 彰 (TAKAHASHI, Akira) [JP/JP]; 〒1458501 東京都大田区雪谷大塚町1番7号 アルプス・グリーンデバイス株式会社内 Tokyo (JP). 井出 洋介 (IDE, Yosuke) [JP/JP]; 〒1458501 東京都大田区雪谷大塚町1番7号 アルプス・グリーンデバイス株式会社内 Tokyo (JP).

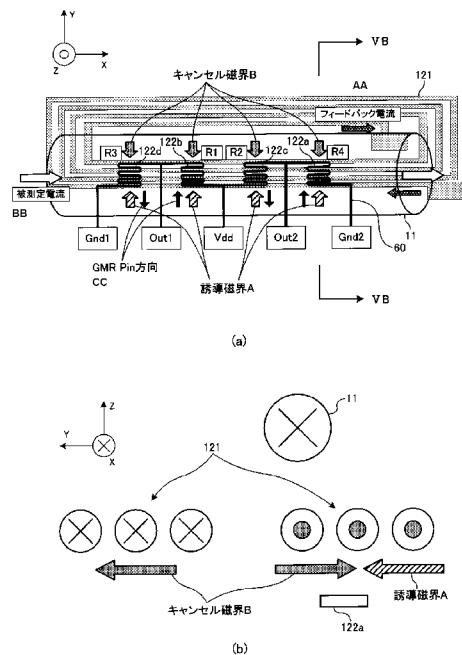
- (74) 代理人: 青木 宏義, 外(AOKI, Hiroyoshi et al.); 〒1020084 東京都千代田区二番町4番3 二番町カシュービル7F Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: CURRENT SENSOR

(54) 発明の名称: 電流センサ

[図5]



A Induced magnetic field
B Cancelling magnetic field
AA Feedback current
BB Current being measured
CC GMR Pin direction

(57) Abstract: The disclosed current sensor can measure a current with high precision as a midpoint potential difference output changes proportionally to an induced magnetic field generated by the current being measured. Said current sensor has a magnetic-field detection bridge circuit comprising four magnetoresistive elements, the resistances of which change due to the application of the induced magnetic field from the current being measured. The outputs of the magnetic-field detection bridge circuit each come from between two of the magnetoresistive elements. Each of the four magnetoresistive elements has the same resistance change rate, and each magnetoresistive element has: a self-pinned ferromagnetic fixed layer comprising a first ferromagnetic film and a second ferromagnetic film coupled antiferromagnetically with an antiparallel coupling film interposed therebetween; a nonmagnetic interlayer; and a soft-magnetic free layer. The magnetization directions of the ferromagnetic fixed layers in each two magnetoresistive elements providing an output are in 180° opposition to each other. The aforementioned magnetism detection bridge circuit is characterized by having wiring that is symmetric with respect to a power-supply point.

(57) 要約: 被測定電流により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示し、高精度で電流測定を行うことができる電流センサを提供すること。本発明の電流センサは、被測定電流からの誘導磁界の印加により抵抗値が変化する4つの磁気抵抗効果素子で構成され、2つの磁気抵抗効果素子間の出力を備える磁界検出ブリッジ回路を有し、4つの磁気抵抗効果素子は、抵抗変化率が同じであり、反平行結合膜を介して第1の強磁性膜と第2の強磁性膜とを反強磁性的に結合させてなるセルフピン止め型の強磁性固定層と、非磁性中間層と、軟磁性自由層とを有し、前記出力を与える2つの磁気抵抗効果素子の強磁性固定層の磁化方向が互いに180°異なる方向であり、磁気検出ブリッジ回路は、電源供給点に対して対称である配線を有することを特徴とする。

WO 2011/111493 A1



(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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, 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：電流センサ

技術分野

[0001] 本発明は、磁気抵抗効果素子（TMR素子、GMR素子）を用いた電流センサに関する。

背景技術

[0002] 電気自動車においては、エンジンで発電した電気を用いてモータを駆動しており、このモータ駆動用の電流の大きさは、例えば電流センサにより検出される。この電流センサとしては、導体の周囲に、一部に切り欠き（コアギャップ）を有する磁気コアを配置し、このコアギャップ内に磁気検出素子を配置してなるものである。

[0003] 電流センサの磁気検出素子として、磁化方向が固定された固定磁性層、非磁性層、及び磁化方向が外部磁界に対して変動するフリー磁性層の積層構造を備える磁気抵抗効果素子（GMR素子、TMR素子）などが用いられている。このような電流センサにおいては、磁気抵抗効果素子と固定抵抗素子とでフルブリッジ回路を構成している（特許文献1）。

[0004] 磁気抵抗効果素子と固定抵抗素子とで磁気検出ブリッジ回路（磁界検出ブリッジ回路）を構成した電流センサとしては、例えば、図16及び図17に示す磁気平衡式電流センサがある。磁気平衡式電流センサは、磁気検出ブリッジ回路2で得られる電圧差によりフィードバックコイルに通電して、導体1に通電する被測定電流Iにより発生する誘導磁界とフィードバックコイルにより発生するキャンセル磁界とが相殺される平衡状態となったときのフィードバックコイルに流れる電流に基づいて被測定電流を測定するものである。

[0005] 図16に示す電流センサの磁気検出ブリッジ回路2は、1つの磁気抵抗効果素子201と、3つの固定抵抗素子202a～202cとで構成されている。この磁気検出ブリッジ回路2において、ゼロ磁場での磁気抵抗効果素子

201の抵抗値と、固定抵抗素子202a~202cの抵抗値とは同じである(R_{com})。また、固定抵抗素子202b, 202c間の出力を $Out1$ とし、磁気抵抗効果素子201と固定抵抗素子202aとの間の出力を $Out2$ とする。また、固定抵抗素子202bの抵抗値を $R1$ とし、固定抵抗素子202aの抵抗値を $R2$ とし、固定抵抗素子202cの抵抗値を $R3$ とし、磁気抵抗効果素子201の抵抗値を $R4$ とする。

[0006] ここで、被測定電流 I により発生する誘導磁界による磁気抵抗効果素子201の抵抗変化量を ΔR としたときに、ブリッジ中点電位差($Out1 - Out2$)を求めると、次のようになる。

$$V_{dd} - G_{nd1} \text{間抵抗} = R1 + R3 = 2 \times R_{com}$$

$$V_{dd} - G_{nd2} \text{間抵抗} = R2 + (R4 - \Delta R) = 2 \times R_{com} - \Delta R$$

$$Out1 \text{電位} = (R_{com}) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd}$$

$$Out2 \text{電位} = (R_{com} - \Delta R) / (2 \times R_{com} - \Delta R) \times V_{dd}$$

$$Out1 - Out2 \text{電位差} = \Delta R / \{2 \times (2 \times R_{com} - \Delta R)\} \times V_{dd}$$

[0007] 図17に示す電流センサの磁気検出ブリッジ回路2は、2つの磁気抵抗効果素子201a, 201bと、2つの固定抵抗素子202a, 202bとで構成されている。この磁気検出ブリッジ回路2において、ゼロ磁場での磁気抵抗効果素子201a, 201bの抵抗値と、固定抵抗素子202a, 201bの抵抗値とは同じである(R_{com})。また、磁気抵抗効果素子201a, 201bの抵抗変化率は同じである。また、磁気抵抗効果素子201bと固定抵抗素子202bとの間の出力を $Out1$ とし、磁気抵抗効果素子201aと固定抵抗素子202aとの間の出力を $Out2$ とする。また、磁気抵抗効果素子201bの抵抗値を $R1$ とし、固定抵抗素子202aの抵抗値を $R2$ とし、固定抵抗素子202bの抵抗値を $R3$ とし、磁気抵抗効果素子201aの抵抗値を $R4$ とする。

[0008] ここで、被測定電流 I により発生する誘導磁界による磁気抵抗効果素子201a, 201bの抵抗変化量を ΔR としたときに、ブリッジ中点電位差($Out1 - Out2$)を求めると、次のようになる。

$$V_{dd} - G_{nd} \text{ 1間抵抗} = (R_1 - \Delta R) + R_3 = 2 \times R_{com} - \Delta R$$

$$V_{dd} - G_{nd} \text{ 2間抵抗} = R_2 + (R_4 - \Delta R) = 2 \times R_{com} - \Delta R$$

$$O_{ut} \text{ 1 電位} = (R_{com}) / (2 \times R_{com} - \Delta R) \times V_{dd}$$

$$O_{ut} \text{ 2 電位} = (R_{com} - \Delta R) / (2 \times R_{com} - \Delta R) \times V_{dd}$$

$$O_{ut} \text{ 1} - O_{ut} \text{ 2 電位差} = \Delta R / (2 \times R_{com} - \Delta R) \times V_{dd}$$

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：特開2007-248054号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] しかしながら、図16及び図17に示す磁気検出ブリッジ回路の構成においては、ブリッジ中点電位差の式の分母に ΔR の項を含んでいる。このため、被測定電流Iにより発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が完全な比例変化を示さず、測定精度が低下するという問題がある。

[0011] 本発明はかかる点に鑑みてなされたものであり、被測定電流により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示し、高精度で電流測定を行うことができる電流センサ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

[0012] 本発明の電流センサは、被測定電流からの誘導磁界の印加により抵抗値が変化する4つの磁気抵抗効果素子で構成され、2つの磁気抵抗効果素子間の出力を備える磁界検出ブリッジ回路を有する電流センサであって、前記4つの磁気抵抗効果素子は、抵抗変化率が同じであり、反平行結合膜を介して第1の強磁性膜と第2の強磁性膜とを反強磁性的に結合させてなるセルフピン止め型の強磁性固定層と、非磁性中間層と、軟磁性自由層とを有し、前記出力を与える2つの磁気抵抗効果素子の強磁性固定層の磁化方向が互いに180°異なる方向であり、前記磁気検出ブリッジ回路は、電源供給点に対して対称である配線を有することを特徴とする。

- [0013] この構成によれば、磁気検出ブリッジ回路において中点電位を出力する2つの磁気抵抗効果素子のセルフピン止め型の強磁性固定層の磁化方向が互いに180°異なる方向であるので、被測定電流により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示し、高精度で電流測定を行うことができる。また、この構成によれば、磁気検出ブリッジ回路における配線が電源供給点に対して対称であるので、磁気検出ブリッジ回路内で配線抵抗の差がなく、より高精度に電流測定を行うことができる。
- [0014] 本発明の電流センサにおいては、前記磁気抵抗効果素子の近傍に配置され、前記誘導磁界を相殺するキャンセル磁界を発生するフィードバックコイルと、前記誘導磁界を減衰させると共に前記キャンセル磁界をエンハンスする磁気シールドと、をさらに具備し、前記磁気検出ブリッジ回路で得られる電圧差により前記フィードバックコイルに通電して前記誘導磁界と前記キャンセル磁界とが相殺される平衡状態となったときの前記フィードバックコイルに流れる電流に基づいて前記被測定電流を測定することが好ましい。
- [0015] 本発明の電流センサにおいては、前記4つの磁気抵抗効果素子は、その長手方向が互いに平行になるように配置された複数の帯状の長尺パターンが折り返してなる形状を有し、前記誘導磁界及び前記キャンセル磁界が前記長手方向に直交する方向に沿うように印加されることが好ましい。
- [0016] 本発明の電流センサは、前記磁界検出ブリッジ回路により、前記誘導磁界に比例した前記4つの磁気抵抗効果素子の出力により前記被測定電流を測定することが好ましい。
- [0017] 本発明の電流センサは、前記第1の強磁性膜が40原子%～80原子%のFeを含むCoFe合金で構成され、前記第2の強磁性膜が0原子%～40原子%のFeを含むCoFe合金で構成されていることが好ましい。
- [0018] 本発明の電流センサは、前記磁気シールドは、アモルファス磁性材料、パーマロイ系磁性材料、及び鉄系微結晶材料からなる群より選ばれた高透磁率材料で構成されていることが好ましい。

発明の効果

[0019] 本発明によれば、被測定電流からの誘導磁界の印加により抵抗値が変化する4つの磁気抵抗効果素子で構成され、2つの磁気抵抗効果素子間の出力を備える磁界検出ブリッジ回路を有する電流センサであって、前記4つの磁気抵抗効果素子は、抵抗変化率が同じであり、反平行結合膜を介して第1の強磁性膜と第2の強磁性膜とを反強磁性的に結合させてなるセルフピン止め型の強磁性固定層と、非磁性中間層と、軟磁性自由層とを有し、前記出力を与える2つの磁気抵抗効果素子の強磁性固定層の磁化方向が互いに 180° 異なる方向であり、前記磁気検出ブリッジ回路は、電源供給点に対して対称である配線を有するので、被測定電流により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示し、さらに、磁気検出ブリッジ回路内で配線抵抗の差がなく、高精度に電流測定を行うことができる。

図面の簡単な説明

- [0020] [図1]本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサを示す図である。
- [図2]本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサを示す図である。
- [図3]図1に示す磁気平衡式電流センサを示す断面図である。
- [図4]本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路を示す図である。
- [図5] (a)は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路の配線パターンを説明するための図であり、(b)は、(a)におけるVB-VB線に沿う断面図である。
- [図6] (a)は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路の配線パターンを説明するための図であり、(b)は、(a)におけるVIB-VIB線に沿う断面図である。
- [図7] (a)は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路の配線パターンを説明するための図であり、(b)は、(a)におけるVIIIB-VIIIB線に沿う断面図である。
- [図8]中点電位差と被測定電流による誘導磁界との間の関係を示す図である。
- [図9]本発明の実施の形態に係る磁気比例式電流センサにおける磁気検出ブリ

ツジ回路の配線パターンを説明するための図である。

[図10] (a) ~ (c) は、本発明の実施の形態に係る電流センサにおける磁気抵抗効果素子の製造方法を説明するための図である。

[図11] (a) ~ (c) は、本発明の実施の形態に係る電流センサにおける磁気抵抗効果素子の製造方法を説明するための図である。

[図12] 本発明の実施の形態に係る磁気比例式電流センサを示す図である。

[図13] 本発明の実施の形態に係る磁気比例式電流センサを示す図である。

[図14] 図 1 2 に示す磁気比例式電流センサを示す断面図である。

[図15] 本発明の実施の形態に係る磁気比例式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路を示す図である。

[図16] 従来の磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路を示す図である。

[図17] 従来の磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路を示す図である。

発明を実施するための形態

[0021] 以下、本発明の実施の形態について、添付図面を参照して詳細に説明する。まず、本発明に係る電流センサが磁気平衡式電流センサである場合について説明する。

[0022] 図 1 及び図 2 は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサを示す図である。本実施の形態においては、図 1 及び図 2 に示す磁気平衡式電流センサは、被測定電流 I が流れる導体 1 1 の近傍に配設される。この磁気平衡式電流センサは、導体 1 1 に流れる被測定電流 I による誘導磁界を打ち消す磁界（キャンセル磁界）を生じさせるフィードバック回路 1 2 を備えている。このフィードバック回路 1 2 は、被測定電流 I によって発生する磁界を打ち消す方向に巻回されたフィードバックコイル 1 2 1 と、4 つの磁気抵抗効果素子 1 2 2 a ~ 1 2 2 d とを有する。

[0023] フィードバックコイル 1 2 1 は平面コイルで構成されている。この構成においては、磁気コアを有しないので、低コストでフィードバックコイルを作

製することができる。また、トロイダルコイルの場合に比べて、フィードバックコイルから生じるキャンセル磁界が広範囲に拡がることを防止でき、周辺回路に影響を与えることを回避できる。さらに、トロイダルコイルの場合に比べて、被測定電流が交流の場合に、フィードバックコイルによるキャンセル磁界の制御が容易であり、制御のために流す電流もそれほど大きくなる。これらの効果については、被測定電流が交流で高周波になるほど大きくなる。フィードバックコイル121は平面コイルで構成する場合において、平面コイルの形成面と平行な面内で誘導磁界とキャンセル磁界の両方が生じるように平面コイルが設けられていることが好ましい。

[0024] 磁気抵抗効果素子122a~122dは、被測定電流Iからの誘導磁界の印加により抵抗値が変化する。この4つの磁気抵抗効果素子122a~122dにより磁界検出ブリッジ回路を構成している。このように磁気抵抗効果素子を有する磁界検出ブリッジ回路を用いることにより、高感度の磁気平衡式電流センサを実現することができる。

[0025] この磁界検出ブリッジ回路は、被測定電流Iにより生じた誘導磁界に応じた電圧差を生じる2つの出力を備える。図2に示す磁界検出ブリッジ回路においては、磁気抵抗効果素子122bと磁気抵抗効果素子122cとの間の接続点に電源V_{dd}が接続されており、磁気抵抗効果素子122aと磁気抵抗効果素子122dとの間の接続点にグランド(GND)が接続されている。さらに、この磁界検出ブリッジ回路においては、磁気抵抗効果素子122a, 122b間の接続点から一つの出力(Out1)を取り出し、磁気抵抗効果素子122c, 122d間の接続点からもう一つの出力(Out2)を取り出している。これらの2つの出力は増幅器124で増幅され、フィードバックコイル121に電流(フィードバック電流)として与えられる。このフィードバック電流は、誘導磁界に応じた電圧差に対応する。このとき、フィードバックコイル121には、誘導磁界を相殺するキャンセル磁界が発生する。そして、誘導磁界とキャンセル磁界とが相殺される平衡状態となったときのフィードバックコイル121に流れる電流に基づいて検出部(検出抵

抗R)で被測定電流を測定する。

[0026] 図3は、図1に示す磁気平衡式電流センサを示す断面図である。図3に示すように、本実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおいては、フィードバックコイル、磁気シールド及び磁界検出ブリッジ回路が同一基板21上に形成されている。図3に示す構成においては、フィードバックコイルが、磁気シールドと磁界検出ブリッジ回路の間に配置され、磁気シールドが被測定電流Iに近い側に配置されている。すなわち、導体11に近い側から磁気シールド、フィードバックコイル、磁気抵抗効果素子の順に配置する。これにより、磁気抵抗効果素子を導体11から最も遠ざけることができ、被測定電流Iから磁気抵抗効果素子に印加される誘導磁界を小さくすることができる。また、磁気シールドを最も導体11に近づけることができるので、誘導磁界の減衰効果をより高めることができる。したがって、フィードバックコイルからのキャンセル磁界を小さくすることができる。

[0027] 図3に示す層構成について詳細に説明する。図3に示す磁気平衡式電流センサにおいては、基板21上に絶縁層である熱シリコン酸化膜22が形成されている。熱シリコン酸化膜22上には、アルミニウム酸化膜23が形成されている。アルミニウム酸化膜23は、例えば、スパッタリングなどの方法により成膜することができる。また、基板21としては、シリコン基板などが用いられる。

[0028] アルミニウム酸化膜23上には、磁気抵抗効果素子122a~122dが形成されており、磁界検出ブリッジ回路が作り込まれる。磁気抵抗効果素子122a~122dとしては、TMR素子(トンネル型磁気抵抗効果素子)、GMR素子(巨大磁気抵抗効果素子)などを用いることができる。本発明に係る磁気平衡式電流センサにおいて用いられる磁気抵抗効果素子の膜構成については後述する。

[0029] 磁気抵抗効果素子としては、図2の拡大図に示すように、その長手方向が互いに平行になるように配置された複数の帯状の長尺パターン(ストライプ)が折り返してなる形状(ミアンダ形状)を有するGMR素子であることが

好ましい。このミアンダ形状において、感度軸方向（Pin方向）は、長尺パターンの長手方向（ストライプ長手方向）に対して直交する方向（ストライプ幅方向）である。このミアンダ形状においては、誘導磁界及びキャンセル磁界がストライプ長手方向に直交する方向（ストライプ幅方向）に沿うように印加される。

[0030] このミアンダ形状においては、リニアリティを考慮すると、ピン（Pin）方向の幅が $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ であることが好ましい。この場合において、リニアリティを考慮すると、長手方向が誘導磁界の方向及びキャンセル磁界の方向に対して共に垂直になることが望ましい。このようなミアンダ形状にすることにより、ホール素子よりも少ない端子数（2端子）で磁気抵抗効果素子の出力を採ることができる。

[0031] また、アルミニウム酸化膜23上には、電極24が形成されている。電極24は、電極材料を成膜した後に、フォトリソグラフィ及びエッチングにより形成することができる。

[0032] 磁気抵抗効果素子122a~122d及び電極24を形成したアルミニウム酸化膜23上には、絶縁層としてポリイミド層25が形成されている。ポリイミド層25は、ポリイミド材料を塗布し、硬化することにより形成することができる。

[0033] ポリイミド層25上には、シリコン酸化膜27が形成されている。シリコン酸化膜27は、例えば、スパッタリングなどの方法により成膜することができる。

[0034] シリコン酸化膜27上には、フィードバックコイル121が形成されている。フィードバックコイル121は、コイル材料を成膜した後に、フォトリソグラフィ及びエッチングにより形成することができる。あるいは、フィードバックコイル121は、下地材料を成膜した後に、フォトリソグラフィ及びめっきにより形成することができる。

[0035] また、シリコン酸化膜27上には、フィードバックコイル121の近傍にコイル電極28が形成されている。コイル電極28は、電極材料を成膜した

後に、フォトリソグラフィ及びエッチングにより形成することができる。

[0036] フィードバックコイル121及びコイル電極28を形成したシリコン酸化膜27上には、絶縁層としてポリイミド層29が形成されている。ポリイミド層29は、ポリイミド材料を塗布し、硬化することにより形成することができる。

[0037] ポリイミド層29上には、磁気シールド30が形成されている。磁気シールド30を構成する材料としては、アモルファス磁性材料、パーマロイ系磁性材料、又は鉄系微結晶材料等の高透磁率材料を用いることができる。

[0038] ポリイミド層29上には、シリコン酸化膜31が形成されている。シリコン酸化膜31は、例えば、スパッタリングなどの方法により成膜することができる。ポリイミド層29及びシリコン酸化膜31の所定の領域（コイル電極28の領域及び電極24の領域）にコンタクトホールが形成され、そのコンタクトホールに電極パッド32、26がそれぞれ形成されている。コンタクトホールの形成には、フォトリソグラフィ及びエッチングなどが用いられる。電極パッド32、26は、電極材料を成膜した後に、フォトリソグラフィ及びめっきにより形成することができる。

[0039] このような構成を有する磁気平衡式電流センサにおいては、図3に示すように、被測定電流Iから発生した誘導磁界Aを磁気抵抗効果素子で受け、その誘導磁界をフィードバックしてフィードバックコイル121からキャンセル磁界Bを発生し、2つの磁界（誘導磁界A、キャンセル磁界B）を相殺して磁気抵抗効果素子122a～122dに印加する磁場が零になるように適宜調整する。

[0040] 本発明の磁気平衡式電流センサにおいては、図3に示すように、フィードバックコイル121に隣接して磁気シールド30を有する。磁気シールド30は、被測定電流Iから生じ磁気抵抗効果素子122a～122dに印加される誘導磁界を減衰させる（磁気抵抗効果素子122a～122dにおいては誘導磁界Aの方向とキャンセル磁界Bの方向が逆方向）と共に、フィードバックコイル121からのキャンセル磁界Bをエンハンスする（磁気シールド

ド30においては誘導磁界Aの方向とキャンセル磁界Bの方向が同方向) ことができる。したがって、磁気シールド30が磁気ヨークとして機能するため、フィードバックコイル121に流す電流を小さくすることができ、省電力化を図ることができる。また、この磁気シールド30により、外部磁界の影響を低減させることができる。

[0041] 上記構成を有する磁気平衡式電流センサは、磁気検出素子として磁気抵抗効果素子、特にGMR素子やTMR素子を有する磁界検出ブリッジ回路を用いる。これにより、高感度の磁気平衡式電流センサを実現することができる。また、この磁気平衡式電流センサは、磁気検出ブリッジ回路が膜構成の同じ4つの磁気抵抗効果素子で構成されている。また、上記構成を有する磁気平衡式電流センサは、フィードバックコイル121、磁気シールド30及び磁界検出ブリッジ回路が同一基板上に形成されてなるので、小型化を図ることができる。さらに、この磁気平衡式電流センサは、磁気コアを有しない構成であるので、小型化、低コスト化を図ることができる。

[0042] 本発明において使用する磁気抵抗効果素子の膜構成は、例えば、図10(a)に示すものである。すなわち、磁気抵抗効果素子は、図10(a)に示すように、基板41に設けられた積層構造を有する。なお、図10(a)においては、説明を簡単にするために、基板41には磁気抵抗効果素子以外の下地層などは省略して図示している。磁気抵抗効果素子は、シード層42a、第1の強磁性膜43a、反平行結合膜44a、第2の強磁性膜45a、非磁性中間層46a、軟磁性自由層(フリー磁性層)47a、48a、及び保護層49aを含む。

[0043] シード層42aは、NiFeCrあるいはCrなどで構成される。保護層49aは、Taなどで構成される。なお、上記積層構造において、基板41とシード層42aとの間に、例えば、Ta、Hf、Nb、Zr、Ti、Mo、Wのうち少なくとも1つの元素などの非磁性材料で構成される下地層を設けても良い。

[0044] この磁気抵抗効果素子においては、反平行結合膜44aを介して第1の強

磁性膜 43a と第 2 の強磁性膜 45a とを反強磁性的に結合させており、いわゆるセルフピン止め型の強磁性固定層（SFP：Synthetic Ferri Pinned 層）が構成されている。

[0045] この強磁性固定層において、反平行結合膜 44a の厚さを 0.3 nm ~ 0.45 nm、もしくは、0.75 nm ~ 0.95 nm にすることにより、第 1 の強磁性膜 43a と第 2 の強磁性膜 45a との間に強い反強磁性結合をもたらすことができる。

[0046] また、第 1 の強磁性膜 43a の磁化量 ($M_s \cdot t$) と第 2 の強磁性膜 45a の磁化量 ($M_s \cdot t$) が実質的に同じである。すなわち、第 1 の強磁性膜 43a と第 2 の強磁性膜 45a 間で磁化量の差が実質的にゼロである。このため、SFP 層の実効的な異方性磁界が大きい。したがって、反強磁性材料を用いなくても、強磁性固定層（Pin 層）の磁化安定性を十分に確保できる。これは、第 1 の強磁性膜の膜厚を t_1 とし、第 2 の強磁性膜の膜厚を t_2 とし、両層の単位体積あたりの磁化及び誘導磁気異方性定数をそれぞれ M_s , K とすると、SFP 層の実効的な異方性磁界が次式 (1) で示されるためである。

式 (1)

$$\text{eff } H_k = 2 (K \cdot t_1 + K \cdot t_2) / (M_s \cdot t_1 - M_s \cdot t_2)$$

したがって、本発明の磁気平衡式電流センサに用いる磁気抵抗効果素子は、反強磁性層を有しない膜構成を有する。

[0047] 第 1 の強磁性膜 43a のキュリー温度 (T_c) と第 2 の強磁性膜 45a のキュリー温度 (T_c) とは、略同じである。これにより、高温環境においても両膜 43a, 45a の磁化量 ($M_s \cdot t$) 差が略ゼロとなり、高い磁化安定性を維持することができる。

[0048] 第 1 の強磁性膜 43a は、40 原子% ~ 80 原子%の Fe を含む CoFe 合金で構成されていることが好ましい。これは、この組成範囲の CoFe 合金が、大きな保磁力を有し、外部磁場に対して磁化を安定に維持できるからである。また、第 2 の強磁性膜 45a は、0 原子% ~ 40 原子%の Fe を含

むC o F e合金で構成されていることが好ましい。これは、この組成範囲のC o F e合金が小さな保磁力を有し、第1の強磁性膜43aが優先的に磁化する方向に対して反平行方向（180°異なる方向）に磁化し易くなるためである。この結果、H_kをより大きくすることが可能となる。また、第2の強磁性膜45aをこの組成範囲に限定することで、磁気抵抗効果素子の抵抗変化率を大きくすることができる。

[0049] 第1の強磁性膜43a及び第2の強磁性膜45aは、その成膜中にミアンダ形状のストライプ幅方向に磁場が印加され、成膜後の第1の強磁性膜43a及び第2の強磁性膜45aに誘導磁気異方性が付与されることが好ましい。これにより、両膜43a, 45aはストライプ幅方向に反平行に磁化することになる。また、第1の強磁性膜43a及び第2の強磁性膜45aの磁化方向は、第1の強磁性膜43aの成膜時の磁場印加方向で決まるため、第1の強磁性膜43aの成膜時の磁場印加方向を変えることにより、同一基板上に磁化方向が異なる強磁性固定層を持つ複数の磁気抵抗効果素子を形成することが可能である。

[0050] 強磁性固定層の反平行結合膜44aは、R_uなどにより構成される。また、軟磁性自由層（フリー層）47a, 48aは、C o F e合金、N i F e合金、C o F e N i合金などの磁性材料で構成される。また、非磁性中間層46aは、C uなどにより構成される。また、軟磁性自由層47a, 48aは、その成膜中にミアンダ形状のストライプ長手方向に磁場が印加され、成膜後の軟磁性自由層47a, 48aには誘導磁気異方性が付与されることが好ましい。これにより、磁気抵抗効果素子においては、ストライプ幅方向の外部磁場（被測定電流からの磁場）に対して線形的に抵抗変化し、ヒステリシスを小さくすることができる。このような磁気抵抗効果素子においては、強磁性固定層、非磁性中間層及び軟磁性自由層により、スピバルブ構成を採っている。

[0051] 本発明の磁気平衡式電流センサで用いる磁気抵抗効果素子の膜構成の例としては、例えば、N i F e C r（シード層：5nm）／F e₇₀C o₃₀（第1

の強磁性膜：1.65 nm) / Ru (反平行結合膜：0.4 nm) / $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (第2の強磁性膜：2 nm) / Cu (非磁性中間層：2.2 nm) / $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (軟磁性自由層：1 nm) / NiFe (軟磁性自由層：7 nm) / Ta (保護層：5 nm) である。

[0052] 本発明の磁気平衡式電流センサにおいては、図4に示すように、中点電位 (Out 1) を出力する2つの磁気抵抗効果素子 122b, 122d の強磁性固定層の磁化方向 (第2の強磁性膜の磁化方向：Pin 2) が互いに 180° 異なっており (反平行)、中点電位 (Out 2) を出力する2つの磁気抵抗効果素子 122a, 122c の強磁性固定層の磁化方向 (第2の強磁性膜の磁化方向：Pin 2) が互いに 180° 異なっている (反平行)。また、4つの磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d の抵抗変化率は同じである。磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d は、強磁性固定層に対する印加磁界の角度が同一である場合、同一磁界強度で同一の抵抗変化率を示すことが好ましい。

[0053] このように配置された4つの磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d を有する磁気平衡式電流センサにおいて、磁気検出ブリッジ回路の2つの出力 (Out 1, Out 2) の電圧差がゼロになるようにフィードバックコイル 121 から磁気抵抗効果素子にキャンセル磁界を印加し、その際にフィードバックコイル 121 に流れる電流値を検出することにより、被測定電流を測定する。このとき、4つの磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d のうち、磁気抵抗効果素子 122a, 122b は磁気抵抗効果素子として機能し、磁気抵抗効果素子 122c, 122d は固定抵抗素子として機能する。

[0054] 図4に示すように、矢印方向に被測定電流 I が流れると、4つの磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d には、それぞれ誘導磁界 A 及びキャンセル磁界 B が印加される。このとき、被測定電流により発生する誘導磁界とキャンセル磁界の合成磁界強度がゼロとなる時に、磁気検出ブリッジ回路の中点電位差がゼロとなる。

[0055] このような磁気検出ブリッジ回路において、ゼロ磁場での磁気抵抗効果素

子122a～122dの抵抗値は同じである（ R_{com} ）。また、磁気抵抗効果素子122a～122dの抵抗変化率は同じである。また、磁気抵抗効果素子122b、122d間の出力を $Out1$ とし、磁気抵抗効果素子122a、122c間の出力を $Out2$ とする。また、磁気抵抗効果素子122bの抵抗値を $R1$ とし、磁気抵抗効果素子122cの抵抗値を $R2$ とし、磁気抵抗効果素子122dの抵抗値を $R3$ とし、磁気抵抗効果素子122aの抵抗値を $R4$ とする。

[0056] ここで、被測定電流 I により発生する誘導磁界による磁気抵抗効果素子122a～122dの抵抗変化量を ΔR としたときに、ブリッジ中点電位差（ $Out1 - Out2$ ）を求めると、次のようになる。

$$\begin{aligned} V_{dd} - G_{nd1} \text{間抵抗} &= (R1 - \Delta R) + (R3 + \Delta R) = R1 + R3 \\ &= 2 \times R_{com} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{dd} - G_{nd2} \text{間抵抗} &= (R2 + \Delta R) + (R4 - \Delta R) = R2 + R4 \\ &= 2 \times R_{com} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Out1 \text{電位} &= (R3 + \Delta R) / (R1 + R3) \times V_{dd} \\ &= (R_{com} + \Delta R) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Out2 \text{電位} &= (R4 - \Delta R) / (R2 + R4) \times V_{dd} \\ &= (R_{com} - \Delta R) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Out1 - Out2 \text{電位差} &= (2 \times \Delta R) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd} \\ &= \Delta R / R_{com} \times V_{dd} \end{aligned}$$

[0057] 上記のように、本発明の磁気平衡式電流センサにおいては、ブリッジ中点電位差の式の分母に ΔR の項を含んでいない。このため、被測定電流 I により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示す。その結果、高精度で電流測定を行うことができる。

[0058] 図5(a)は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路の配線パターンを説明するための図であり、図5(b)は、図5(a)におけるVB-VB線に沿う断面図である。本発明に係る磁気平衡式電流センサの磁気検出ブリッジ回路は、図5(a)に示すように

、電源供給点に対して対称である配線を有する。図5（a）に示すように、フィードバックコイル121のコイルパターンの延在方向（フィードバック電流の通電方向）とミアンダのストライプ長手方向とが沿うように、磁気抵抗効果素子122a～122dが形成されている。ここでは、図5（b）に示すように、磁気抵抗効果素子上にフィードバックコイルが配設されている。

[0059] また、この磁気抵抗効果素子122a～122dを接続するとともに、電源供給点（Vdd）やGndに接続する配線パターン60が形成されている。この配線パターン60は、電源供給点に対して対称である。これにより、電源供給点の両側で配線の長さがほぼ同じとなるので、電源供給点の両側で配線抵抗の差がなくなる。その結果、配線抵抗の差による中点電位のずれがなくなり、より高精度に電流測定を行うことができる。

[0060] 図6（a）は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路の配線パターンを説明するための図であり、図6（b）は、図6（a）におけるVIB-VIB線に沿う断面図である。本発明に係る磁気平衡式電流センサの磁気検出ブリッジ回路は、図6（a）に示すように、電源供給点に対して対称である配線を有する。図6（a）に示すように、フィードバックコイル121のスパイラルパターン61の延在方向（フィードバック電流の通電方向）とミアンダのストライプ長手方向とが沿うように、磁気抵抗効果素子122a～122dが形成されている。ここでは、図6（b）に示すように、磁気抵抗効果素子上にフィードバックコイル121のスパイラルパターン61が配設されている。

[0061] この磁気抵抗効果素子122a～122dを接続するとともに、電源供給点（Vdd）やGndに接続する配線パターン60が形成されている。この配線パターン60は、電源供給点に対して対称である。これにより、電源供給点の両側で配線の長さがほぼ同じとなるので、電源供給点の両側で配線抵抗の差がなくなる。その結果、配線抵抗の差による中点電位のずれがなくなり、より高精度に電流測定を行うことができる。さらに、このスパイラルパ

ターン61を用いることにより、フィードバックコイル121における磁気抵抗効果素子を設けない領域を省略することができるので、フィードバックコイルの面積を少なくすることができる。

[0062] 図7(a)は、本発明の実施の形態に係る磁気平衡式電流センサにおける磁気検出ブリッジ回路の配線パターンを説明するための図であり、図7(b)は、図7(a)におけるV I I B-V I I B線に沿う断面図である。本発明に係る磁気平衡式電流センサの磁気検出ブリッジ回路は、図7(a)に示すように、電源供給点に対して対称である配線を有する。図7(a)に示すように、フィードバックコイル121の延在方向(フィードバック電流の通電方向)とミアンダのストライプ長手方向とが沿うように、磁気抵抗効果素子122a~122dが形成されている。ここでは、図7(b)に示すように、2つの磁気抵抗効果素子122a, 122d上にフィードバックコイル121が配設され、2つの磁気抵抗効果素子122b, 122c下にフィードバックコイル121が配設されている。

[0063] この磁気抵抗効果素子122a~122dを接続するとともに、電源供給点(Vdd)やGndに接続する配線パターン60が形成されている。この配線パターン60は、電源供給点に対して対称である。これにより、電源供給点の両側で配線の長さがほぼ同じとなるので、電源供給点の両側で配線抵抗の差がなくなる。その結果、配線抵抗の差による中点電位のずれがなくなり、より高精度に電流測定を行うことができる。さらに、図7に示すコイルパターンを用いることにより、4つの磁気抵抗効果素子を並設させずに、2つの磁気抵抗効果素子を並設して、2つのフィードバックコイル121の延在領域に設けることができるので、磁気検出ブリッジ回路の幅方向(フィードバック電流の通電方向)の長さを短くすることができる。

[0064] 4つの磁気抵抗効果素子を用いた磁気平衡式電流センサは、反強磁性膜で固定磁性層の磁化を固定するタイプの磁気抵抗効果素子でも作製することができる。この場合、2つの磁気抵抗効果素子のうち1つの磁気抵抗効果素子の固定磁性層(Pin層)の交換結合方向を他の磁気抵抗効果素子の固定磁

性層の交換結合方向と反平行方向にするために、レーザ局所アニールを適用するか、あるいは、磁気抵抗効果素子に隣接して磁界印加用コイルを設置する必要がある。このような方法は、磁気抵抗効果素子がチップ最表面付近にあるセンサやデバイスを作製する場合には適用することができるが、本発明の磁気平衡式電流センサのように、磁気抵抗効果素子上に厚い有機絶縁膜、厚いフィードバックコイル、厚い磁気シールド膜を設置したデバイスの作製には適用することはできない。このため、本発明に係る磁気平衡式電流センサにおいては、本発明の構成が特に有用である。

[0065] 本発明に係る磁気平衡式電流センサのように、磁気検出ブリッジ回路とフィードバックコイルを同一基板上に一体形成する場合には、両者を完全に絶縁する必要があるため、ポリイミド膜などの有機絶縁膜で両者を分離することになる。有機絶縁膜は、一般にスピコートなどで塗布した後に、200℃以上の加熱処理を施すことにより形成される。この有機絶縁膜は磁気検出ブリッジ回路形成の後工程で形成されるため、磁気抵抗効果素子も一緒に加熱されてしまう。反強磁性膜で固定磁性層の磁化を固定するタイプの磁気抵抗効果素子の製造工程においては、この有機絶縁膜の形成工程の熱履歴により固定磁性層の特性が劣化しないように、磁場を印加しながら加熱処理する必要がある。本発明に係る磁気平衡式電流センサでは、反強磁性膜を用いていないため、磁場を印加しながら加熱処理を行わなくても固定磁性層の特性を維持することが可能である。したがって、軟磁性自由層のヒステリシスの劣化を抑えることができる。

[0066] また、本発明に係る磁気平衡式電流センサの磁気抵抗効果素子は反強磁性材料を含まないため、材料コストや、製造コストを抑制することもできる。

[0067] ここで、本発明の効果を明確にするために行った実施例について説明する。図4に示す磁気検出ブリッジ回路を有する磁気平衡式電流センサ（本発明）について、被測定電流による誘導磁界（被測定電流磁界）と磁気検出ブリッジ回路の midpoint 電位差との間の関係を調べた。その結果を図8に示す。また、図16に示す磁気検出ブリッジ回路を有する磁気平衡式電流センサ（従来

(GMR×1))と、図17に示す磁気検出ブリッジ回路を有する磁気平衡式電流センサ(従来(GMR×2))についても同様に被測定電流による誘導磁界(被測定電流磁界)と磁気検出ブリッジ回路の midpoint 電位差との間の関係を調べた。その結果を図8に併記する。

[0068] 図8から分かるように、本発明の磁気平衡式電流センサ(本発明)は、被測定電流による誘導磁界に対して midpoint 電位差が直線状に変化しており、高精度に電流測定を行うことができる。特に、4つの磁気抵抗効果素子を用いているので、高感度の電流センサを実現することができる。一方、従来の磁気平衡式電流センサ(従来(GMR×1)、従来(GMR×2))は、被測定電流による誘導磁界に対して midpoint 電位差が曲線状に変化しており、高精度に電流測定を行うことができない。

[0069] 本発明は、磁気平衡式電流センサだけでなく、誘導磁界に比例した2つの磁気抵抗効果素子の出力により被測定電流を測定する磁気比例式電流センサにも同様に適用することができる。この磁気比例式電流センサは、図9に示すように、図5(a)に示す構成からフィードバックコイルを除いた構成を有する。また、磁気比例式電流センサの磁気検出ブリッジ回路は、図9に示すように、4つの磁気抵抗効果素子122a~122dを有し、図5~図7に示す構成と同様に、電源供給点に対して対称である配線を有する。また、 midpoint 電位(Out1)を出力する2つの磁気抵抗効果素子122b, 122dの強磁性固定層の磁化方向(第2の強磁性膜の磁化方向:Pin2)が互いに180°異なっており(反平行)、 midpoint 電位(Out2)を出力する2つの磁気抵抗効果素子122a, 122cの強磁性固定層の磁化方向(第2の強磁性膜の磁化方向:Pin2)が互いに180°異なっている(反平行)。また、4つの磁気抵抗効果素子122a~122dの抵抗変化率は同じである。

[0070] 以下、本発明に係る電流センサが磁気比例式電流センサである場合についてより詳細に説明する。

[0071] 図12及び図13は、本発明の実施の形態に係る磁気比例式電流センサを

示す図である。本実施の形態においては、図 1 2 及び図 1 3 に示す磁気比例式電流センサは、被測定電流 I が流れる導体 1 1 の近傍に配設される。この磁気比例式電流センサは、導体 1 1 に流れる被測定電流 I による誘導磁界を検出する磁界検出ブリッジ回路（磁気検出ブリッジ回路） 1 3 を有する。磁界検出ブリッジ回路 1 3 は、被測定電流 I からの誘導磁界の印加により抵抗値が変化する 4 つの磁気抵抗効果素子 1 2 2 a ~ 1 2 2 d を有する。

[0072] この磁界検出ブリッジ回路 1 3 は、被測定電流 I により生じた誘導磁界に応じた電圧差を生じる 2 つの出力を備える。図 1 3 に示す磁界検出ブリッジ回路 1 3 においては、磁気抵抗効果素子 1 2 2 b と磁気抵抗効果素子 1 2 2 c との間の接続点に電源 V_{dd} が接続されており、磁気抵抗効果素子 1 2 2 a と磁気抵抗効果素子 1 2 2 d との間の接続点にグランド（GND）が接続されている。さらに、この磁界検出ブリッジ回路 1 3 においては、磁気抵抗効果素子 1 2 2 a, 1 2 2 b 間の接続点から一つの出力（Out 1）を取り出し、磁気抵抗効果素子 1 2 2 c, 1 2 2 d 間の接続点からもう一つの出力（Out 2）を取り出している。これら二つの出力の電圧差から、磁気比例式電流センサは被測定電流 I を算出する。

[0073] 図 1 4 は、図 1 2 に示す磁気比例式電流センサを示す断面図である。図 1 4 に示すように、本実施の形態に係る磁気比例式電流センサにおいては、磁気シールド及び磁界検出ブリッジ回路が同一基板 2 1 上に形成されている。図 1 4 に示す構成においては、磁気シールドが被測定電流 I に近い側に配置されている。すなわち、導体 1 1 に近い側から磁気シールド、磁気抵抗効果素子の順に配置する。これにより、磁気抵抗効果素子を導体 1 1 から遠ざけることができ、被測定電流 I から磁気抵抗効果素子に印加される誘導磁界を小さくすることができる。このため、広い範囲の電流測定が可能になる。

[0074] 図 1 4 に示す層構成について詳細に説明する。図 1 4 に示す磁気比例式電流センサにおいては、基板 2 1 上に絶縁層である熱シリコン酸化膜 2 2 が形成されている。熱シリコン酸化膜 2 2 上には、アルミニウム酸化膜 2 3 が形成されている。アルミニウム酸化膜 2 3 は、例えば、スパッタリングなどの

方法により成膜することができる。また、基板 2 1 としては、シリコン基板などが用いられる。

[0075] アルミニウム酸化膜 2 3 上には、磁気抵抗効果素子 1 2 2 a ~ 1 2 2 d が形成されており、磁界検出ブリッジ回路が作り込まれる。磁気抵抗効果素子 1 2 2 a ~ 1 2 2 d としては、TMR素子（トンネル型磁気抵抗効果素子）、GMR素子（巨大磁気抵抗効果素子）などを用いることができる。本発明に係る磁気比例式電流センサにおいて用いられる磁気抵抗効果素子の膜構成は、例えば、図 1 0 に示すものである。詳細は前述の通りであるから、ここでは省略する。

[0076] 磁気抵抗効果素子としては、図 1 3 の拡大図に示すように、その長手方向が互いに平行になるように配置された複数の帯状の長尺パターン（ストライプ）が折り返してなる形状（ミアンダ形状）を有するGMR素子であることが好ましい。このミアンダ形状において、感度軸方向（P i n 方向）は、長尺パターンの長手方向（ストライプ長手方向）に対して直交する方向（ストライプ幅方向）である。このミアンダ形状においては、誘導磁界がストライプ長手方向に直交する方向（ストライプ幅方向）に沿うように印加される。

[0077] このミアンダ形状においては、リニアリティを考慮すると、ピン（P i n）方向の幅が $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ であることが好ましい。この場合において、リニアリティを考慮すると、長手方向が誘導磁界の方向に対して垂直になることが望ましい。このようなミアンダ形状にすることにより、ホール素子よりも少ない端子数（2 端子）で磁気抵抗効果素子の出力を採ることができる。

[0078] また、アルミニウム酸化膜 2 3 上には、電極 2 4 が形成されている。電極 2 4 は、電極材料を成膜した後に、フォトリソグラフィ及びエッチングにより形成することができる。

[0079] 磁気抵抗効果素子 1 2 2 a ~ 1 2 2 d 及び電極 2 4 を形成したアルミニウム酸化膜 2 3 上には、絶縁層としてポリイミド層 2 5 が形成されている。ポリイミド層 2 5 は、ポリイミド材料を塗布し、硬化することにより形成する

ことができる。

- [0080] ポリイミド層 25 上には、シリコン酸化膜 27 が形成されている。シリコン酸化膜 27 は、例えば、スパッタリングなどの方法により成膜することができる。シリコン酸化膜 27 上には、絶縁層としてポリイミド層 29 が形成されている。ポリイミド層 29 は、ポリイミド材料を塗布し、硬化することにより形成することができる。なお、シリコン酸化膜 27 およびポリイミド層 29 は、適宜省略しても良い。
- [0081] ポリイミド層 29 上には、磁気シールド 30 が形成されている。磁気シールド 30 を構成する材料としては、アモルファス磁性材料、パーマロイ系磁性材料、又は鉄系微結晶材料等の高透磁率材料を用いることができる。なお、磁気シールド 30 は、適宜省略しても良い。
- [0082] ポリイミド層 29 上には、シリコン酸化膜 31 が形成されている。シリコン酸化膜 31 は、例えば、スパッタリングなどの方法により成膜することができる。ポリイミド層 29 及びシリコン酸化膜 31 の所定の領域（電極 24 の領域）にコンタクトホールが形成され、そのコンタクトホールに電極パッド 26 が形成されている。コンタクトホールの形成には、フォトリソグラフィ及びエッチングなどが用いられる。電極パッド 26 は、電極材料を成膜した後、フォトリソグラフィ及びめっきにより形成することができる。
- [0083] このような構成を有する磁気比例式電流センサにおいては、図 14 に示すように、被測定電流 I から発生した誘導磁界 A を磁気抵抗効果素子で受け、その抵抗変化に応じた電圧が出力される。
- [0084] 本発明の磁気比例式電流センサにおいては、図 14 に示すように磁気シールド 30 を有する。磁気シールド 30 は、被測定電流 I から生じ磁気抵抗効果素子に印加される誘導磁界を減衰させることができる。したがって、誘導磁界 A が大きい場合でも電流測定が可能である。つまり、広い範囲の電流測定が可能である。また、この磁気シールド 30 により、外部磁界の影響を低減させることができる。
- [0085] 上記構成を有する磁気比例式電流センサは、磁気検出素子として磁気抵抗

効果素子、特にGMR素子やTMR素子を有する磁界検出ブリッジ回路を用いる。これにより、高感度の磁気比例式電流センサを実現することができる。また、この磁気比例式電流センサは、磁気検出ブリッジ回路が膜構成の同じ4つの磁気抵抗効果素子で構成されている。また、上記構成を有する磁気比例式電流センサは、磁気シールド30及び磁界検出ブリッジ回路が同一基板上に形成されてなるので、小型化を図ることができる。さらに、この磁気比例式電流センサは、磁気コアを有しない構成であるので、小型化、低コスト化を図ることができる。

[0086] 本発明の磁気比例式電流センサにおいては、図15に示すように、中点電位(Out1)を出力する2つの磁気抵抗効果素子122b, 122dの強磁性固定層の磁化方向(第2の強磁性膜の磁化方向:Pin2)が互いに180°異なっており(反平行)、中点電位(Out2)を出力する2つの磁気抵抗効果素子122a, 122cの強磁性固定層の磁化方向(第2の強磁性膜の磁化方向:Pin2)が互いに180°異なっている(反平行)。また、4つの磁気抵抗効果素子122a~122dの抵抗変化率は同じである。磁気抵抗効果素子122a~122dは、強磁性固定層に対する印加磁界の角度が同一である場合、同一磁界強度で同一の抵抗変化率を示すことが好ましい。

[0087] このように配置された4つの磁気抵抗効果素子122a~122dを有する磁気比例式電流センサにおいて、磁界検出ブリッジ回路13の2つの出力(Out1, Out2)の電圧差から、被測定電流を算出する。

[0088] 図15に示すように、矢印方向に被測定電流が流れると、4つの磁気抵抗効果素子122a~122dには、それぞれ誘導磁界Aが印加される。このような磁界検出ブリッジ回路13において、ゼロ磁場での磁気抵抗効果素子122a~122dの抵抗値は同じである(R_{com})。また、磁気抵抗効果素子122a~122dの抵抗変化率は同じである。また、磁気抵抗効果素子122b, 122d間の出力をOut1とし、磁気抵抗効果素子122a, 122c間の出力をOut2とする。また、磁気抵抗効果素子122bの抵

抗値を R_1 とし、磁気抵抗効果素子122cの抵抗値を R_2 とし、磁気抵抗効果素子122dの抵抗値を R_3 とし、磁気抵抗効果素子122aの抵抗値を R_4 とする。

[0089] ここで、被測定電流 I により発生する誘導磁界による磁気抵抗効果素子122a～122dの抵抗変化量を ΔR としたときに、ブリッジ中点電位差($Out_1 - Out_2$)を求めると、次のようになる。

$$\begin{aligned} V_{dd} - G_{nd1} \text{間抵抗} &= (R_1 - \Delta R) + (R_3 + \Delta R) = R_1 + R_3 \\ &= 2 \times R_{com} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{dd} - G_{nd2} \text{間抵抗} &= (R_2 + \Delta R) + (R_4 - \Delta R) = R_2 + R_4 \\ &= 2 \times R_{com} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Out_1 \text{電位} &= (R_3 + \Delta R) / (R_1 + R_3) \times V_{dd} \\ &= (R_{com} + \Delta R) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Out_2 \text{電位} &= (R_4 - \Delta R) / (R_2 + R_4) \times V_{dd} \\ &= (R_{com} - \Delta R) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Out_1 - Out_2 \text{電位差} &= (2 \times \Delta R) / (2 \times R_{com}) \times V_{dd} \\ &= \Delta R / R_{com} \times V_{dd} \end{aligned}$$

[0090] 上記のように、磁気検出ブリッジ回路を有する磁気比例式電流センサにおいても、 $Out_1 - Out_2$ 電位差を求める式に、ブリッジ中点電位差の式の分母に ΔR の項を含んでいない。このため、被測定電流 I により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示す。その結果、高精度で電流測定を行うことができる。また、電源供給点に対して対称である配線を有するので、電源供給点の両側で配線抵抗の差がなくなる。その結果、配線抵抗の差による中点電位のずれがなくなり、より高精度に電流測定を行うことができる。本発明は、磁気比例式電流センサにおいて特に有用である。

[0091] 図10(a)～(c)及び図11(a)～(c)は、本発明の実施の形態に係る電流センサにおける磁気抵抗効果素子の製造方法を説明するための図である。まず、図10(a)に示すように、基板41上に、シード層42a、第1の強磁性膜43a、反平行結合膜44a、第2の強磁性膜45a、非

磁性中間層 46a、軟磁性自由層（フリー磁性層）47a、48a、及び保護層 49a を順次形成する。第1の強磁性膜 43a 及び第2の強磁性膜 45a の成膜中には、ミアンダ形状のストライプ幅方向に磁場を印加する。図10において、第1の強磁性膜 43a については、印加磁場方向は紙面奥側から手前側に向かう方向であり、第2の強磁性膜 45a については、印加磁場方向は紙面手前側から奥側に向かう方向である。また、軟磁性自由層（フリー磁性層）47a、48a の成膜中には、ミアンダ形状のストライプ長手方向に磁場を印加する。

[0092] 次いで、図10(b)に示すように、保護層 49a 上にレジスト層 50 を形成し、フォトリソグラフィ及びエッチングにより、磁気抵抗効果素子 122a 側の領域上にレジスト層 50 を残存させる。次いで、図10(c)に示すように、イオンミリングなどにより、露出した積層膜を除去して、磁気抵抗効果素子 122b を設ける領域の基板 41 を露出させる。

[0093] 次いで、図11(a)に示すように、露出した基板 41 上に、シード層 42b、第1の強磁性膜 43b、反平行結合膜 44b、第2の強磁性膜 45b、非磁性中間層 46b、軟磁性自由層（フリー磁性層）47b、48b、及び保護層 49b を順次形成する。第1の強磁性膜 43b 及び第2の強磁性膜 45b の成膜中には、ミアンダ形状のストライプ幅方向に磁場を印加する。図11において、第1の強磁性膜 43b については、印加磁場方向は紙面手前側から奥側に向かう方向であり、第2の強磁性膜 45b については、印加磁場方向は紙面奥側から手前側に向かう方向である。また、軟磁性自由層（フリー磁性層）47b、48b の成膜中には、ミアンダ形状のストライプ長手方向に磁場を印加する。

[0094] 次いで、図11(b)に示すように、保護層 49a、49b 上にレジスト層 50 を形成し、フォトリソグラフィ及びエッチングにより、磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d の形成領域上にレジスト層 50 を残存させる。次いで、図11(c)に示すように、イオンミリングなどにより、露出した積層膜を除去して、磁気抵抗効果素子 122a ~ 122d を形成する。

[0095] このように、本発明の電流センサによれば、磁気検出ブリッジ回路において中点電位を出力する2つの磁気抵抗効果素子のセルフピン止め型の強磁性固定層の磁化方向が互いに 180° 異なる方向であるので、被測定電流により発生する誘導磁界に対して中点電位差の出力が比例変化を示し、さらに、磁気検出ブリッジ回路内で配線抵抗の差がなく、高精度に電流測定を行うことができる。

[0096] 本発明は上記実施の形態に限定されず、種々変更して実施することができる。例えば、上記実施の形態における材料、各素子の接続関係、厚さ、大きさ、製法などは適宜変更して実施することが可能である。その他、本発明は、本発明の範囲を逸脱しないで適宜変更して実施することができる。

産業上の利用可能性

[0097] 本発明は、電気自動車のモータ駆動用の電流の大きさを検出する電流センサに適用することが可能である。

[0098] 本出願は、2010年3月12日出願の特願2010-056154に基づく。この内容は、全てここに含めておく。

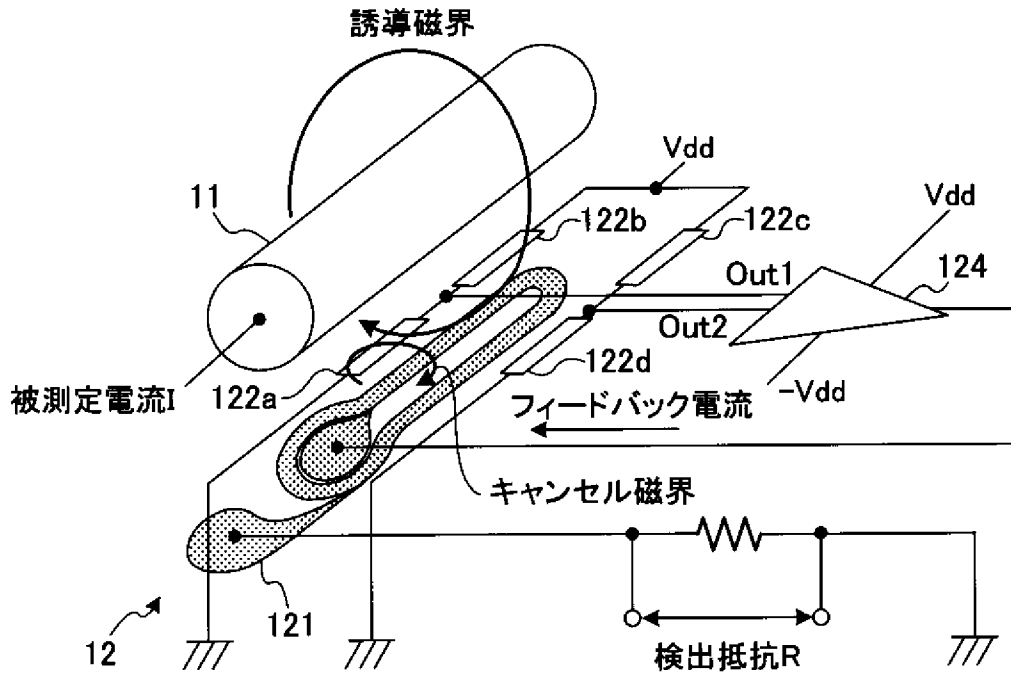
請求の範囲

- [請求項1] 被測定電流からの誘導磁界の印加により抵抗値が変化する4つの磁気抵抗効果素子で構成され、2つの磁気抵抗効果素子間の出力を備える磁界検出ブリッジ回路を有する電流センサであって、前記4つの磁気抵抗効果素子は、抵抗変化率が同じであり、反平行結合膜を介して第1の強磁性膜と第2の強磁性膜とを反強磁性的に結合させてなるセルフピン止め型の強磁性固定層と、非磁性中間層と、軟磁性自由層とを有し、前記出力を与える2つの磁気抵抗効果素子の強磁性固定層の磁化方向が互いに 180° 異なる方向であり、前記磁気検出ブリッジ回路は、電源供給点に対して対称である配線を有することを特徴とする電流センサ。
- [請求項2] 前記磁気抵抗効果素子の近傍に配置され、前記誘導磁界を相殺するキャンセル磁界を発生するフィードバックコイルと、前記誘導磁界を減衰させると共に前記キャンセル磁界をエンハンスする磁気シールドと、をさらに具備し、前記磁気検出ブリッジ回路で得られる電圧差により前記フィードバックコイルに通電して前記誘導磁界と前記キャンセル磁界とが相殺される平衡状態となったときの前記フィードバックコイルに流れる電流に基づいて前記被測定電流を測定することを特徴とする請求項1記載の電流センサ。
- [請求項3] 前記4つの磁気抵抗効果素子は、その長手方向が互いに平行になるように配置された複数の帯状の長尺パターンが折り返してなる形状を有し、前記誘導磁界及び前記キャンセル磁界が前記長手方向に直交する方向に沿うように印加されることを特徴とする請求項2記載の電流センサ。
- [請求項4] 前記磁界検出ブリッジ回路により、前記誘導磁界に比例した前記4つの磁気抵抗効果素子の出力により前記被測定電流を測定することを特徴とする請求項1記載の電流センサ。
- [請求項5] 前記第1の強磁性膜が40原子%～80原子%のFeを含むCoF

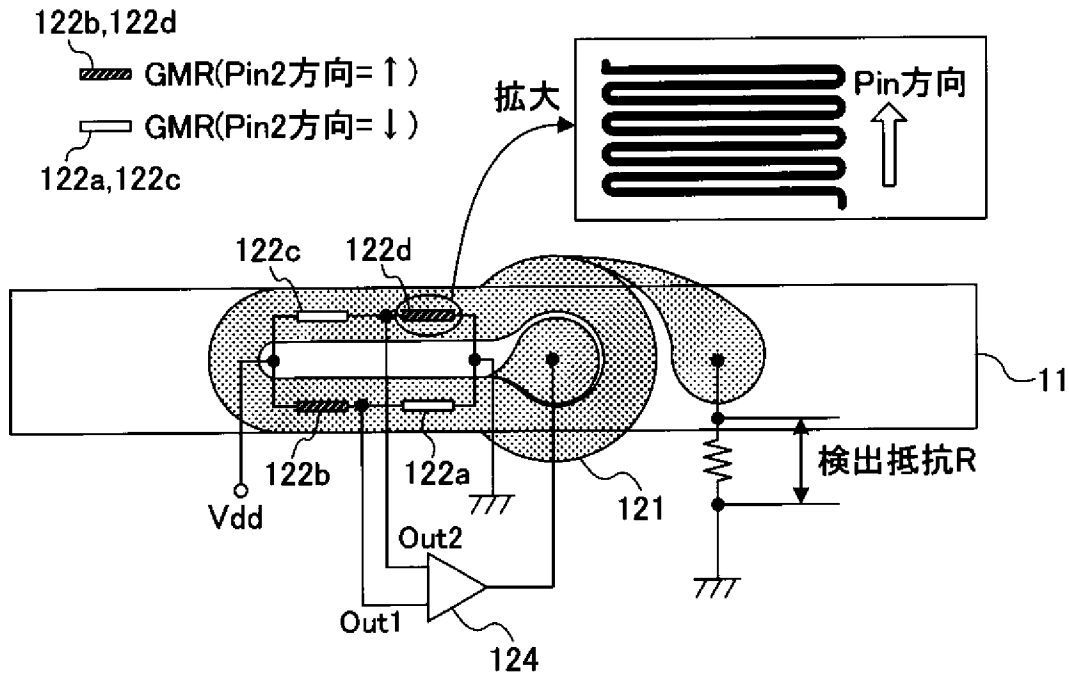
e合金で構成され、前記第2の強磁性膜が0原子%~40原子%のFeを含むCoFe合金で構成されていることを特徴とする請求項1から請求項4のいずれかに記載の電流センサ。

[請求項6] 前記磁気シールドは、アモルファス磁性材料、パーマロイ系磁性材料、及び鉄系微結晶材料からなる群より選ばれた高透磁率材料で構成されていることを特徴とする請求項1から請求項5のいずれかに記載の電流センサ。

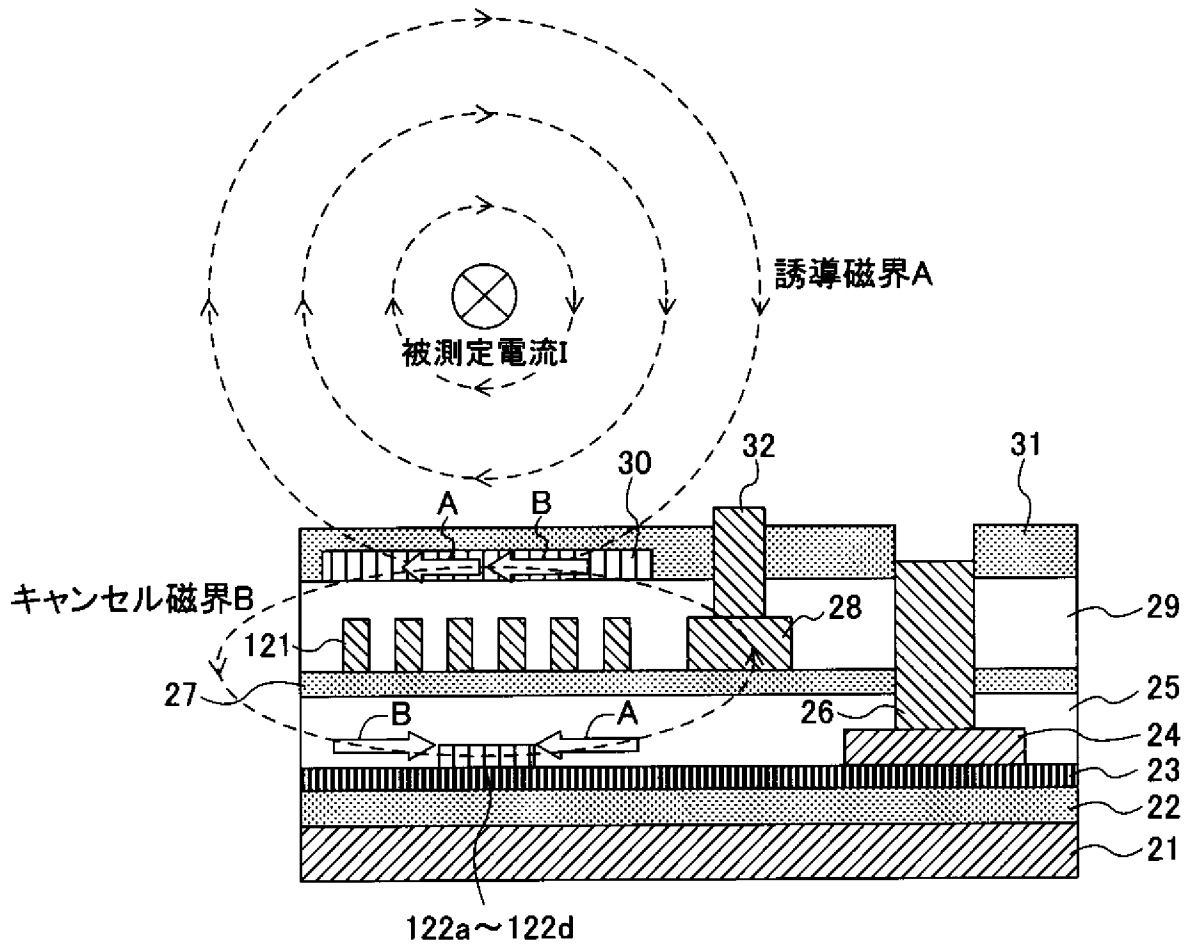
[図1]



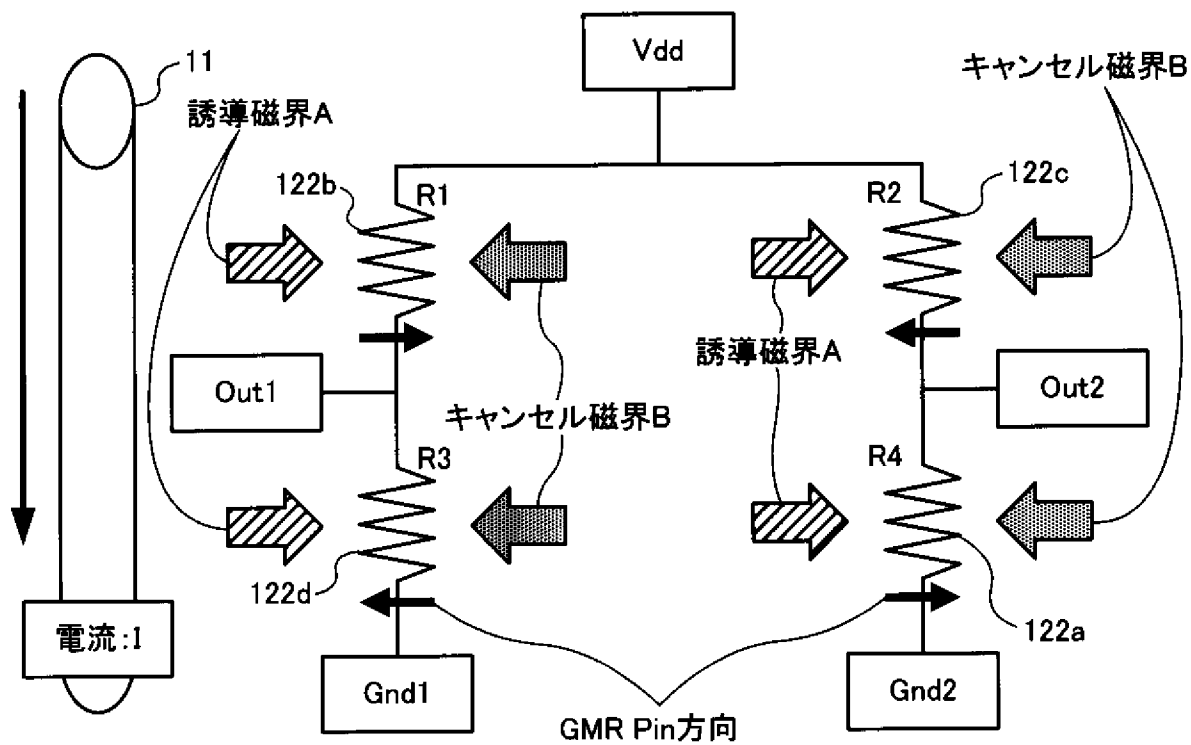
[図2]



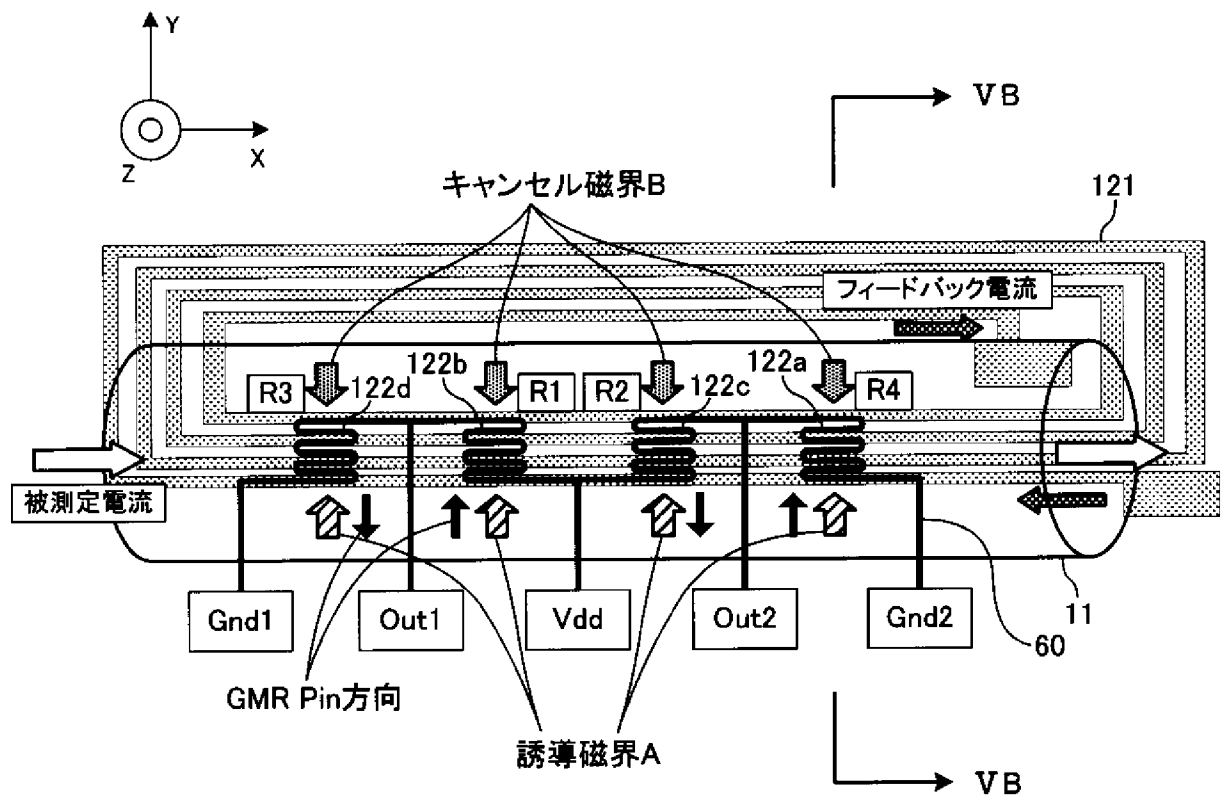
[図3]



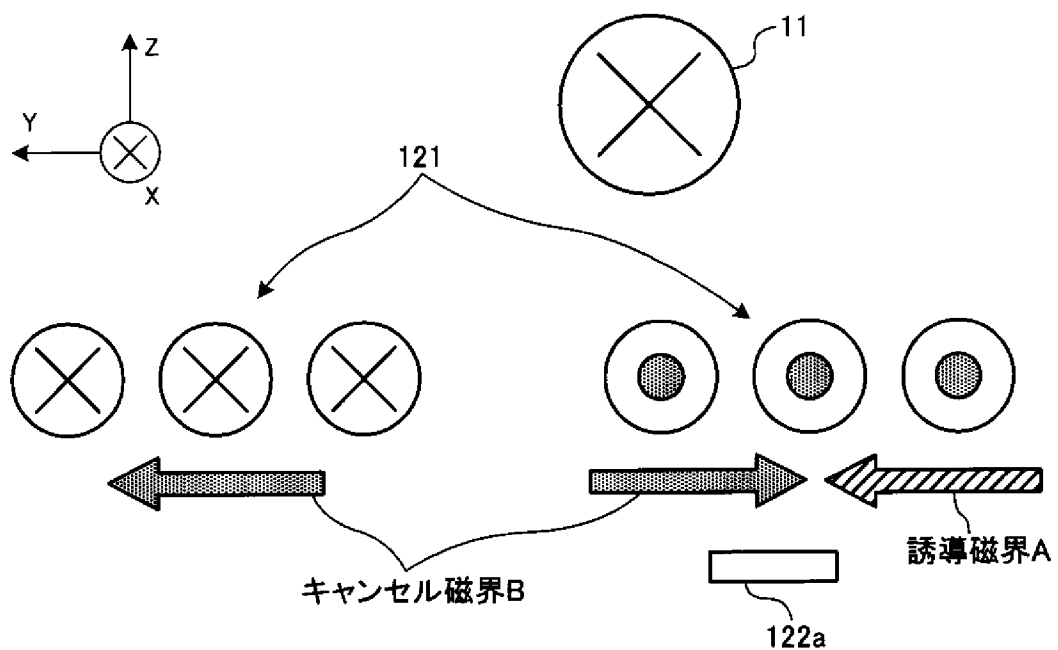
[図4]



[図5]

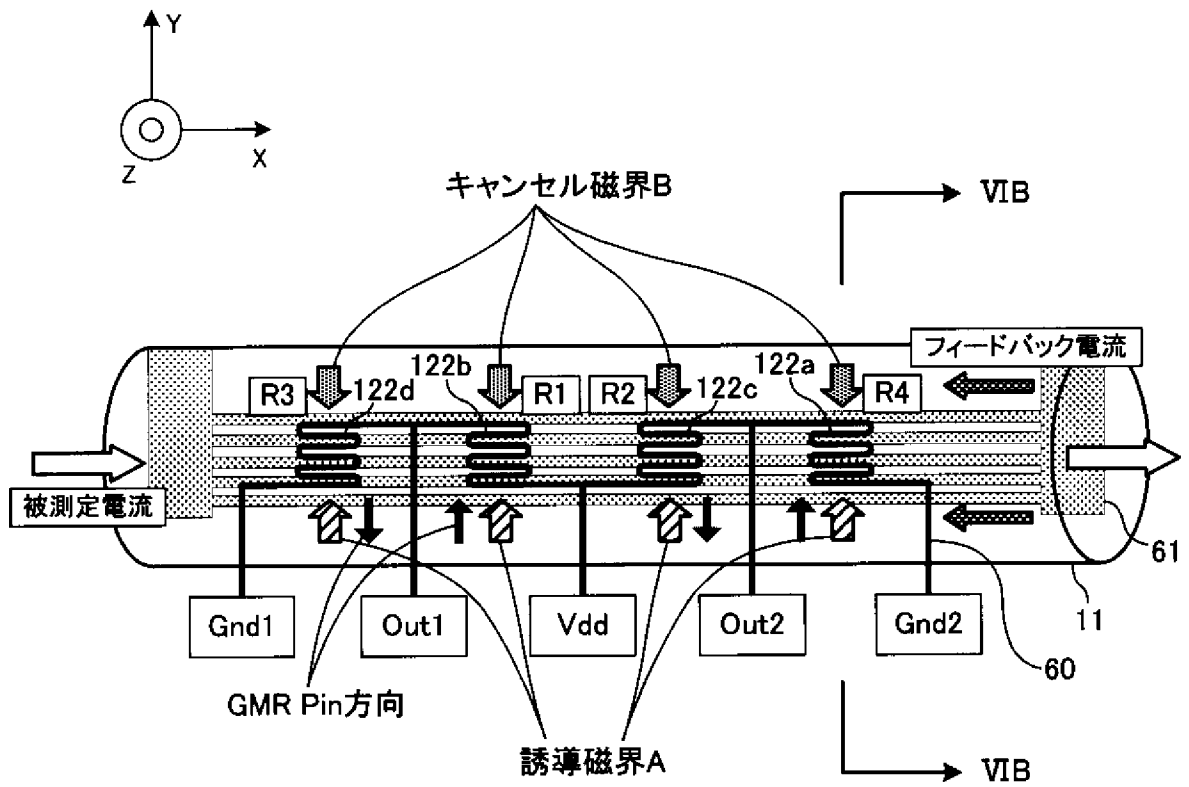


(a)

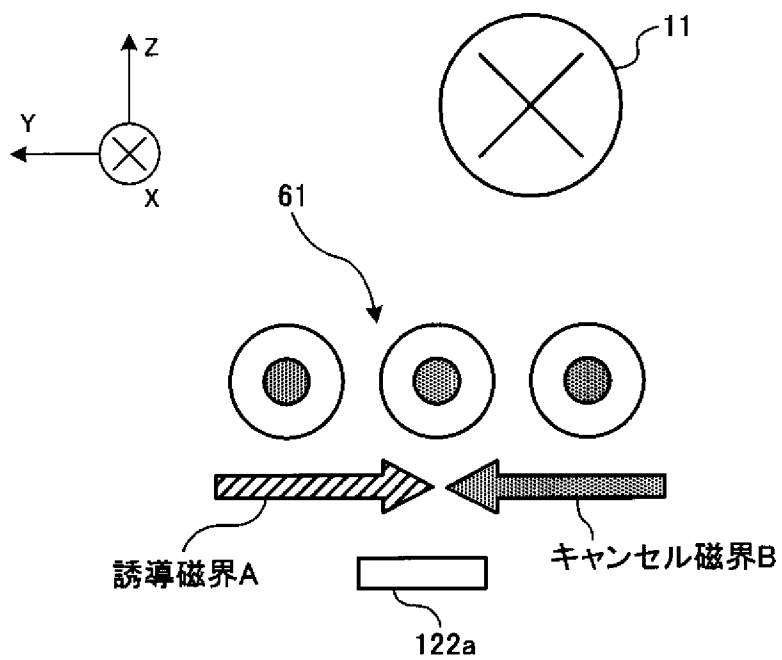


(b)

[図6]

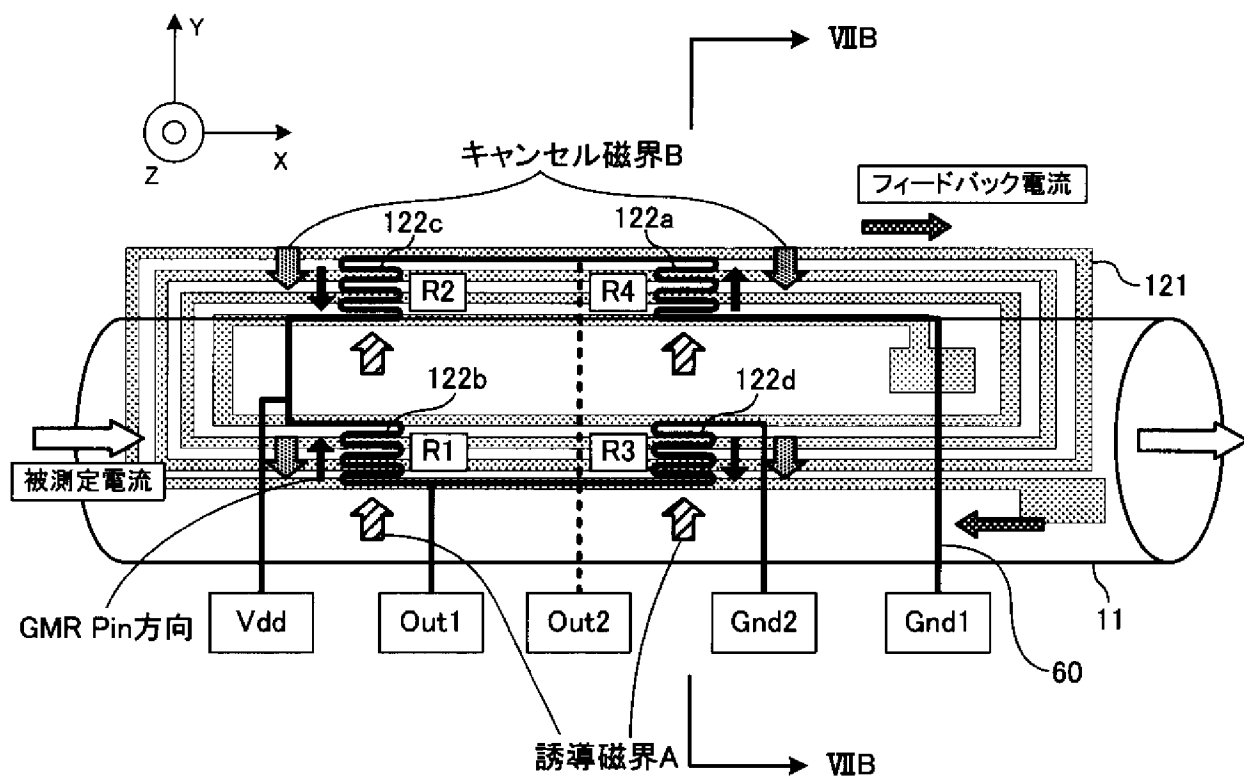


(a)

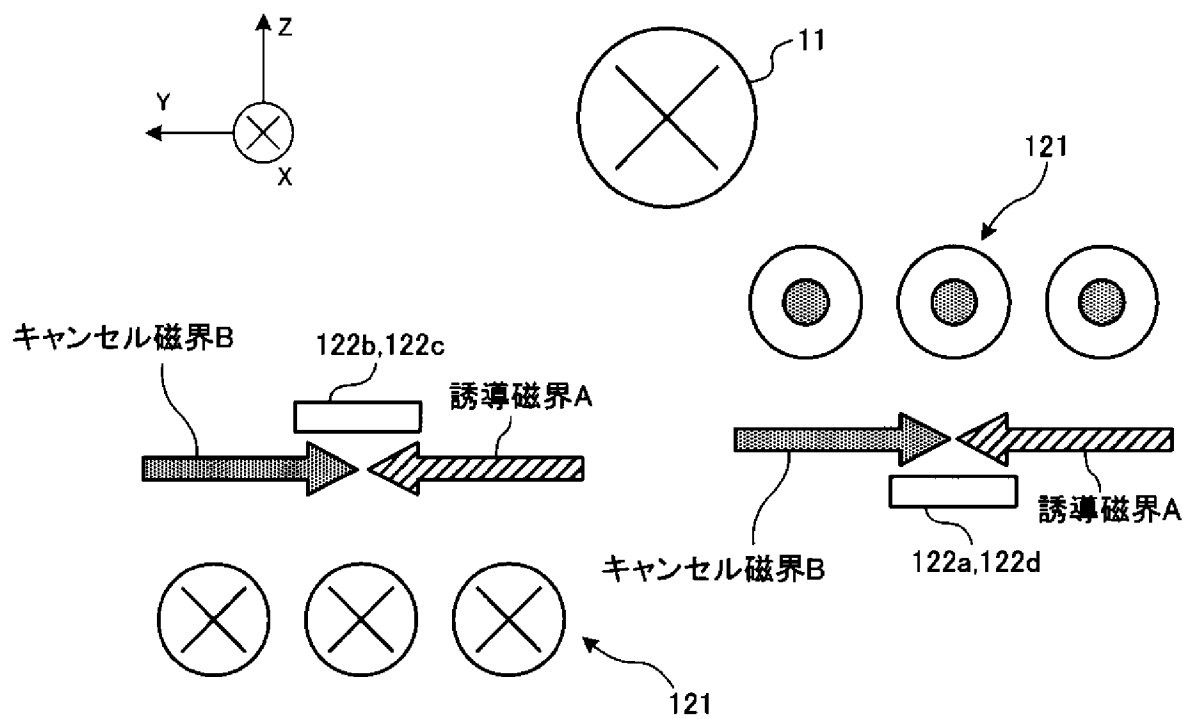


(b)

[図7]

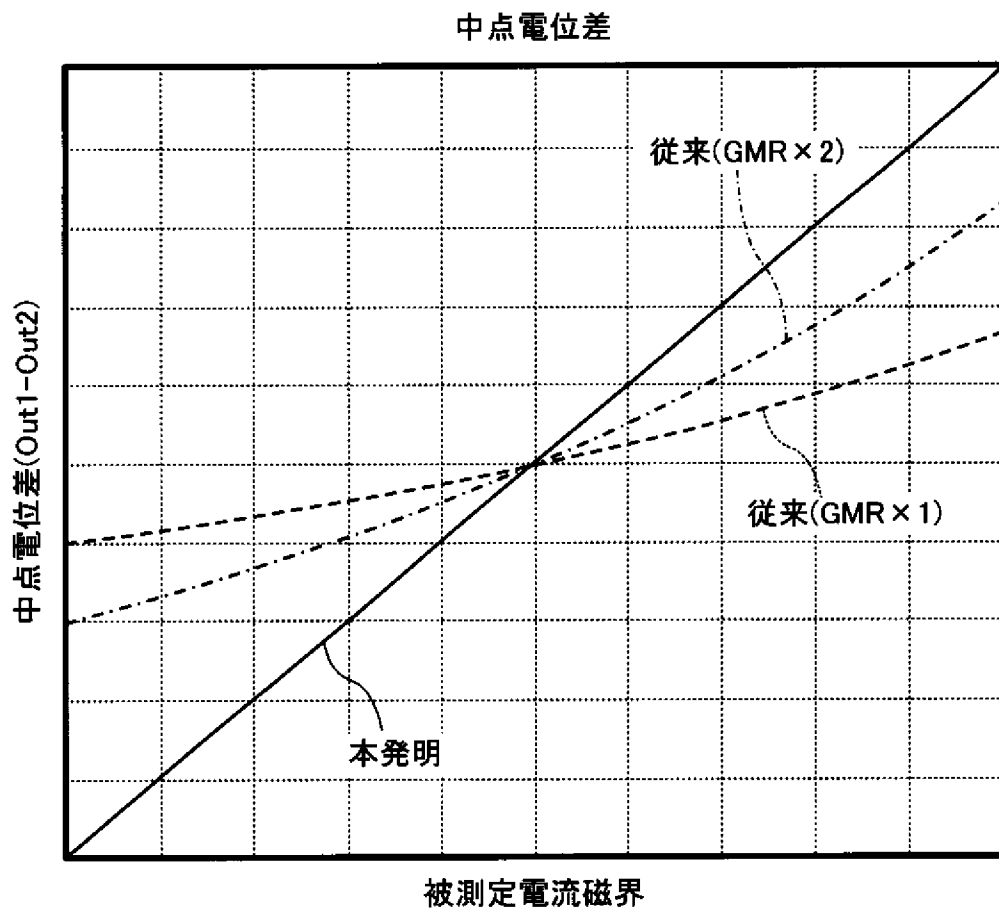


(a)

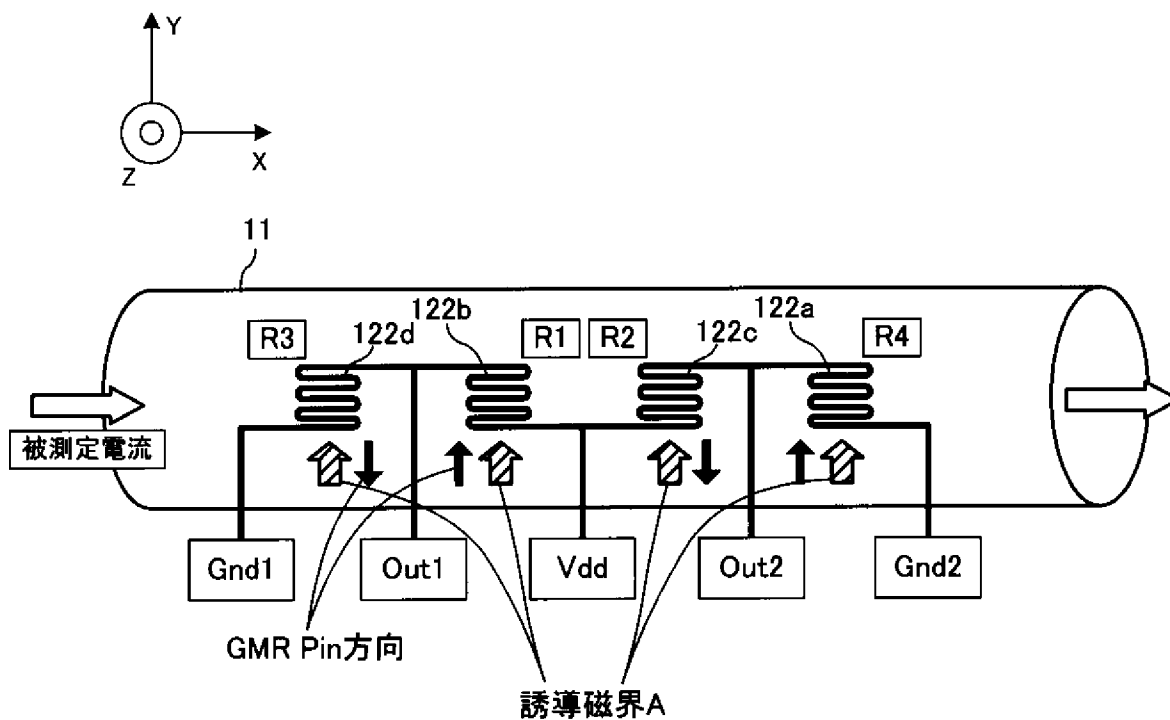


(b)

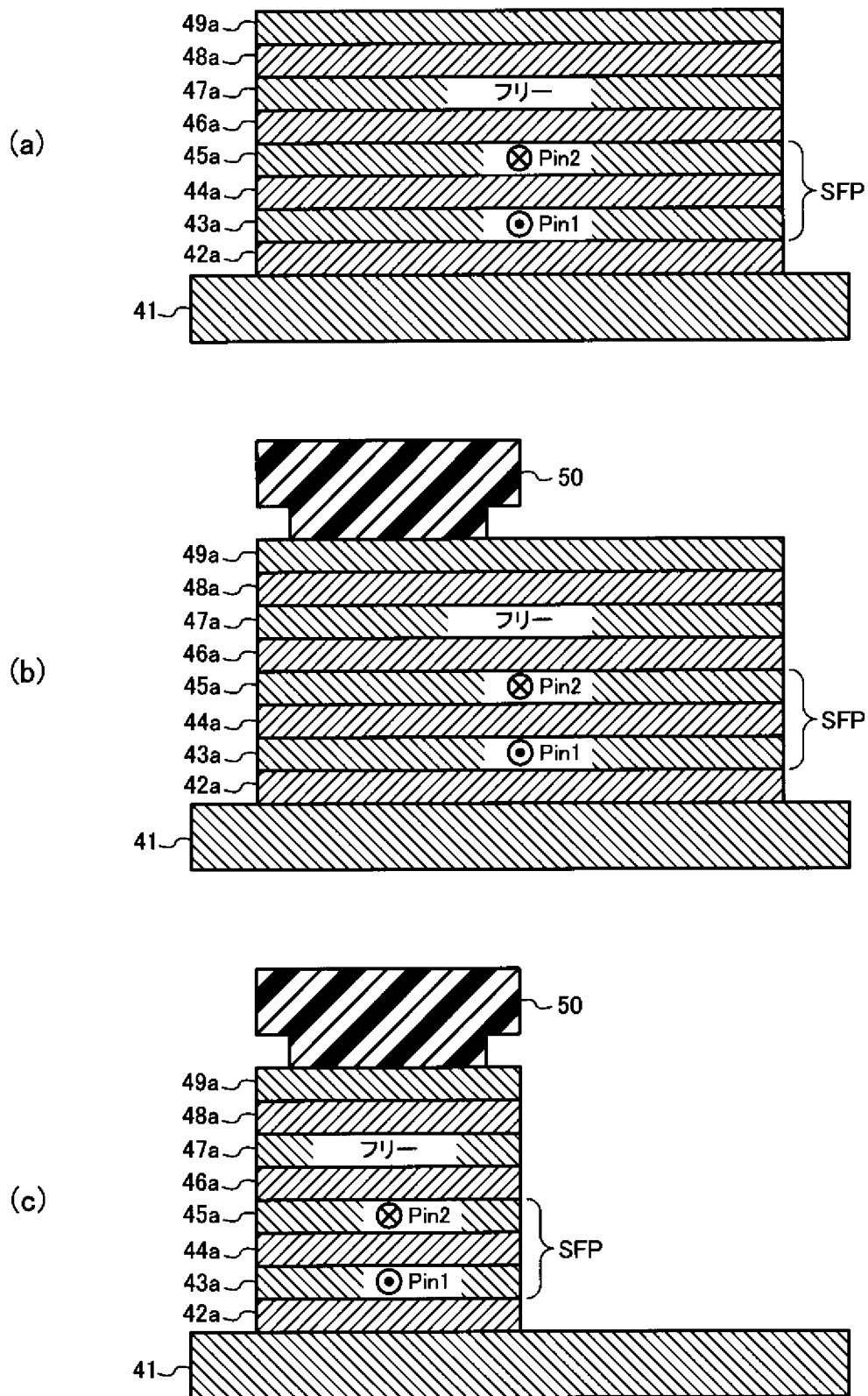
[图8]



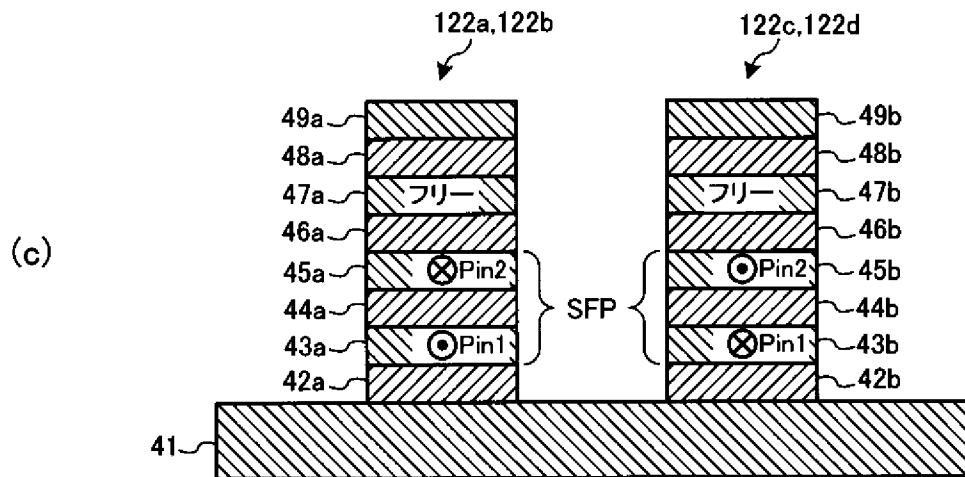
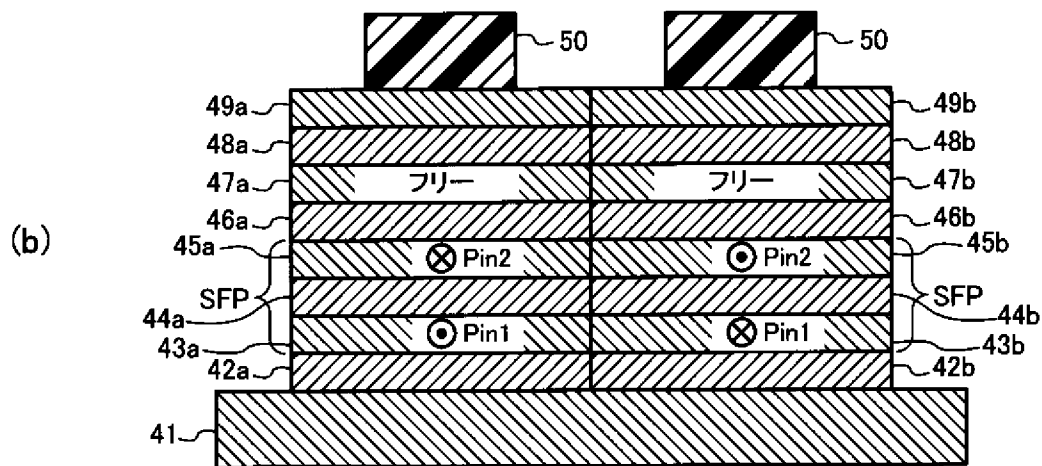
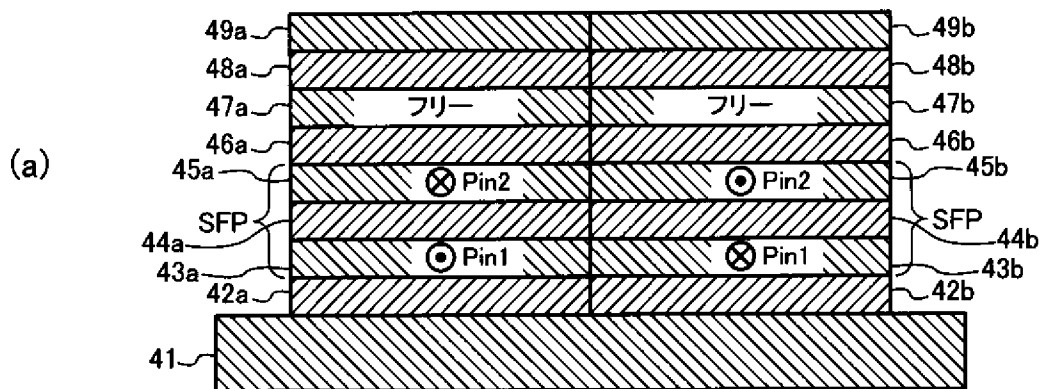
[图9]



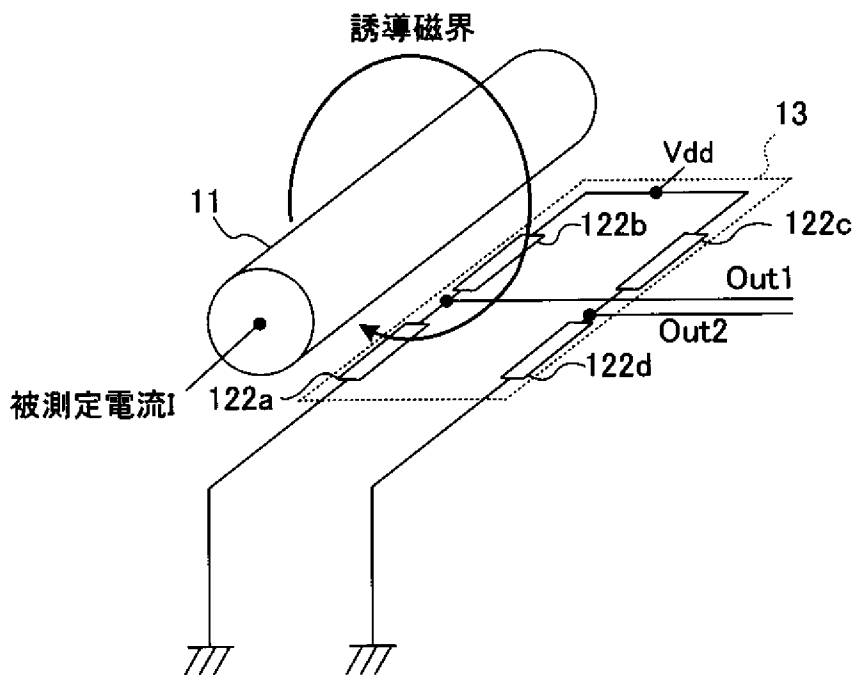
[図10]



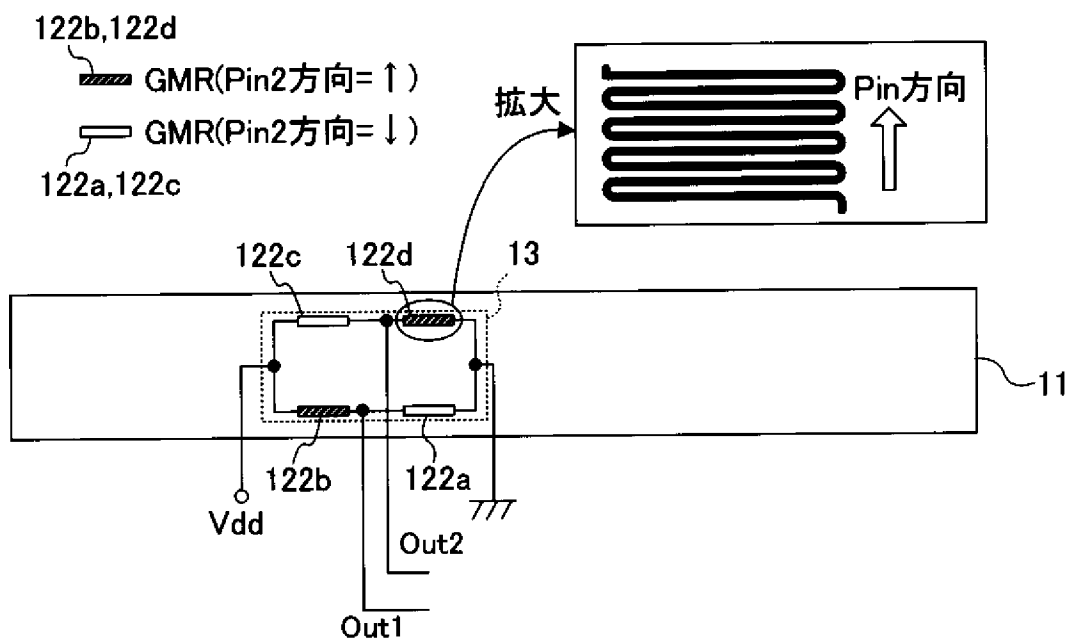
[図11]



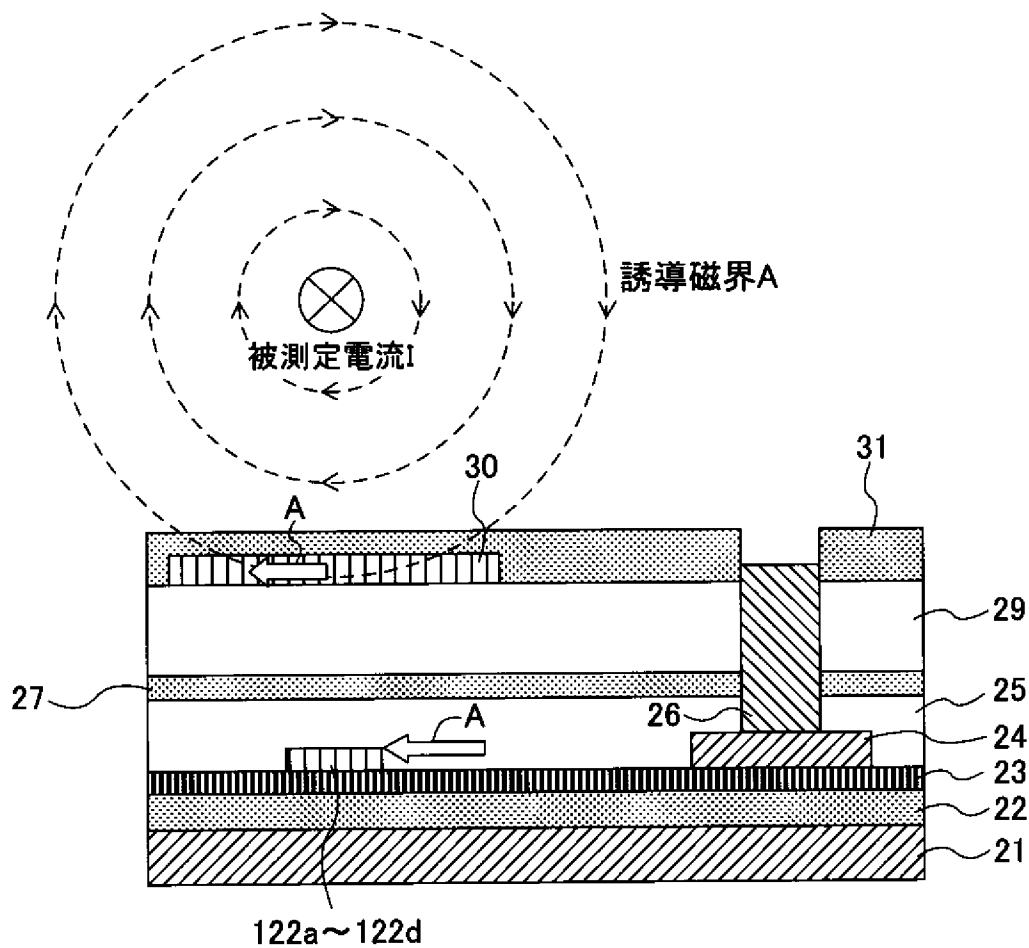
[图12]



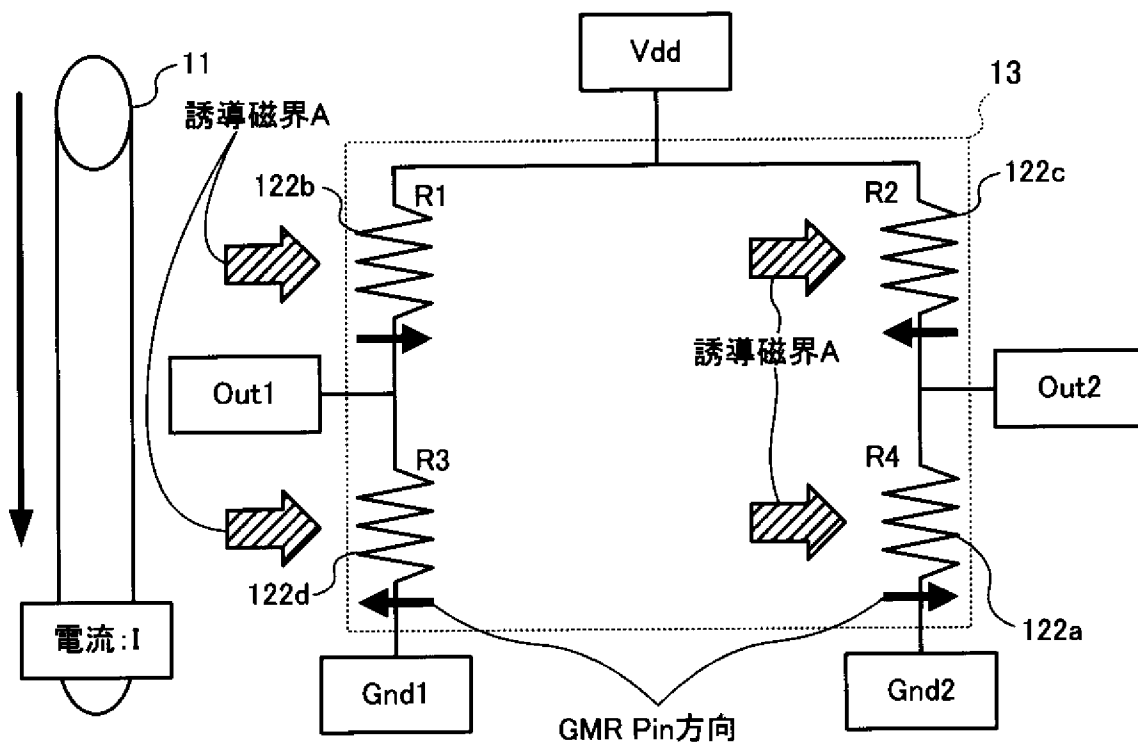
[图13]



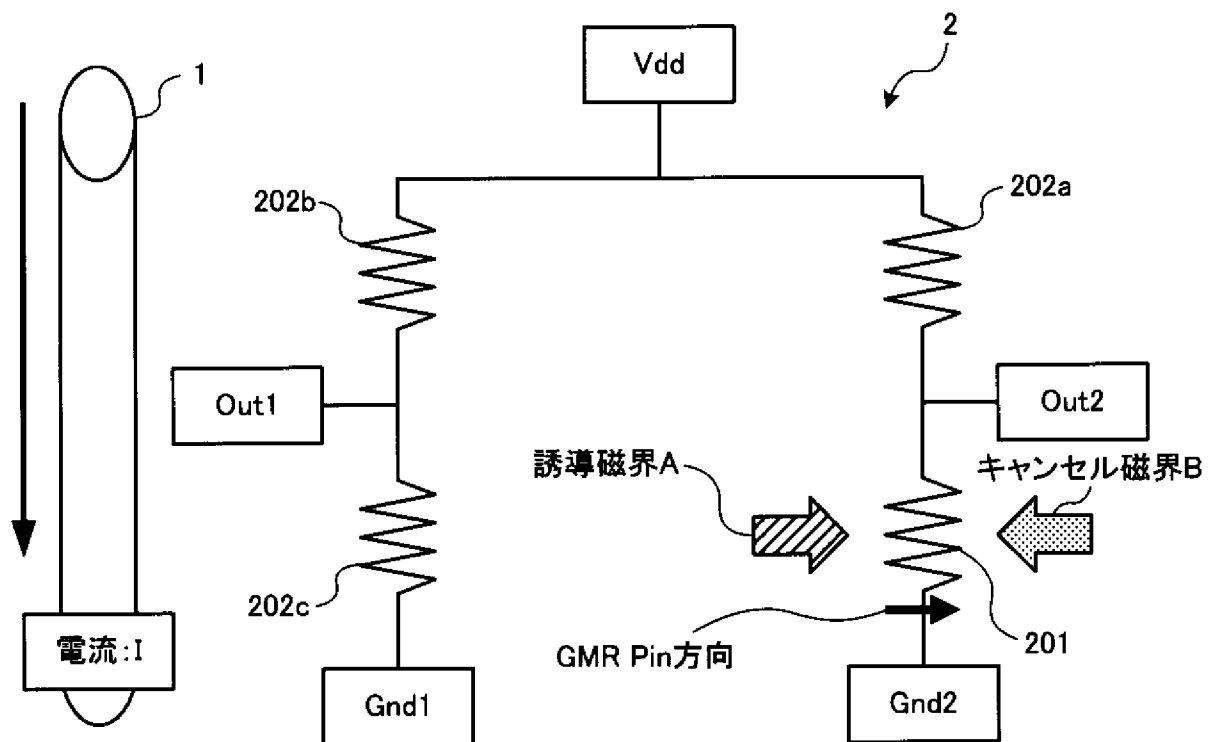
[図14]



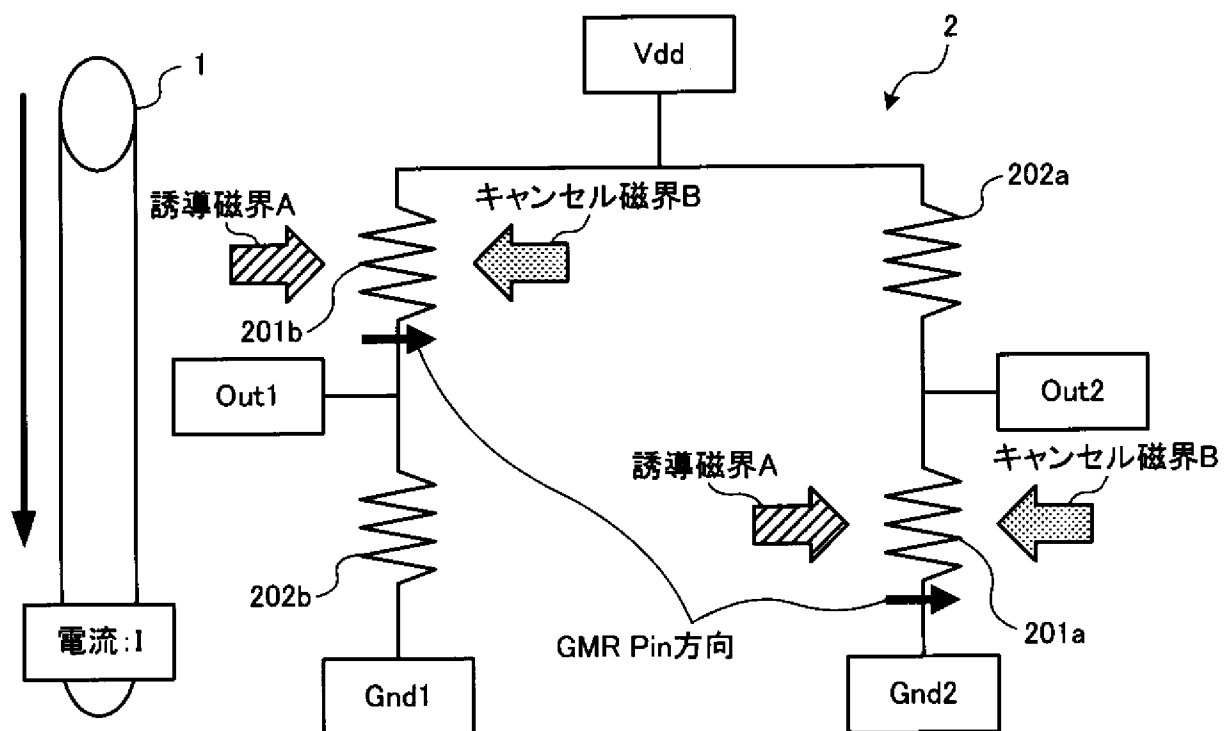
[図15]



[図16]



[図17]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/053343

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01R15/20(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) G01R15/20, G01R19/00-32, G01R33/09, H01F27/42, H01F38/20-40, H01L43/00-14		
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 1996-2011 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2011 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2011		
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 8-211138 A (Lust Antriebstechnik GmbH), 20 August 1996 (20.08.1996), paragraphs [0014] to [0017]; fig. 2 to 3 & US 5719494 A & EP 707218 A2 & DE 4436876 A & DE 59509965 D	1, 4-5 2-3, 6
Y A	JP 2008-306112 A (Hitachi Metals, Ltd.), 18 December 2008 (18.12.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1, 4-5 2-3, 6
A	JP 2007-187530 A (Mitsubishi Electric Corp.), 26 July 2007 (26.07.2007), entire text; all drawings & US 2007/0159159 A1 & DE 102007001847 A	1-6
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 22 April, 2011 (22.04.11)		Date of mailing of the international search report 24 May, 2011 (24.05.11)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/053343

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-122083 A (Kohden Co., Ltd.), 29 May 2008 (29.05.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-6
A	JP 7-318591 A (Toyo Communication Equipment Co., Ltd.), 08 December 1995 (08.12.1995), entire text; all drawings (Family: none)	2-6
A	JP 2004-132790 A (Fuji Electric Holdings Co., Ltd.), 30 April 2004 (30.04.2004), entire text; all drawings (Family: none)	2-6

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01R15/20(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 (IPC)) Int.Cl. G01R15/20, G01R19/00-32, G01R33/09, H01F27/42, H01F38/20-40, H01L43/00-14										
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:30%;">日本国実用新案公報</td> <td style="width:70%;">1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2011年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2011年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2011年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2011年	日本国実用新案登録公報	1996-2011年	日本国登録実用新案公報	1994-2011年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2011年									
日本国実用新案登録公報	1996-2011年									
日本国登録実用新案公報	1994-2011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 8-211138 A (ルスト アントリープステヒニク ゲゼルシャフト ミット ベシュレンクテル ハフツング) 1996.08.20, [0014]-[0017], 図 2-3 & US 5719494 A & EP 707218 A2 & DE 4436876 A & DE 59509965 D	1, 4-5 2-3, 6								
Y A	JP 2008-306112 A (日立金属株式会社) 2008.12.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1, 4-5 2-3, 6								
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。										
<table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> * 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 </td> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> 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 </td> </tr> </table>			* 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						
* 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 22.04.2011	国際調査報告の発送日 24.05.2011									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 堀 圭史 電話番号 03-3581-1101 内線 3258	2S 3005								

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
A	JP 2007-187530 A (三菱電機株式会社) 2007. 07. 26, 全文, 全図 & US 2007/0159159 A1 & DE 102007001847 A	1-6
A	JP 2008-122083 A (浜松光電株式会社) 2008. 05. 29, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-6
A	JP 7-318591 A (東洋通信機株式会社) 1995. 12. 08, 全文, 全図 (ファミリーなし)	2-6
A	JP 2004-132790 A (富士電機ホールディングス株式会社) 2004. 04. 30, 全文, 全図 (ファミリーなし)	2-6