(19)日本国特許庁(JP)　(12)特 許 公 報(B2)　(11)特許番号
特許第4853474号
(P4853474)
(45)発行日 平成24年1月11日(2012.1.11)　(24)登録日 平成23年11月4日(2011.11.4)

(51)Int.Cl.　F I
G01R 15/24 (2006.01)　G01R 15/07 B
G01R 15/07 C

請求項の数 4 (全 10 頁)

(21)出願番号 特願2007-507064 (P2007-507064)
(86)(22)出願日 平成18年3月1日(2006.3.1)
(86)国際出願番号 PCT/JP2006/303872
(87)国際公開番号 WO2006/095620
(87)国際公開日 平成18年9月14日(2006.9.14)
審査請求日 平成19年8月20日(2007.8.20)
(31)優先権主張番号 特願2005-63609 (P2005-63609)
(32)優先日 平成17年3月8日(2005.3.8)
(33)優先権主張国 日本国(JP)

(73)特許権者 000003687
東京電力株式会社
東京都千代田区内幸町一丁目１番３号
(74)代理人 100064908
弁理士 志賀 正武
(74)代理人 100089037
弁理士 渡邊 隆
(72)発明者 黒澤 潔
日本国東京都千代田区内幸町１丁目１番３号 東京電力株式会社内
(72)発明者 白川 和臣
日本国東京都千代田区内幸町１丁目１番３号 東京電力株式会社内

審査官 堀 圭史

最終頁に続く

(54)【発明の名称】光センサおよび光電流・電圧センサ

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
光源からの光を光学部品からなるセンサに導き、このセンサにて物理量に基づき前記光の強度を変調し、変調された光を偏波の直交する２つの成分に分け、第１，第２の受光素子でそれぞれ受信し、前記第１，第２の受光素子の出力から両成分の和と差の比を求めて物理量を検出するに当たり、
前記第１の受光素子と前記第２の受光素子の少なくとも一方の受光素子の前段に該受光素子へ入射される光を減衰させる可変光減衰器を設け、該可変光減衰器を設けた受光素子の後段に該受光素子から出力される信号を増幅させる可変増幅器を設け、前記可変光減衰器の光減衰率または前記可変増幅器の増幅率を調整することで、センサ出力のゼロ点と感度の較正を可能にしたことを特徴とする光センサ。
【請求項２】
光源からの光を光学部品からなるセンサに導き、このセンサにて物理量に基づき前記光の強度を変調し、変調された光を偏波の直交する２つの成分に分け、その一方を第１の受光素子で受信し、前記光源からの光を直接抽出して第２の受光素子で受信し、前記第１の受光素子の出力と前記第２の受光素子出力との差を求め、この差と前記第２の受光素子出力との比を求めて物理量を検出するに当たり、
前記第１の受光素子と前記第２の受光素子の少なくとも一方の受光素子の前段に該受光素子へ入射される光を減衰させる可変光減衰器を設け、該可変光減衰器を設けた受光素子の後段に該受光素子から出力される信号を増幅させる可変増幅器を設け、前記可変光減衰

器の光減衰率または前記可変増幅器の増幅率を調整することで、センサ出力のゼロ点と感度の較正を可能にしたことを特徴とする光センサ。
【請求項３】
前記請求項１または２に記載の光センサに、ファラデー効果を用いた光電流センサ。
【請求項４】
前記請求項１または２に記載の光センサに、ポッケルス効果を用いた光電圧センサ。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
この発明は光センサ、特に直流から高周波の交流までの広範囲の電流・電圧の測定が可能な光電流・電圧センサに関する。
【背景技術】
【０００２】
近年、ファラデー効果を利用した交流電流検出用光ファイバ電流センサの開発・実用化が進められている（例えば非特許文献１参照）。この交流用センサの開発に伴い、パワーエレクトロニクス機器や、それを応用した直流送電設備，直流変電設備などへの適用を目的とする直流用光ファイバ電流センサの実現が期待されている。
【０００３】
この直流用センサでは、直流（周波数ゼロの成分）の検出のみではなく、高周波成分が重畳した直流電流の検出、および立上がり時間の短い電流（１ｍｓｅｃ以下、ときには１μｓｅｃ）の検出が可能であることが必要とされる。このような要求に対しては、交流用に確立されてきた技術の活用に加えて、ゼロ点設定の方法（被測定電流がゼロのときに出力をゼロに設定すること）、および感度設定の方法（出力の感度を規定値設定すること）、さらにはそれらの設定値の安定化などが課題となる。これらの課題は、強度変調型交流センサにおいては、受信信号の変調度を演算処理にて求める方法により達成されており、前掲の非特許文献１にも記載されているところである。
【０００４】
一方、直流用には上記変調度演算方式を用いることが出来ないため、例えば光ファイバジャイロに用いられるサニャック干渉計を応用する方式（例えば、非特許文献２），光ヘテロダインを応用する方式（例えば、非特許文献３）などの開発が進められている。図８は、その非特許文献２に示す方式を図示したもので、以下、その概要について説明する。
【０００５】
光源を発した光がカプラ１、デポラライザを通過後、偏光子を通過して直線偏光とされる。光はさらに、カプラ２により２つに分けられてループ型ファイバ干渉計に入射し、それぞれループの内部を逆方向に回る光となる。２つの光は、１／４波長板で円偏波に変換された後、センサファイバを伝搬する。その際、被測定電流が誘起する磁界がセンサファイバに印加されることによって、ファラデー効果により両者の伝搬速度の間に差が生じる。この２つの光をカプラ２で合波した後、受光素子に入射することにより、位相差つまり電流に応じた受光強度の変化が起こる。この受光強度の変化から電流値を求める。
【０００６】
上記システムには、感度の確保と受光強度の変動に対する出力の安定性確保を目的として、圧電振動子（ＰＺＴ）を用いて光の変調を行なうことによってキャリア信号を作り出し、ファラデー効果によってそのキャリアがさらに変調を受ける仕組みが用いられている。キャリアを復調することにより、システム出力を得る。すなわち、図８において、変調信号を作り出すために基準信号発生器、振動子駆動部および圧電振動子などが設けられる。
【０００７】
また、変調の効率を高めるため、付加ファイバ（例えば、１００ｍ程度）が設けられる。さらに、変調の深さを一定に保つため、受信信号の中から変調周波数の２倍波と４倍波を抽出して両者の比を求め、その比に比例する信号を変調回路にフィードバックする。信

号処理部には、同期検波回路などのやや複雑な要素が必要となる。

【０００８】

サニャック干渉計方式では、変調を行なわないと、原理上電流が小さいときのシステムの感度がゼロとなるため、変調は必須である。さらに、この方式では、システムの測定精度を保つ上で変調・復調を行なうことのほかに１／４波長板、偏光子、デポラライザなどの光学部品には特性が高精度のものを選ぶ必要がある。

【非特許文献１】黒澤「光ファイバ電流センサの開発と応用」静電気学会誌28巻5号（第251－257頁）2004

【非特許文献２】M.takahashi,et al「Sagnac Interferometer-type fiber-optic current sensor using single-mode fiber down leads」Technical Digest of 16th International conference on optical fiber sensor

【非特許文献３】黒澤「光ヘテロダイン法を応用した光電流変成器の基本特性の検討」電気学会論文誌B117巻3号（第354－363頁）1997

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００９】

上記のように、サニャック干渉計方式には次のような問題がある。

イ）繊細かつ複雑な光学系を必要とする。

ロ）複雑な信号処理回路を必要とする。

ハ）キャリア信号を作成し、その変調・復調という操作を行なうことから、応答速度を早くすることが難しい。応答速度を高めるためにはキャリア周波数を高める必要があり、その場合には変調電力が増すとともに、信号処理回路の負担も増加する。

【００１０】

したがって、この発明の課題は、キャリア信号を用いない、高速な（高速応答，立上がり時間の短い）受信信号光の強度に情報を持たせる光強度検出方式を実現して構成の簡素化を図るとともに、ゼロ点調整や出力の較正を容易にすることにある。

【課題を解決するための手段】

【００１１】

このような課題を解決するため、請求項１の発明では、光源からの光を光学部品からなるセンサに導き、このセンサにて物理量に基づき前記光の強度を変調し、変調された光を偏波の直交する２つの成分に分け、第１，第２の受光素子でそれぞれ受信し、第１，第２受光素子の出力から両成分の和と差の比を求めて物理量を検出するに当たり、

前記２つの受光素子のそれぞれ入射される光に対してはそれぞれ可変光減衰器、前記２つの受光素子からの出力信号に対してはそれぞれ可変増幅器の少なくとも１つを設け、光減衰率または増幅率を調整することで、センサ出力のゼロ点と感度の較正を可能にしたことを特徴とする。

【００１２】

請求項２の発明では、光源からの光を光学部品からなるセンサに導き、このセンサにて物理量に基づき前記光の強度を変調し、変調された光を偏波の直交する２つの成分に分け、２つの受光素子でそれぞれ受信する一方、前記光源からの光を直接抽出して第３の受光素子で受信し、第１，第２受光素子のいずれか一方の出力と第３の受光素子出力との差を求め、この差と第３の受光素子出力との比を求めて物理量を検出するに当たり、

前記第１，第２受光素子のいずれか一方と第３の受光素子のそれぞれに入射される光に対してはそれぞれ可変光減衰器、前記第１，第２受光素子のいずれか一方と第３の受光素子からの出力信号に対してはそれぞれ可変増幅器の少なくとも１つを設け、光減衰率または増幅率を調整することで、センサ出力のゼロ点と感度の較正を可能にしたことを特徴とする。

【００１３】

上記請求項１または２の発明に、ファラデー効果の原理を適用することで光電流センサを得ることができ（請求項３の発明）、または、ポッケルス効果の原理を適用することで

光電圧センサを得ることができる（請求項４の発明）。

【発明の効果】

【００１４】

この発明によれば、キャリア信号を用いない、高速応答化が容易な光強度検出方式を実現したので、構成が著しく簡素化されるとともに、ゼロ点調整や出力の較正が容易となり、その結果、直流から高周波の交流までの広範囲の電流・電圧の測定が可能となる利点がもたらされる。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１】この発明の原理説明図

【図２】図１におけるP_A，P_Bとθ_Fとの関係説明図

【図３】この発明の実施の形態を示す構成図

【図４】この発明の他の実施の形態を示す構成図

【図５】図３と図４とを兼用可能な構成図

【図６】２信号方式のシステム構成図

【図７】１信号方式のシステム構成図

【図８】従来例としてのサニャック干渉計方式を示す構成図

【符号の説明】

【００１６】

１…光源、２…ビームスプリッタ、３…偏光子、４…ファラデー素子、５…検光子、６１，６２，６３…受光素子（ＰＤ）、７１，７２，７３…可変光減衰器（ＡＴＴ）、８１，８２，８３…可変増幅器（Ｇ）、９１…加算器、９２…減算器、１０…割算器（ＤＩＶ）、１１…低域通過フィルタ（ＬＰＦ）１２…ミラー、１３…偏／検光子。

【発明を実施するための最良の形態】

【００１７】

図１はこの発明の原理構成図である。

【００１８】

同図において、１は光源、２はビームスプリッタ、３は偏光子、４はファラデー素子、５は検光子、６１，６２，６３はフォトダイオード（ＰＤ）等の受光素子である。

【００１９】

いま、図１のビームスプリッタ２の分離率をＲ、光量の伝送効率をη_1、ファラデー素子４の長さをＬ、ファラデー回転角をθ_F、ベルデ定数をＶ、電流Ｉにより生成する磁界の強さをＨとして

$|2\theta_F| \ll \pi/2$，$\theta_F = VHL = VI$…（１）

とおくと、受光素子６１，６２および６３にそれぞれ入射する光量P_A，P_BおよびP_Rは次式で表わされる。

【００２０】

$P_A = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_A \cdot (1-R)(1/2)P_0(1+2\theta_F)$…（２）

$P_B = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_B \cdot (1-R)(1/2)P_0(1-2\theta_F)$…（３）

$P_R = \eta_1 \cdot \eta_R \cdot R \cdot P_0$…（４）

理想状態では、

$R = 0$…（５）

$\eta_1 = \eta_2 = \eta_R = \eta_A = \eta_B = 1$…（６）

なので、（５），（６）式を（２），（３），（４）に代入すると、

$P_A = (1/2)P_0(1+2\theta_F)$…（７）

$P_B = (1/2)P_0(1-2\theta_F)$…（８）

$P_R = 0$…（９）

となる。

（１）２信号方式

P_AとP_Bの両方の信号を用いる方式である。ここで、（７）式＋（８）式を求めると、

$P_A + P_B = P_0$…（１０）
$P_A - P_B = P_0 \cdot 2\theta_F$…（１１）
となる。よって、変調度をM_2とすると、
$M_2 = (P_A - P_B) / (P_A + P_B) = 2\theta_F$…（１２）
と表わすことができる。P_A，P_Bとθ_Fとの関係を図示すると、図２のようになる。

【００２１】
すなわち、理想状態ならば変調度M_2をセンサ出力とすることにより、精度を確保できるが、実際は、η_1，η_2，η_R，η_A，$\eta_B \neq 1$である。そこで、Ｒ＝０として、上記（２），（３）式から変調度M_2を求めると、
$$M_2 = (P_A - P_B) / (P_A + P_B) = \{\eta_A(1+2\theta_F) - \eta_B(1-2\theta_F)\} / \{\eta_A(1+2\theta_F) + \eta_B(1-2\theta_F)\} \quad \cdots (13)$$
となり、$\eta_A = \eta_B$でない限り、明らかに
$M_2 \neq 2\theta_F$
である。

【００２２】
したがって、直接（１２）式で表わされるM_2を求めても、センサ出力の精度は確保できない。そこで、図１の受光素子６１，６２に入射する光量P_A，P_Bに係数G_A，G_Bを乗じて、
$P_A' = G_A P_A$…（１４）
$P_B' = G_B P_B$…（１５）
として、上記（１３）式のP_A，P_Bに置き換えて変調度M_2を求めると、
$$M_2 = \{G_A \cdot \eta_A(1+2\theta_F) - G_B \cdot \eta_B(1-2\theta_F)\} / \{G_A \cdot \eta_A(1+2\theta_F) + G_B \cdot \eta_B(1-2\theta_F)\} \quad \cdots (16)$$
となる。

【００２３】
いま、$G_A \cdot \eta_A = G_B \cdot \eta_B$…（１７）
とおいて、これを（１６）式に代入すると、
$M_2 = 2\theta_F$…（１８）
が得られる。G_A，G_Bの調整は、$\theta_F = 0$のときに、$M_2 = 0$となるようにすればよい。
（２）１信号方式
一方の信号のみを用いる方式である、ここでは、例えばP_Aを用いこととし、P_Aを示す（７）式を下記する。

【００２４】
$P_A = (1/2) P_0 (1+2\theta_F)$…（７）
上記（７）式から$P_0/2$を差し引いたものを、変調度M_1として求める。

【００２５】
$M_1 = P_A - P_0/2 = \theta_F$…（１９）
上式より、理想状態であれば変調度M_1をセンサ出力とすることにより、精度を確保できるが、実際は、η_1，η_2，$\eta_A \neq 1$である。そこで、Ｒ＝０として、上記（２）式から変調度M_1を求めると、
$$M_1 = \eta_1\eta_2\eta_A \cdot (1/2) P_0 (1+2\theta_F) - (1/2) P_0 = (1/2) P_0 \{\eta_1\eta_2\eta_A \cdot (1+2\theta_F) - 1\} \quad \cdots (20)$$
となる。

【００２６】
上式は$\eta_1\eta_2\eta_A = 1$でない限りは、明らかに$M_1 \neq \theta_F$である。したがって、（１９）式で表わされるM_1を求めても、センサ出力の精度は確保できない。そこで、受光素子６１に入射する光量P_Aに係数G_Aを乗じるとともに、通常、光源の安定化が困難であることを考慮し、P_0と比例関係にある参照信号P_Rを用いる。このとき、受光素子６３に入射す

る光量P_Rにも係数G_Rを乗じるものとする。すなわち、

$P_A' = G_A P_A$…（２１）

$P_R' = G_R P_R$…（２２）

とする。

【００２７】

（２１），（２２）式に先の（２），（４）式を代入し、次式で表わされる変調度M_1を求める。

【００２８】

$$M_1 = \{G_A \cdot \eta_1 \eta_2 \eta_A (1-R)(1/2) P_0 (1+2\theta_F) - G_R \cdot \eta_1 \eta_R R P_0\} / G_R \cdot \eta_1 \eta_R R P_0$$

$$= \{G_A \cdot \eta_2 \eta_A (1-R)(1/2)(1+2\theta_F) - G_R \cdot \eta_R R\} / G_R \cdot \eta_R R \quad \cdots (23)$$

いま、

$(1/2) G_A \cdot \eta_2 \eta_A (1-R) = G_R \cdot \eta_R R = K$…（２４）

とおいて（２３）式に代入すると、次式のようになる。

【００２９】

$M_1 = \{2K\theta_F + (K-K)\} / K = 2\theta_F$…（２５）

G_A，G_Rの調整は、$\theta_F = 0$のときに、$M_1 = 0$となるようにすればよい。

【００３０】

ところで、簡素な構成の強度検出方式でゼロ点と感度の設定、設定値の安定化、高速応答などの特性を持つ装置を構築するには、以下のような条件を考慮する必要がある。

イ）受信光信号の値は、光源強度と光源から受光素子に至る光路の伝送効率に応じて決まる。これらの値は装置を組立てる際に一定の値に定まるのではなく、光学系毎に異なる。

ロ）光源から光ファイバ電流素子の間は必ず、コア径の細い単一モードファイバとなることなどから、光学系の僅かな狂いがセンサ素子に入射する光量の変化を引き起こし易い。一方、センサ素子直近の検光子を通過した光の受光素子までの伝送には、コア径の太いマルチモードファイバを用いることができる。したがって、センサ素子への入射光量の安定化と、センサ素子通過光の受光素子までの伝送効率の安定化の困難度を比較すると、前者のセンサ素子への入射光量の安定化の方が難しい。

【００３１】

以上の考察から、強度変調による直流電流検出装置を構築する上では、以下のことが有効であることが分かる。

ａ）被測定電流がゼロのときに、光学的または電気的手段によって信号の値を調整し、出力をゼロに較正できるよう、光学系と信号処理系を工夫する。

ｂ）センサ素子への入射光量に対し出力が変動しないよう、光学系と信号処理系を工夫する。

【００３２】

そこで、この発明では以下のようにする。図３はこの発明の実施の形態を示す構成図である。これは、２信号方式における（１７）式を満たすように、係数G_A，G_B，G_Rを調整可能にした信号処理基本構成例を示す。

【００３３】

例えば、センサ出力光を偏波の直交する２つの成分に分けて得たP_A，P_Bのそれぞれを、可変光減衰器（ＡＴＴ）７１，７２を介して受光素子（ＰＤ）６１，６２に導くとともに、受光素子ＰＤからの出力信号に対しては可変増幅器（Ｇ）８１，８２を挿入したものである。なお、９１は減算器、９２は加算器、１０は割算器（ＤＩＶ）を示す。

【００３４】

その調整方法は、（１）被測定電流＝０とした状態で、（２）ＡＴＴ７１，７２の減衰率α_A，α_B、またはＧ８１，８２の増幅率g_A，g_Bを変え、出力Ｓ＝０となるように調整する。このようにすると、先の（１７）式の条件が満たされる。すなわち、

$G_A \cdot \eta_A = G_B \cdot \eta_B$…（１７）

が成立する。ここに、

$G_A=\alpha_A g_A$…（２６）

$G_B=\alpha_B g_B$…（２７）

である。なお、（１７），（２６），（２７）式を満たす条件として、α_A，α_B，g_A，g_Bのすべてを調節する必要は無く、これら４つのパラメータのうちの少なくとも１つを調整すれば良い。

【００３５】

図４はこの発明の別の実施の形態を示す構成図である。これは、１信号方式における（２４）式を満たすように、係数G_A，G_B，G_Rを調整可能な信号処理基本構成例を示す。

【００３６】

例えば、センサ出力光を偏波の直交する２つの成分に分けて得たP_A，P_Bのいずれか一方と参照光P_Rを、可変光減衰器（ＡＴＴ）７１，７３を介して受光素子（ＰＤ）６１，６３に導くとともに、受光素子ＰＤからの出力信号に対しては可変増幅器（Ｇ）８１，８３を挿入したものである。なお、１１はローパスフィルタ（ＬＰＦ）で、参照信号にリップルなどの交流成分が含まれている場合に、この影響を取り除くために設けられる。

【００３７】

その調整方法は、図３の場合と同様である。すなわち、（１）被測定電流＝０とした状態で、（２）ＡＴＴ７１，７３の減衰率α_A，α_R、またはＧ８１，８３の増幅率g_A，g_Rを変え、出力Ｓ＝０となるように調整する。このようにすると、先の（２４）式の条件が満たされる。すなわち、

$(1/2)G_A\cdot\eta_2\eta_A(1-R)=G_R\cdot\eta_R R$…（２４）

が成立する。ここに、

$G_A=\alpha_A g_A$…（２８）

$G_R=\alpha_R g_R$…（２９）

である。なお、（２４），（２８），（２９）式を満たす条件として、α_A，α_R，g_A，g_Rのすべてを調節する必要は無く、これら４つのパラメータのうちの少なくとも１つを調整すれば良い。

【００３８】

図５に図３と図４の両方に兼用し得る回路例を示す。

【００３９】

これは、上側の系統に信号P_A，P_Bのいずれか一方（ここではP_A）を導入し、下側の系統に信号P_BまたはP_Rを選択的に導入するとともに、２つのスイッチＳＷを図示の位置にそれぞれ設けたものである。したがって、下側の系統に信号P_Bを導入しスイッチＳＷをオンとすれば図３の回路、また下側の系統に信号P_Rを導入しスイッチＳＷをオフとすれば図４の回路を得ることができる。

【００４０】

図６，図７に以上のようなセンサ光学系と信号処理系とからなる全体構成図を示す。

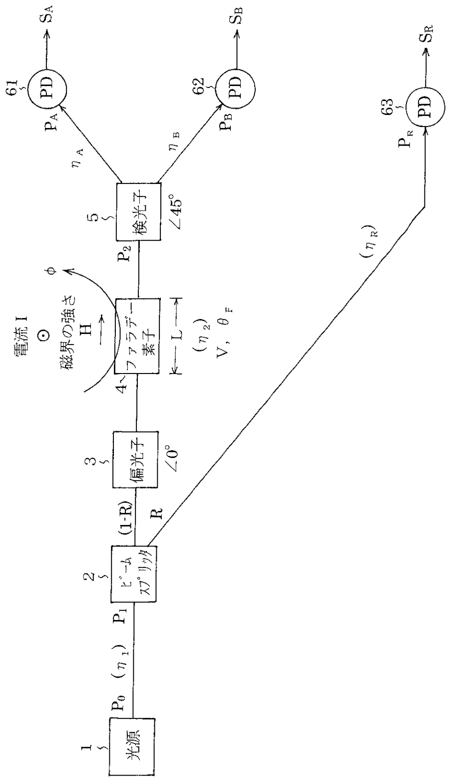
【００４１】

図６は２信号方式、図７は１信号方式の例で、図６（ａ）は透過型、（ｂ）は反射型を示し、図７（ａ）は透過型、（ｂ）は反射型（その１）、（ｃ）は反射型（その２）をそれぞれ示す。その機能・作用は上述の通りであるので、説明は省略する。なお、図６（ｂ）、図７（ｂ），（ｃ）の符号１２はミラー、１３は偏／検光子（偏光子と検光子の機能を有する）である。

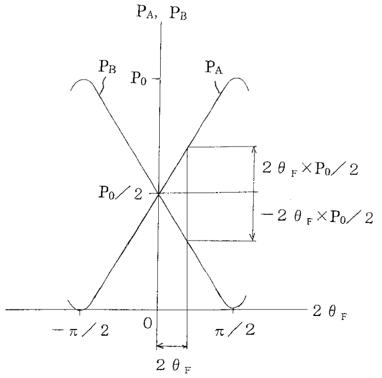
【００４２】

なお、以上では主として電流センサについて説明したが、この発明はファラデー効果に代えてポッケルス効果の原理を適用することで光電圧センサを提供することができ、電流，電圧を含む物理量を検出する光センサを提供することができる。

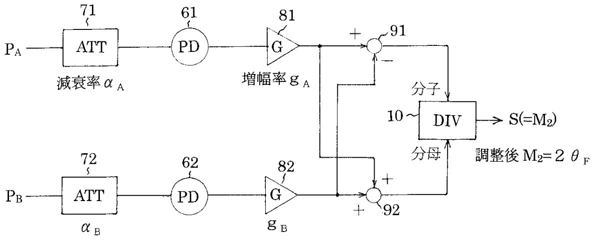
【図１】



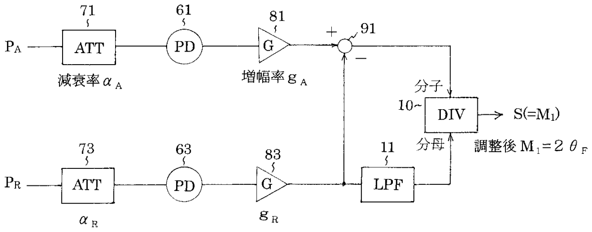
【図２】



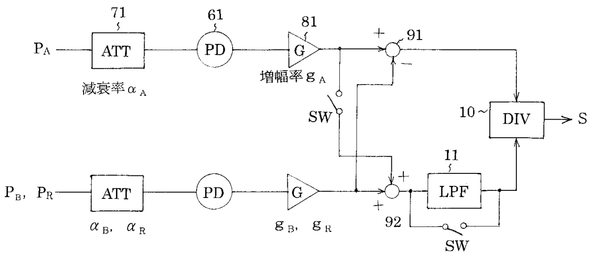
【図３】



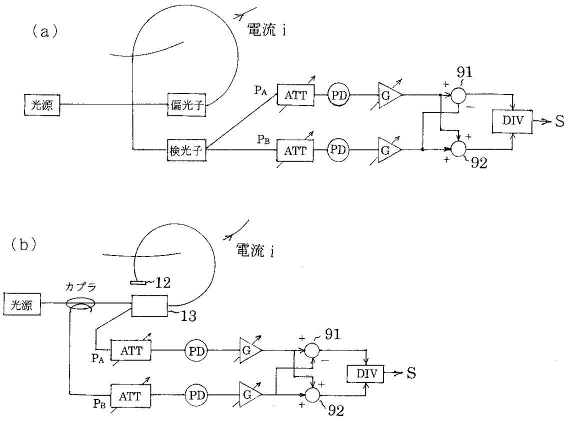
【図４】



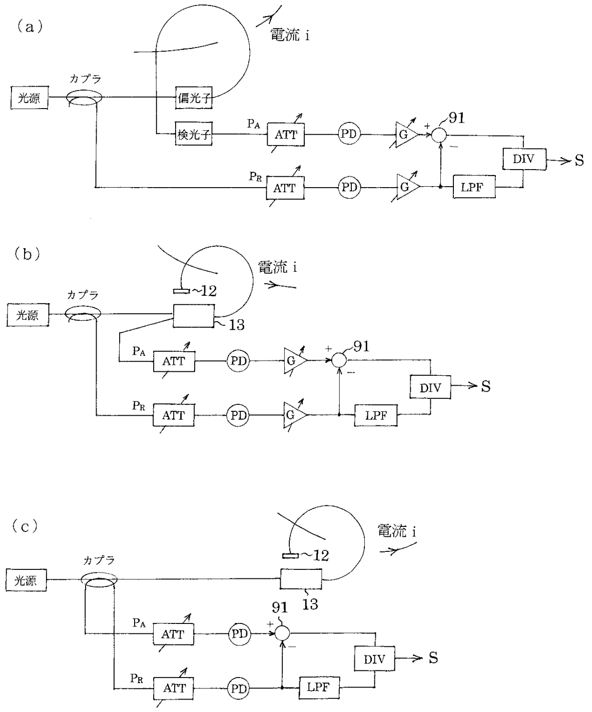
【図５】



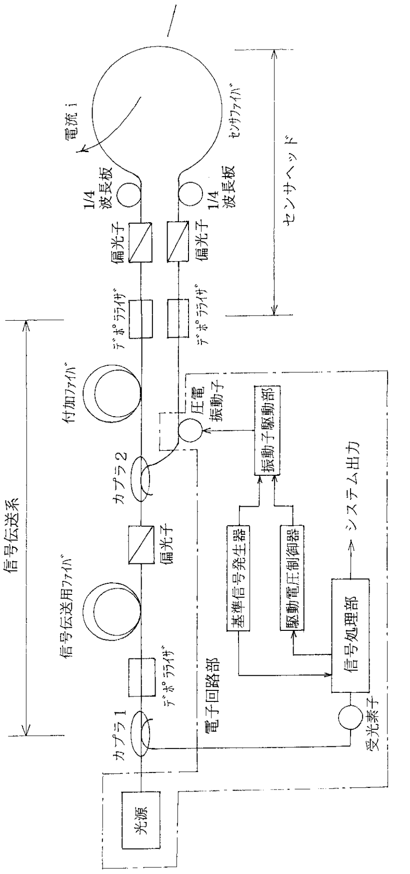
【図６】



【図７】


(a)
電流 i
カプラ
光源
偏光子
検光子
P_A
P_R
ATT
PD
G
91
LPF
DIV
S
(b)
電流 i
~12
~13
カプラ
光源
P_A
P_R
ATT
PD
G
91
LPF
DIV
S
(c)
電流 i
~12
13
カプラ
光源
P_A
P_R
ATT
PD
91
LPF
DIV
S

【図８】


電流 i
センサファイバ
1/4 波長板
1/4 波長板
センサヘッド
偏光子
偏光子
デポラライザ
デポラライザ
付加ファイバ
圧電振動子
振動子駆動部
カプラ２
信号伝送系
偏光子
信号伝送用ファイバ
基準信号発生器
駆動電圧制御器
システム出力
信号処理部
デポラライザ
電子回路部
カプラ１
受光素子
光源

フロントページの続き

(56)参考文献　特開平１０－２２１３７９（ＪＰ，Ａ）
特開昭５８－１３９０８２（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
G01R 15/24-26
G01R 33/032