(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
2017年1月5日(05.01.2017)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2017/002782 A1

(51) 国際特許分類:
G01R 29/08 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2016/069076

(22) 国際出願日: 2016年6月28日(28.06.2016)

(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 2015-130280 2015年6月29日(29.06.2015) JP

(71) 出願人: 国立大学法人大阪大学(OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 Osaka (JP).

(72) 発明者: 久武信太郎(HISATAKE, Shintarou); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 永妻忠夫(NAGATSUMA, Tadao); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 内田裕久(UCHIDA, Hirohisa); 〒6020008 京都府京都市上京区岩栖院町５９番地 擁翠園内 アークレイ株式会社内 Kyoto (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人ワンディーＩＰパートナーズ(ONEDEE IP PARTNERS); 〒5320003 大阪府大阪市淀川区宮原四丁目１番４号ＫＤＸ新大阪ビル 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.

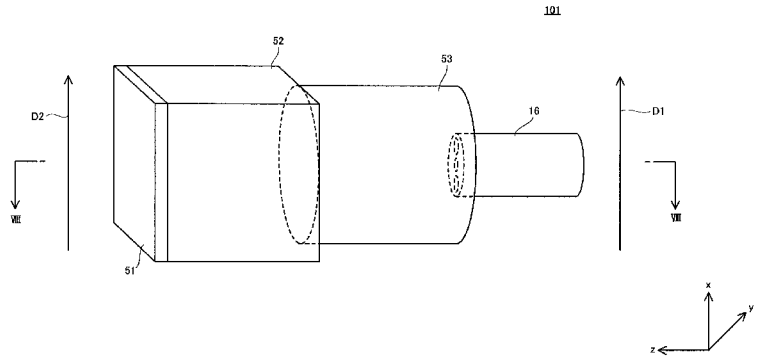
(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告（条約第21条(3)）

(54) Title: ELECTRO-OPTIC PROBE, ELECTROMAGNETIC WAVE MEASURING APPARATUS, AND ELECTROMAGNETIC WAVE MEASURING METHOD

(54) 発明の名称 : 電気光学プローブ、電磁波測定装置および電磁波測定方法

[図7]



(57) Abstract: Provided is an electro-optic probe (101) for detecting an electromagnetic wave, the electro-optic probe (101) being provided with an electro-optic crystal (52) and an optical fiber (16) optically coupled to the electro-optic crystal (52). The direction of a characteristic axis of the electro-optic crystal (52) and the polarization direction of light coming into the electro-optic crystal (52) from the optical fiber (16) are arranged to align with each other, or the characteristic axis of the electro-optic crystal (52) and a characteristic polarization direction of the optical fiber (16) are arranged to align with each other.

(57) 要約: 電磁波を検出するための電気光学プローブ（１０１）であって、電気光学結晶（５２）と、電気光学結晶（５２）と光学的に結合された光ファイバ（１６）とを備え、電気光学結晶（５２）の固有軸の方向と電気光学結晶（５２）へ入射される光ファイバ（１６）からの光の偏波方向とが沿うように設けられているか、または、電気光学結晶（５２）の固有軸の方向と光ファイバ（１６）の固有偏波方向とが沿うように設けられている。

WO 2017/002782 A1

明　細　書

発明の名称 ：

電気光学プローブ、電磁波測定装置および電磁波測定方法

技術分野

[0001]　本発明は、電気光学プローブ、電磁波測定装置および電磁波測定方法に関し、特に、電気光学結晶を用いる電気光学プローブ、電磁波測定装置および電磁波測定方法に関する。

[0002]　この出願は、２０１５年６月２９日に出願された日本出願特願２０１５－１３０２８０を基礎とする優先権を主張し、その開示のすべてをここに取り込む。

背景技術

[0003]　電気光学結晶等を用いて電磁波を検出する装置が各種開発されている。このような電磁波を検出する技術の一例として、たとえば、特許文献１（特開２００５－２１４８９２号公報）には、以下のような技術が開示されている。すなわち、電界センサは、電気光学結晶を備えるセンサヘッド部と、このセンサヘッド部の出力に基づいて被測定電界を検出する信号処理部と、この信号処理部からの光を前記センサヘッド部に伝送して前記電気光学結晶の第１面に入射させる偏波保持ファイバと、前記電気光学結晶中を伝搬して前記電気光学結晶の第１面と対向する第２面から出射した光を前記信号処理部に伝送する光ファイバとを有し、前記信号処理部は、直線偏光を放射し、この直線偏光を前記偏波保持ファイバにより前記センサヘッド部へ伝送させる光源と、前記光ファイバによって伝送された光を予め設定された角度の偏波面を有する直線偏光に変換する直線偏光生成器と、この直線偏光生成器の出力光をＳ偏光とＰ偏光に分離する偏光分離素子と、前記Ｓ偏光を光電変換する第１の光検出器と、前記Ｐ偏光を光電変換する第２の光検出器と、前記第１の光検出器の出力電気信号と前記第２の光検出器の出力電気信号とを差動増幅する差動増幅器と、この差動増幅器の出力電気信号に基づいて被測定電界

を検出する電気信号測定器とを備えるものであり、前記電気光学結晶の第１面に入射する直線偏光の偏波面の角度は、前記電気光学結晶の２つの電気的主軸のうちいずれかの軸に対して略４５度をなし、前記直線偏光生成器の応答速度は、前記被測定電界の周波数の下限値よりも低い。

[0004] また、特許文献２（特開２００１－３４３４１０号公報）には、以下のような技術が開示されている。すなわち、電界プローブは、レーザ光の進行方向に平行または直交する電界のみに感度を有する電気光学結晶と、該電気光学結晶に対してレーザ光を照射するレーザ光照射手段と、該レーザ光照射手段から前記電気光学結晶に入射して反射されてきたレーザ光を受けて、レーザ光の偏光変化をレーザ光の強度変化に変換する偏光検出光学手段と、該偏光検出光学手段で変換したレーザ光の強度変化を電気信号の強度変化の検出信号に変換する光検出手段と、該光検出手段で検出された検出信号の強度および位相を出力する出力手段とを有する。

[0005] また、特許文献３（特開２０１４－５２２７２号公報）には、以下のような技術が開示されている。すなわち、電磁波検出システムは、第一の光源と、前記第一の光源と異なる周波数で発光する第二の光源と、前記第一の光源からの光を２つに分岐する第一の光分岐器と、前記第二の光源からの光を２つに分岐する第二の光分岐器と、前記第一の光分岐器で分岐された２つの光のうち一方の光および前記第二の光分岐器で分岐された２つの光のうち一方の光を合波する第一の光合波器と、前記第一の光分岐器で分岐された２つの光のうち他方の光および前記第二の光分岐器で分岐された２つの光のうち他方の光を合波する第二の光合波器と、一定の周波数の発振信号を出力する発振器と、前記第一の光分岐器と前記第一の光合波器との間、前記第二の光分岐器と前記第一の光合波器との間、前記第一の光分岐器と前記第二の光合波器との間および前記第二の光分岐器と前記第二の光合波器との間のいずれかに挿入され、前記発振器からの発振信号で光の周波数を前記発振信号の周波数だけシフトする周波数シフタと、前記第一の光合波器からの異なる周波数の２つの光を受光して、２つの光の差周波数を周波数とする第一のＲＦ（Ｒ

ａｄｉｏ　Ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ）信号を生成し、生成した第一のＲＦ信号を被測定物に照射するＲＦ信号発生器と、前記第二の光合波器からの異なる周波数の２つの光をＬＯ（Ｌｏｃａｌ　Ｏｓｃｉｌａｔｉｎｇ）信号とし、前記被測定物を透過又は反射した第一のＲＦ信号および前記ＬＯ信号を混合しヘテロダイン検波して、前記ＬＯ信号を構成する２つの光の差周波数と前記第一のＲＦ信号との周波数との差周波数を周波数とする検出信号を出力するＲＦ信号検出器と、前記ＲＦ信号検出器の出力する検出信号を前記発振器の出力する発振信号で２位相ロックイン検出して、前記ＲＦ信号検出器の出力する検出信号と同位相となる同相成分および前記ＲＦ信号検出器の出力する検出信号と直交位相となる直交成分を出力する２相ロックイン検出器と、を備える。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開２００５－２１４８９２号公報

特許文献2：特開２００１－３４３４１０号公報

特許文献3：特開２０１４－５２２７２号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] このような特許文献１～３に記載の技術を超えて、電磁波を良好に測定可能な技術が望まれる。

[0008] この発明は、上述の課題を解決するためになされたもので、その目的は、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することが可能な電気光学プローブ、電磁波測定装置および電磁波測定方法を提供することである。

課題を解決するための手段

[0009] （１）上記課題を解決するために、この発明のある局面に係わる電気光学プローブは、電磁波を検出するための電気光学プローブであって、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記

電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている。

[0010] （６）上記課題を解決するために、この発明のある局面に係わる電気光学プローブは、電磁波を検出するための電気光学プローブであって、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0011] （７）上記課題を解決するために、この発明のある局面に係わる電磁波測定装置は、光源と、前記光源からの光、および電磁波を受ける電気光学プローブと、前記電気光学プローブから出力された光を受ける光フィルタと、前記光フィルタを通過した光を電気信号に変換する受光素子と、前記受光素子によって変換された前記電気信号に基づいて、前記電磁波を測定する検出器とを備え、前記電気光学プローブは、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている。

[0012] （８）上記課題を解決するために、この発明のある局面に係わる電磁波測定装置は、光源と、前記光源からの光、および電磁波を受ける電気光学プローブと、前記電気光学プローブから出力された光を受ける光フィルタと、前記光フィルタを通過した光を電気信号に変換する受光素子とを備え、前記電気光学プローブは、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0013] （９）上記課題を解決するために、この発明のある局面に係わる電磁波測定方法は、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、光源からの光を前記電気

光学プローブに与えるとともに、電磁波を前記電気光学プローブに与えるステップと、前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む。

[0014] （１０）上記課題を解決するために、この発明のある局面に係わる電磁波測定方法は、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、光源からの光を前記電気光学プローブに与えるとともに、電磁波を前記電気光学プローブに与えるステップと、前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む。

発明の効果

[0015] 本発明によれば、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]図１は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の構成を示す図である。

[図2]図２は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の変形例の構成を示す図である。

[図3]図３は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の変形例の構成を示す図である。

[図4]図４は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の測定原理を示す図である。

[図5]図５は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の比較例の測定結果の一例を示す図である。

[図6]図６は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の比較例の測定結果の一例を示す図である。

[図7]図７は、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブの構成を概略的に示す斜視図である。

[図8]図８は、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブの図７におけるＶＩＩＩ－ＶＩＩＩ線に沿った断面を示す断面図である。

[図9]図９は、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブの変形例の図７におけるＶＩＩＩ－ＶＩＩＩ線に沿った断面を示す断面図である。

[図10]図１０は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置を用いた電磁波測定方法の手順を示す図である。

[図11]図１１は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置およびその比較例１の測定結果の一例を示す図である。

[図12]図１２は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置およびその比較例１の測定結果の一例を示す図である。

[図13]図１３は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の測定結果の一例を示す図である。

[図14]図１４は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置およびその比較例２の測定結果の一例を示す図である。

[図15]図１５は、本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置の構成を示す図である。

[図16]図１６は、本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置におけるプローブ光および電気光学結晶による変調サイドバンドの一例を示す図である。

[図17]図１７は、本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置の測定結果の一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0017] 最初に、本発明の実施形態の内容を列記して説明する。

[0018] （１）本発明の実施の形態に係る電気光学プローブは、電磁波を検出するための電気光学プローブであって、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている。

[0019] このような構成により、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶の中で大きな電気光学効果を有する固有軸に揃えることができる。そして、固有軸の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波とプローブ光とが電気光学結晶中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学効果が大きいことによる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0020] （２）好ましくは、前記電気光学結晶は、自然複屈折を有する。

[0021] このように、大きな電気光学定数を有する種類が数多く存在する自然複屈折を有する電気光学結晶を用いる構成により、複屈折の影響の除去による測定の安定性向上の効果を得ながら、検出感度をより向上させることができる。また、特許文献１および２に記載の技術では、プローブ光の偏光状態が、温度等に起因する自然複屈折の揺らぎによって大きく変動し、この変動が検出感度の揺らぎに大きく影響を及ぼす。これに対して、偏波変調による電界計測を測定原理としていない、具体的には、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を電気光学結晶の固有軸に揃える構成により、温度揺らぎに起因する変調効率の変動が非常に小さいことから、外乱の影響を受けにくい状態を実現し、被検出電磁波の振幅および位相を安定して計測することができる。

[0022] （３）好ましくは、前記電気光学結晶は、有機非線形光学結晶である。

[0023] このように、たとえば無機光学結晶と比べて大きな電気光学効果が得られる場合の多い有機非線形光学結晶を電気光学結晶として用いる構成により、検出感度をより向上させることができる。

[0024] （４）より好ましくは、前記電気光学結晶は、ＤＡＳＴ（４－Ｎ，Ｎ－ｄｉｍｅｔｈｙｌａｍｉｎｏ－４’－Ｎ’－ｍｅｔｈｙｌ－ｓｔｉｌｂａｚｏｌｉｕｍ ｔｏｓｙｌａｔｅ）、ＤＡＳＣ（４－Ｎ，Ｎ－ｄｉｍｅｔｈｙｌａｍｉｎｏ－４’－Ｎ’－ｍｅｔｈｙｌ－ｓｔｉｌｂａｚｏｌｉｕｍ ｐ－ｃｈｌｏｒｏｂｅｎｚｅｎｅｓｕｌｆｏｎａｔｅ）、ＤＳＴＭＳ（４－Ｎ，

Ｎ－ｄｉｍｅｔｈｙｌａｍｉｎｏ－４’－Ｎ’－ｍｅｔｈｙｌ－ｓｔｉｌｂａｚｏｌｉｕｍ ２，４，６－ｔｒｉｍｅｔｈｙｌｂｅｎｚｅｎｅｓｕｌｆｏｎａｔｅ）またはＯＨ１（２－（３－（４－Ｈｙｄｒｏｘｙｓｔｙｒｙｌ）－５，５－ｄｉｍｅｔｈｙｌｃｙｃｌｏｈｅｘ－２－ｅｎｙｌｉｄｅｎｅ）ｍａｌｏｎｏｎｉｔｒｉｌｅ）である。

[0025] このように、特に電気光学定数の大きい有機非線形光学結晶を電気光学結晶として用いる構成により、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を電気光学結晶の固有軸に揃えることで自然複屈折率の揺らぎを抑えながら、検出感度を大幅に向上させることができる。

[0026] （５）好ましくは、前記光ファイバは、偏波保持ファイバであり、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0027] このような構成により、光ファイバを伝搬する光の偏波方向の乱れを抑制し、また、電気光学結晶の固有軸に光ファイバの固有偏波方向をより確実かつ容易に揃えることができる。

[0028] （６）本発明の実施の形態に係る電気光学プローブは、電磁波を検出するための電気光学プローブであって、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0029] このような構成により、たとえば、電気光学結晶に入射される光ファイバからの光の偏波方向が電気光学結晶の固有軸の方向に沿っていない場合でも、たとえば、偏波分離素子等を用いて電気光学結晶の固有軸方向の偏波成分を分離して取り出すことができる。これにより、たとえば、電気光学効果が大きいことによる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0030] （７）本発明の実施の形態に係る電磁波測定装置は、光源と、前記光源からの光、および電磁波を受ける電気光学プローブと、前記電気光学プローブ

から出力された光を受ける光フィルタと、前記光フィルタを通過した光を電気信号に変換する受光素子とを備え、前記電気光学プローブは、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている。

[0031] このような構成により、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶の中で大きな電気光学効果を有する固有軸に揃えることができる。そして、固有軸の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波とプローブ光とが電気光学結晶中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学効果が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0032] （８）本発明の実施の形態に係る電磁波測定装置は、光源と、前記光源からの光、および電磁波を受ける電気光学プローブと、前記電気光学プローブから出力された光を受ける光フィルタと、前記光フィルタを通過した光を電気信号に変換する受光素子とを備え、前記電気光学プローブは、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0033] このような構成により、たとえば、電気光学結晶に入射される光ファイバからの光の偏波方向が電気光学結晶の固有軸の方向に沿っていない場合でも、たとえば、偏波分離素子等を用いて電気光学結晶の固有軸方向の偏波成分を分離して取り出すことができる。これにより、たとえば、電気光学効果が大きいことによる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0034] （９）本発明の実施の形態に係る電磁波測定方法は、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結

晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、光源からの光を前記電気光学プローブに与えるとともに、電磁波を前記電気光学プローブに与えるステップと、前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む。

[0035] これにより、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶の中で大きな電気光学効果を有する固有軸に揃えることができる。そして、固有軸の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波とプローブ光とが電気光学結晶中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学効果が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0036] （１０）本発明の実施の形態に係る電磁波測定方法は、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、光源からの光を前記電気光学プローブに与えるとともに、電磁波を前記電気光学プローブに与えるステップと、前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む。

[0037] これにより、たとえば、電気光学結晶に入射される光ファイバからの光の偏波方向が電気光学結晶の固有軸の方向に沿っていない場合でも、たとえば、偏波分離素子等を用いて電気光学結晶の固有軸方向の偏波成分を分離して取り出すことができる。これにより、たとえば、電気光学効果が大きいことによる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0038] 本発明の実施の形態に係る電磁波測定装置は、第１の光源と、前記第１の光源と異なる周波数で発光する第２の光源と、前記第１の光源からの光およ

び前記第２の光源からの光を受ける電気光学プローブと、前記第１の光源からの光および前記第２の光源からの光を受けて、受けた各前記光の周波数の差の周波数を有する電磁波を生成して前記電気光学プローブへ放射する光電磁波変換部と、前記第１の光源または前記第２の光源と前記光電磁波変換部または前記電気光学プローブとの間に設けられ、受けた光の周波数をシフトして出力する光シフタとを備え、前記電気光学プローブは、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている。

[0039] このような構成により、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶の中で大きな電気光学効果を有する固有軸に揃えることができる。そして、固有軸の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波とプローブ光とが電気光学結晶中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学効果が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。また、周波数シフタすなわち光シフタにより少なくとも１つの光源からの出力光の周波数をシフトさせるとともに少なくとも２つの異なる周波数のプローブ光を電気光学結晶に入射する構成により、周波数をシフトさせないかまたは１つのプローブ光を電気光学結晶に入射する構成では２点以上測定する必要がある位相情報を、リアルタイムに計測することが可能となる。

[0040] 本発明の実施の形態に係る電磁波測定方法は、電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、第１の光源からの光、および前記第１の光源と異なる周波数で発光する第２の光源からの光を前記電気光学プローブに与えるとともに、前記第１の光源および前記第２の光源のいずれか一方の周波数と、前記第１の

光源および前記第２の光源の他方の周波数をシフトした周波数との差の周波数を有する電磁波を前記電気光学プローブへ放射するか、または、前記第１の光源および前記第２の光源のいずれか一方からの光、および前記第１の光源および前記第２の光源の他方からの光の周波数をシフトした光を前記電気光学プローブに与えるとともに、前記第１の光源の周波数と前記第２の光源の周波数との差の周波数を有する電磁波を前記電気光学プローブへ放射するステップと、前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む。

[0041] これにより、電気光学結晶に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶の中で大きな電気光学効果を有する固有軸に揃えることができる。そして、固有軸の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波とプローブ光とが電気光学結晶中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学効果が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。また、周波数シフタすなわち光シフタにより少なくとも１つの光源からの出力光の周波数をシフトさせるとともに少なくとも２つの異なる周波数のプローブ光を電気光学結晶に入射する構成により、周波数をシフトさせないかまたは１つのプローブ光を電気光学結晶に入射する構成では２点以上測定する必要がある位相情報を、リアルタイムに計測することが可能となる。

[0042] 以下、本発明の実施の形態について図面を用いて説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は繰り返さない。また、以下に記載する実施の形態の少なくとも一部を任意に組み合わせてもよい。

[0043] ＜第１の実施の形態＞

図１は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の構成を示す図である。

[0044] 図１を参照して、電磁波測定装置２０１は、発光素子（光源）１，２と、光増幅器３，４と、光分岐器５，６と、光合波器７，８と、光シフタ９と、

光電磁波変換部１０と、発振器１１と、サーキュレータ１２と、光フィルタ１３と、受光素子１４と、振幅／位相検出器１５と、電気光学プローブ１０１とを備える。光電磁波変換部１０は、光電変換器２１と、アンテナ２２とを含む。

[0045] 電磁波測定装置２０１の各構成要素間の光伝送の少なくとも一部は、光ファイバ１６を用いて行われる。アンテナ２２は、たとえばホーンアンテナである。

[0046] 発光素子１は、周波数ｆ１で発光する。発光素子２は、周波数ｆ１とは異なる周波数ｆ２で発光する。周波数ｆ１および周波数ｆ２は、たとえば１．５μｍ帯の周波数である。また、周波数ｆ１および周波数ｆ２の差は、たとえばテラヘルツ帯の１２５ＧＨｚである。なお、周波数ｆ１および周波数ｆ２の差は、テラヘルツ帯以外の周波数帯であってもよく、たとえば、マイクロ波帯またはミリ波帯であってもよい。また、以下では、一例として、ｆ２＞ｆ１の場合について説明を行う。

[0047] 光増幅器３は、たとえばＥＤＦＡ（Ｅｒｂｉｕｍ Ｄｏｐｅｄ Ｆｉｂｅｒ Ａｍｐｌｉｆｉｅｒ）であり、発光素子１の出力光を増幅して光分岐器５へ出力する。

[0048] 光分岐器５は、光増幅器３から受けた光を分岐して光シフタ９および光合波器８へ出力する。

[0049] 光増幅器４は、たとえばＥＤＦＡであり、発光素子２の出力光を増幅して光分岐器６へ出力する。

[0050] 光分岐器６は、光増幅器４から受けた光を分岐して光合波器７および８へ出力する。

[0051] 光合波器８は、光分岐器５から受けた光および光分岐器６から受けた光を合波してサーキュレータ１２経由で電気光学プローブ１０１へ出力する。

[0052] 発振器１１は、周波数ｆｓの発振信号を生成して光シフタ９および振幅／位相検出器１５へ出力する。周波数ｆｓは、たとえば５００ｋＨｚである。

[0053] 光シフタ９は、発光素子１と光電磁波変換部１０との間の光伝送路上に設

けられ、受けた光の周波数をシフトして出力する。より詳細には、光シフタ９は、光分岐器５から受けた光を、発振器１１から受けた発振信号の周波数ｆｓシフトさせ、シフト後の光を光合波器７へ出力する。

[0054] 光合波器７は、光シフタ９から受けた光および光分岐器６から受けた光を合波して光電変換器２１へ出力する。

[0055] 光電磁波変換部１０は、発光素子１からの光および発光素子２からの光を受けて、受けた各光の周波数の差の周波数を有する被検出電磁波３６を生成して電気光学プローブ１０１へ放射する。

[0056] より詳細には、光電変換器２１は、たとえば受光素子を含み、光合波器７から受けた２種類の周波数の光から、これら２つの周波数の差の周波数成分を有する被検出電磁波３６を生成し、生成した被検出電磁波３６をアンテナ２２から測定対象へ照射する。

[0057] 電気光学プローブ１０１は、アンテナ２２に対向する位置等、アンテナ２２から照射された電磁波を受けることが可能な位置に配置される。すなわち、上記測定対象は、アンテナ２２と電気光学プローブ１０１との間に配置されてもよいし、アンテナ２２を含んでもよいし、アンテナ２２自体であってもよい。

[0058] 電気光学プローブ１０１は、被検出電磁波３６を検出する。より詳細には、サーキュレータ１２から電気光学プローブ１０１へ伝送された光は、電気光学プローブ１０１において、アンテナ２２からの被検出電磁波３６と相互作用され、かつ反射されてサーキュレータ１２へ出力され、サーキュレータ１２から光フィルタ１３へ出力される。

[0059] 光フィルタ１３は、サーキュレータ１２から受けた光の周波数成分のうち、たとえば所定の周波数帯域外の成分を減衰させる。

[0060] 受光素子１４は、光フィルタ１３を通過した光を電気信号に変換して振幅／位相検出器１５へ出力する。

[0061] 振幅／位相検出器１５は、発振器１１から受けた発振信号を用いて、受光素子１４から受けた電気信号の振幅および位相を検出し、検出した振幅およ

び位相を示す信号をそれぞれ出力する。

[0062] このように、電磁波測定装置２０１は、光技術を用いることにより、低周波から高周波にわたる広帯域において、たとえば電気光学プローブ１０１の位置を変更しながら電磁波計測を行うことにより電磁波の電界の空間分布を計測することができる。また、電界の振幅および位相をリアルタイムに計測することができる。

[0063] なお、光シフタ９は、光分岐器５と光合波器７との間に設けられる構成に限らず、光分岐器６と光合波器８との間、光分岐器５と光合波器８との間、または光分岐器６と光合波器７との間に設けられる構成であってもよい。

[0064] すなわち、光シフタ９は、発光素子１または発光素子２と光電磁波変換部１０または電気光学プローブ１０１との間に設けられ、受けた光の周波数をシフトして出力する。言い換えれば、光シフタ９は、発光素子１または発光素子２からの光の周波数をシフトして電気光学プローブ１０１または光電磁波変換部１０へ出力する。

[0065] また、電磁波測定装置２０１は、光シフタを１つ備える構成に限らず、たとえば２つ備える構成であってもよい。具体的には、たとえば、光シフタ９に加えて、他の光シフタが光分岐器６と光合波器８との間に設けられ、これらの光シフタの周波数のシフト方向が互いに反対方向に設定される構成であってもよい。また、電磁波測定装置２０１が光シフタを２つ以上備える場合、振幅／位相検出器１５に与える発振信号の周波数は、光シフタの位置およびシフト方向等に応じて適宜設定すればよい。

[0066] 図２は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の変形例の構成を示す図である。

[0067] 光増幅器３，４の位置は、図１に示す位置に限定されるものではない。具体的には、たとえば、図２を参照して、光増幅器３は、光合波器７と光電変換器２１との間に設けられている。また、光増幅器４は、光合波器８とサーキュレータ１２との間に設けられている。

[0068] 光分岐器５は、発光素子１の出力光を分岐して光シフタ９および光合波器

８へ出力する。光分岐器６は、発光素子２の出力光を分岐して光合波器７および８へ出力する。

[0069] 光合波器８は、光分岐器５から受けた光および光分岐器６から受けた光を合波して光増幅器４へ出力する。

[0070] 光増幅器４は、たとえばＥＤＦＡであり、光合波器８から受けた光を増幅してサーキュレータ１２経由で電気光学プローブ１０１へ出力する。

[0071] 光合波器７は、光シフタ９から受けた光および光分岐器６から受けた光を合波して光増幅器３へ出力する。

[0072] 光増幅器３は、たとえばＥＤＦＡであり、光合波器７から受けた光を増幅して光電変換器２１へ出力する。

[0073] また、光増幅器は、光の強度を増加させることが必要な場合に配置すればよく、電磁波測定装置２０１は、光増幅器３および４の少なくともいずれか一方を備えない構成であってもよい。また、電磁波測定装置２０１は、光フィルタ１３を備えない構成であってもよい。

[0074] 図３は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の変形例の構成を示す図である。

[0075] 図３を参照して、電磁波測定装置２０１の変形例は、図１に示す電磁波測定装置２０１と比べて、光増幅器３，４を備えない構成である。

[0076] 図４は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の測定原理を示す図である。

[0077] 図１および図４を参照して、電磁波測定装置２０１では、たとえばＣＷ（ｃｏｎｔｉｎｕｏｕｓ　ｗａｖｅ）を用いる。

[0078] より詳細には、ＲＦ（Ｒａｄｉｏ　Ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ）側すなわち被検出電磁波３６の系統において、光シフタ９によって周波数（ｆ１＋ｆｓ）の光が生成され、光電変換器２１は、光合波器７において合波された周波数（ｆ１＋ｆｓ）の光および周波数ｆ２の光を受ける（フェーズＰ１）。

[0079] 光電変換器２１は、光電変換（Ｏ／Ｅ）を行なう、より詳細には、受けた２種類の光の周波数の差の周波数成分、すなわちｆＴ＝ｆ２－ｆ１－ｆｓの

周波数を有する被検出電磁波３６を生成する（フェーズＰ２）。被検出電磁波３６は、電気光学プローブ１０１における電気光学結晶５２の方向に照射される（フェーズＰ１２）。

[0080] 一方、ＬＯ（Ｌｏｃａｌ）側すなわちプローブ光の系統において、光合波器８において合波された周波数ｆ１の光および周波数ｆ２の光は、プローブ光として、電気光学プローブ１０１における電気光学結晶５２へ伝送される（フェーズＰ１１，Ｐ１２）。

[0081] プローブ光の周波数ｆ１の成分および周波数ｆ２の成分は、それぞれ、被検出電磁波３６が照射された電気光学結晶５２内で変調され、変調サイドバンド、具体的には、ｆ１ｓ＝ｆ１＋ｆＴ＝ｆ２－ｆｓ、ｆ２ｓ＝ｆ２－ｆＴ＝ｆ１＋ｆｓ、ｆ１ｓｄ＝ｆ１－ｆＴ、およびｆ２ｓｄ＝ｆ２＋ｆＴの周波数成分の光が生成される（フェーズＰ１３）。生成されたこれらの光は、周波数ｆ１の光および周波数ｆ２のプローブ光とともに光フィルタ１３へ伝送される（フェーズＰ１４）。

[0082] 通過帯域Ｆを有する光フィルタ１３において、たとえば、周波数ｆ２のプローブ光と、周波数ｆ１ｓの変調サイドバンドの光とが取り出される（フェーズＰ１５）。

[0083] 光フィルタ１３において取り出された光は、受光素子１４へ伝送されて光電変換（Ｏ／Ｅ）が行われ、ｆ２－ｆ１ｓ＝ｆｓのＩＦ（Ｉｎｔｅｒｍｅｄｉａｔｅ　ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ）帯の電気信号が得られる（フェーズＰ２１）。

[0084] 具体的な数値の例で説明すると、電磁波測定装置２０１では、たとえば、発光素子１，２の周波数差を１２５ＧＨｚとし、発光素子１の出力光を２つに分けて、一方を光シフタ９に通し、光の周波数を５００ｋＨｚシフトさせる。その結果、光電変換器２１へ進む２つの光の周波数差は（１２５ＧＨｚ－５００ｋＨｚ）となる。

[0085] 一方、電気光学プローブ１０１へ進む２つのプローブ光の周波数差は１２５ＧＨｚとなる。

[0086] そして、電気光学プローブ１０１に対して被検出電磁波３６、すなわち光電変換器２１へ進む２つの光の周波数差（１２５ＧＨｚ－５００ｋＨｚ）の周波数成分を有する被検出電磁波３６を照射すると、電気光学結晶５２が有する電気光学効果により、２つのプローブ光にそれぞれ変調サイドバンドが生成される。

[0087] そして、光フィルタ１３を通過した光から、受光素子１４の出力として５００ｋＨｚの電気信号が得られる。

[0088] なお、通過帯域Ｆを有する光フィルタ１３において、たとえば、周波数ｆ１のプローブ光と、周波数ｆ２ｓ＝ｆ１＋ｆｓの変調サイドバンドの光とが取り出される構成であってもよい。

[0089] 図１を参照して、振幅／位相検出器１５は、たとえば、ミキサ、フィルタおよび位相シフタ等を有するロックインアンプであり、発振器１１から受けた周波数ｆｓの発振信号を用いて、受光素子１４から受けたＩＦ帯の電気信号からベースバンド帯の電気信号を生成し、ＩＦ帯の電気信号の振幅および位相を検出する、すなわち、変調サイドバンド成分の振幅および位相を検出する。

[0090] このように、電磁波測定装置２０１により、被検出電磁波３６の電界すなわち振幅および位相を計測することが可能となる。

[0091] ここで、電磁波測定において用いられる電気光学プローブの電気光学結晶として、自然複屈折を有しないＺｎＴｅ（テルル化亜鉛）等の電気光学結晶と比べて、大きな電気光学定数を有する種類が数多く存在する自然複屈折を有する電気光学結晶を用いることにより、検出感度を向上させる方法が考えられる。

[0092] しかしながら、特許文献１に記載の技術では、直線偏光の偏波面の角度を、電気光学結晶の２つの電気的主軸のうちいずれかの軸に対して略４５度に傾けることから、最大の電気光学効果が電気的主軸に存在している自然複屈折を持つ電気光学結晶を使用する場合、傾けた角度に応じて電気／光の変換効率が下がり、検出感度が低下する。

[0093] また、特許文献２に記載の技術は、プローブ光の偏波変調を応用した電界計測手法であり、自然複屈折を持つ電気光学結晶を使用する場合、電気光学結晶自身が持つ自然複屈折の外乱等による揺らぎが検出感度の揺らぎに直結するため、測定安定性が低下する。また、光ファイバにおいて伝搬中の偏波の変動も検出感度の変動を誘起し、測定安定性が低下する。これらの外乱由来の偏波変調を抑制するためには、偏波安定化システムを別途要することとなり、測定系が複雑かつ高価になる。

[0094] 上記のような問題点を解決するために、本願発明者らは、本発明の実施の形態に係る電磁波測定装置の一例として、偏波変調による電界計測を測定原理としない、上述のような、光フィルタおよび受光素子を用いる構成を採用し、自然複屈折を有する電気光学結晶を用いるという着想を得た。

[0095] ここで、本願発明者らは、以下のような実験を行った。

[0096] 図５および図６は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の比較例の測定結果の一例を示す図である。

[0097] 図５において、縦軸は振幅［ｍＶ］であり、横軸は時間［分］である。図６において、縦軸は位相［ｒａｄ］であり、横軸は時間［分］である。

[0098] 本測定では、上記のような着想に基づく比較例として、電磁波測定装置２０１の電気光学プローブ１０１における電気光学結晶の固有軸の方向と当該電気光学結晶へ入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向とのなす角を、特許文献１に記載の技術のように略４５度に設定した電磁波測定装置を使用した。また、振幅／位相検出器１５として、ロックイン周波数が１００ｋＨｚであり、かつロックイン時定数が３０ｍｓであるロックインアンプを使用した。図５に示す振幅は、被検出電磁波３６の振幅に比例している。

[0099] また、本測定では、有機非線形光学結晶であるＤＡＳＴ（４－Ｎ，Ｎ－ジメチルアミノ－４’－Ｎ’－メチル－スチルバゾリウムトシレート）を上記電気光学結晶として用いて、０．３１０ＴＨｚの被検出電磁波３６の電界を２分間計測した。そして、電磁波測定装置の使用環境として、屋外等、実験室環境ではないことを想定し、電気光学プローブ１０１周辺の温度を測定期

間において数度変化させた。

[0100] 図５および図６を参照して、グラフＧ１１およびＧ２１より、本来一定のはずであるアンテナ２２および電気光学プローブ１０１間の空間における０．３１０ＴＨｚの電界の振幅および位相の経時変化が、比較例の電気光学プローブ１０１により変動しており、検出感度の変動が確認された。

[0101] 具体的には、振幅は約１０００ｍＶ～約４５００ｍＶの範囲で大きく変動し、かつ、位相は少なくとも±πラジアンの範囲で大きく変動しており、不安定な特性が得られていることが分かる。特に、位相検出において、その不安定性が顕著である。

[0102] 本願発明者らは、この実験により、単に比較例のような構成では、温度等に起因する自然複屈折の揺らぎにより測定安定性が低下するという新規な課題を見出した。そして、本願発明者らは、電気光学プローブ１０１において以下のような構成を採用することにより、上記課題を解決できることを発見した。

[0103] 図７は、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブの構成を概略的に示す斜視図である。図８は、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブの図７におけるＶＩＩＩ－ＶＩＩＩ線に沿った断面を示す断面図である。

[0104] 図７および図８を参照して、電気光学プローブ１０１は、反射部５１と、電気光学結晶５２と、レンズ５３と、光ファイバ１６とを含む。

[0105] 電気光学結晶５２と光ファイバ１６とがレンズ５３を介して光学的に結合されている。より詳細には、電気光学結晶５２の端部とレンズ５３の端部とが光学的に結合されており、当該端部と反対側のレンズ５３の端部と光ファイバ１６の端部とが光学的に結合されている。光ファイバ１６は、たとえば偏波保持ファイバ（ＰＭＦ）である。レンズ５３は、たとえばＧＲＩＮ（Ｇｒａｄｉｅｎｔ　Ｉｎｄｅｘ）レンズである。

[0106] 反射部５１は、電気光学結晶５２のレンズ５３と反対側の端部において、電気光学結晶５２と光学的に結合されている。反射部５１は、たとえばＨＲ

（Ｈｉｇｈ　Ｒｅｆｌｅｃｔｏｒ）コーティングの施された全反射ミラーである。

[0107]　電気光学結晶５２の形状は、たとえば四角柱状であり、レンズ５３の形状は、たとえば円柱状である。

[0108]　光ファイバ１６によって伝送される光、具体的には、たとえば光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１すなわちスロー軸またはファスト軸と偏波面とが一致した直線偏光は、図８の点線９１で示すように、レンズ５３によって平行光となって電気光学結晶５２へ進入し、アンテナ２２からの被検出電磁波３６と相互作用され、かつ反射部５１によって反射される。反射された光は、レンズ５３へ進入して集光され、光ファイバ１６へ戻る。

[0109]　ここで、電気光学結晶５２の固有軸の方向と光ファイバ１６の固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0110]　より詳細には、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２、および光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１すなわち固有軸Ｄ１は、ｘ軸方向に対して、すなわち、光の進行方向（ｚ軸）に対して垂直な同じ方向に沿っている。つまり、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向と光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１とが沿うように、たとえば同一方向になるように、電気光学プローブ１０１におけるレンズ５３と光ファイバ１６とが接続されている。電気光学結晶５２における上記直線偏光の偏波面は、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２と略平行になる。

[0111]　ここで、固有軸Ｄ２は、たとえば、電気光学結晶５２におけるプローブ光の伝搬方向に対応する固有の偏波方向である。一般に、複屈折性の結晶中を単一方向に伝搬する光は、互いに直交する直線偏波状態の波すなわち２つの固有波の線形結合からなる。たとえば異方性の結晶の場合、各モードは固有の偏波方向および屈折率を有する。

[0112]　また、好ましくは、固有軸Ｄ２は、電気光学結晶５２の複数の固有軸のうち、最大の電気光学効果が得られる軸であり、一例として、電気光学結晶５２の主軸である。たとえばＤＡＳＴでは、主軸であるｘ軸、ｙ軸およびｚ軸

のうち、最大の電気光学効果が得られる主軸はｘ軸である。より詳細には、最大の電気光学効果が得られる軸は、たとえば、最大の性能指数ｎ＾３×ｒが得られる軸である。ただし、ｎは屈折率であり、ｒは電気光学定数である。

[0113] また、本願明細書におけるＤＡＳＴを用いた各実験では、固有軸Ｄ２の方向と光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１の１つであるスロー軸とが沿う状態として、ＤＡＳＴのａ軸と光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１とが沿う状態で測定を行った。ＤＡＳＴでは、ａ軸は、たとえばＤＡＳＴの主軸（ｄｉｅｌｅｃｔｒｉｃ ｐｒｉｎｃｉｐａｌ ａｘｉｓ）の１つであるｘ軸に対して５．４°ずれている。

[0114] なお、電気光学プローブ１０１は、レンズ５３を備えない構成であってもよい。また、電気光学結晶５２とレンズ５３との間に、距離調整等のためのガラス板等の部材が設けられてもよい。また、電気光学プローブ１０１は、反射部５１を備えない構成であってもよく、たとえば、ＨＲコーティングが施された電気光学結晶５２を備える構成であってもよい。

[0115] 図９は、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブの変形例の図７におけるＶＩＩＩ－ＶＩＩＩ線に沿った断面を示す断面図である。以下で説明する内容以外は図８で説明した内容と同様である。

[0116] 図９を参照して、レンズ５３は、図８に示すようなコリメートレンズに限らず、たとえば集光レンズであってもよい。

[0117] 光ファイバ１６によって伝送される光、具体的には、たとえば光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１すなわちスロー軸またはファスト軸と偏波面とが一致した直線偏光は、図９の点線９２で示すように、レンズ５３によって集光されながら電気光学結晶５２へ進入し、アンテナ２２からの被検出電磁波３６と相互作用され、かつ反射部５１によって反射される。反射された光は、レンズ５３へ進入して集光され、光ファイバ１６へ戻る。

[0118] なお、ここでは、説明を簡単にするために、電気光学結晶５２の１つの固有軸Ｄ２を示したが、たとえば、電気光学結晶５２は、固有軸Ｄ２に直交す

る、すなわちｙ軸に沿う固有軸を有する。また、たとえば、光ファイバ１６も、固有偏波方向Ｄ１に直交する、すなわちｙ軸に沿う固有偏波方向を有する。

[0119] 好ましくは、電気光学結晶５２は、自然複屈折を有する結晶である。具体的には、電気光学結晶５２は、たとえば、ＬｉＴａＯ３（タンタル酸リチウム）、ＬｉＮｂＯ３（ニオブ酸リチウム）、ＢａＴａＯ３（チタン酸バリウム）、ＳＢＮ（ニオブ酸ストロンチウムバリウム）、およびＺＧＰ（リン化亜鉛ゲルマニウム）等の自然複屈折を有する無機結晶である。

[0120] あるいは、電気光学結晶５２は、たとえば、ＤＡＳＴ（４－Ｎ，Ｎ－ジメチルアミノ－４’－Ｎ’－メチル－スチルバゾリウムトシレート）、ＤＡＳＣ（４－Ｎ，Ｎ－ジメチルアミノ－４’－Ｎ’－メチル－スチルバゾリウム－パラ－クロロベンゼンスルホネート）、ＤＳＴＭＳ（４－Ｎ，Ｎ－ジメチルアミノ－４’－Ｎ’－メチル－スチルバゾリウム２，４，６－トリメチルトルエンスルホネート）、およびＯＨ１（２－（３－（４－ヒドロキシスチリル）－５，５－ジメチルシクロヘクス－２－エニリデン）マロノニトリル）等の自然複屈折を有する有機非線形光学結晶である。

[0121] なお、電気光学結晶５２は、たとえば、ＧａＰ（リン化ガリウム）、ＧａＡｓ（ヒ化ガリウム）、ＩｎＰ（リン化インジウム）、ＺｎＴｅ（テルル化亜鉛）およびＣｄＴｅ（テルル化カドミウム）等の自然複屈折を有しない無機結晶であってもよいし、または、自然複屈折を有しない有機結晶であってもよい。

[0122] 図１０は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置を用いた電磁波測定方法の手順を示す図である。

[0123] 図１０を参照して、まず、発光素子１，２を用いて、異なる２種類の周波数ｆ１，ｆ２の光をそれぞれ出力する（ステップＳ１）。

[0124] 次に、発光素子１からの光、および発光素子１と異なる周波数で発光する発光素子２からの光を電気光学プローブ１０１に与えるとともに、発光素子１および発光素子２のいずれか一方の周波数と、発光素子１および発光素子

２の他方の周波数をシフトした周波数との差の周波数を有する被検出電磁波３６を電気光学プローブ１０１へ放射する。あるいは、発光素子１および発光素子２のいずれか一方からの光、および発光素子１および発光素子２の他方からの光の周波数をシフトした光を電気光学プローブ１０１に与えるとともに、発光素子１の周波数と発光素子２の周波数との差の周波数を有する被検出電磁波３６を電気光学プローブ１０１へ放射する。

[0125] 具体的には、光電変換器２１および電気光学プローブ１０１の一方に周波数ｆ１，ｆ２の光を与え、他方に周波数ｆ１およびｆ２の一方をシフトした光、および他方の光を与える。そして、光電変換器２１に与えられた２つの光の周波数差を有する被検出電磁波３６がアンテナ２２から放射される（ステップＳ２）。

[0126] 次に、電気光学プローブ１０１から出力される光に基づいて被検出電磁波３６を測定する。具体的には、光電変換器２１からアンテナ２２経由で出力される被検出電磁波３６を、電気光学プローブ１０１から光ファイバ１６経由で出力される光に基づいて計測する（ステップＳ３）。

[0127] ここで、本願発明者らは、電磁波測定装置２０１を用いて、以下のような検証を行った。

[0128] 図１１および図１２は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置およびその比較例１の測定結果の一例を示す図である。図の見方は図５および図６とそれぞれ同様である。

[0129] 図１１において、グラフＧ１１は電磁波測定装置２０１の比較例１の振幅を示し、グラフＧ１２は電磁波測定装置２０１の振幅を示す。図１２において、グラフＧ２１は電磁波測定装置２０１の比較例１の位相を示し、グラフＧ２２は電磁波測定装置２０１の位相を示す。

[0130] 本測定では、電磁波測定装置２０１として、電気光学プローブ１０１における電気光学結晶の固有軸の方向と当該電気光学結晶へ入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向とのなす角を略０度に設定した電磁波測定装置を使用した。また、振幅／位相検出器１５として、ロックイン周波数が１００

ｋＨｚであり、かつロックイン時定数が３０ｍｓであるロックインアンプを使用した。

[0131] また、本測定では、有機非線形光学結晶であるＤＡＳＴを上記電気光学結晶として用いて、電磁波測定装置２０１およびその比較例１の各電気光学プローブ１０１を並べて配置し、０．３１０ＴＨｚの被検出電磁波３６の電界を２分間計測した。そして、電磁波測定装置の使用環境として、屋外等、実験室環境ではないことを想定し、各電気光学プローブ１０１周辺の温度を測定期間において数度変化させた。上述の図５および図６は、本測定における比較例１の測定結果のみを示した図である。すなわち、図１１および図１２におけるグラフＧ１１およびＧ２１は、図５および図６におけるグラフＧ１１およびＧ２１とそれぞれ同じである。

[0132] 図１１および図１２を参照して、グラフＧ１２およびＧ２２より、電磁波測定装置２０１において、アンテナ２２および電気光学プローブ１０１間の空間における０．３１０ＴＨｚの電界の振幅および位相の経時変化が安定しており、電気光学プローブ１０１による検出感度の安定が確認された。

[0133] 具体的には、振幅は約１４００ｍＶ～約３２００ｍＶの範囲であり、位相は約－１．７ラジアン～約－１．０ラジアンの範囲であり、比較例１に対して、振幅検出および位相検出の安定性における顕著な性能向上が達成されたことが分かる。

[0134] また、電気光学プローブ１０１周辺の温度が測定期間において変化するような制御を行っていない状況において、電磁波測定装置２０１およびその比較例１における振幅／位相検出器１５の出力信号を用いてＳ／Ｎ比を求め、比較したところ、比較例１に対して電磁波測定装置２０１のＳ／Ｎ比が３ｄＢ大きい結果が得られた。このように、電磁波測定装置２０１の感度は、比較例１に対して３ｄＢ向上しており、測定対象となる電磁波のパワーは、たとえばミリ波、テラヘルツ波と高周波になるにつれて劇的に小さくなることから、３ｄＢの感度向上は、このような周波数帯において顕著な進歩であると言える。

[0135] 図１３は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置の測定結果の一例を示す図である。図１３は、０．１２４９９９５ＴＨｚの被検出電磁波３６の電界を計測した結果を示している。

[0136] 図１３において、縦軸は振幅［ａｒｂ．ｕ．］および位相［ｒａｄ］であり、横軸は時間［秒］である。縦軸の振幅は、正規化された値である。グラフＧ１は振幅を示し、グラフＧ２は位相を示す。

[0137] 本測定では、有機非線形光学結晶であるＤＡＳＴを電気光学結晶５２として用いて、０．１２４９９９５ＴＨｚの被検出電磁波３６の電界を６０秒間計測した。なお、本測定では、電気光学プローブ１０１周辺の温度が測定期間において変化するような制御は行っていない。

[0138] 図１３を参照して、グラフＧ１およびＧ２より、アンテナ２２および電気光学プローブ１０１間の空間における０．１２４９９９５ＴＨｚの電界の振幅および位相の経時変化を、リアルタイムに、すなわち並行して計測できていることが分かる。

[0139] 具体的には、計測結果として、振幅は略１．０と一定であり、また、位相は－０．２．～０．１ラジアンの範囲であり、変動の少ない安定した結果が得られていることが分かる。

[0140] 図１４は、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置およびその比較例２の測定結果の一例を示す図である。

[0141] 図１４において、縦軸は振幅［ａｒｂ．ｕ．］および位相［ｒａｄ］であり、横軸は時間［秒］である。縦軸の振幅は、正規化された値である。

[0142] また、グラフＧ３１は電磁波測定装置２０１の比較例２の振幅を示し、グラフＧ３２は電磁波測定装置２０１の振幅を示し、グラフＧ４１は比較例２の位相を示し、グラフＧ４２は電磁波測定装置２０１の位相を示す。

[0143] 本測定では、電磁波測定装置２０１において、ＤＡＳＴを電気光学結晶５２として用いた。また、この電磁波測定装置２０１に対する比較例２として、ＺｎＴｅ（テルル化亜鉛）を電気光学結晶として用い、かつ電気光学プローブ１０１における電気光学結晶の固有軸の方向と当該電気光学結晶へ入射

される光ファイバ１６からの光の偏波方向とのなす角を、特許文献１に記載の技術のように略４５度に設定した電磁波測定装置を使用した。ここで、比較例２における電気光学結晶の固有軸は、ＺｎＴｅに電界を印加した状態におけるＺｎＴｅの主軸である。また、振幅／位相検出器１５として、ロックイン周波数が１００ｋＨｚであり、かつロックイン時定数が３０ｍｓであるロックインアンプを使用した。

[0144] 本測定では、０．１２４９９９５ＴＨｚの被検出電磁波３６の電界を６０秒間計測した。なお、本測定では、電気光学プローブ１０１周辺の温度が測定期間において変化するような制御は行っていない。

[0145] グラフＧ４１，Ｇ４２を参照して、比較例２および電磁波測定装置２０１における位相の検出特性はほぼ同等である。

[0146] 一方、グラフＧ３１，Ｇ３２を参照して、比較例２における振幅は約１．０であり、電磁波測定装置２０１における振幅は約９．０である。すなわち、電磁波測定装置２０１では、測定安定性が顕著に向上し、自然複屈折を有する電気光学効果の大きいＤＡＳＴが使用可能となった結果、比較例２に対して振幅検出感度が約９倍に向上したことが分かる。これは、Ｓ／Ｎ比に換算すると１９ｄＢの向上に相当する。

[0147] なお、光ファイバ１６は、偏波保持ファイバに限らず、たとえばシングルモードファイバまたはマルチモードファイバであってもよい。この場合、シングルモードファイバまたはマルチモードファイバは、光の偏波方向すなわち偏波面を安定させるために、何らかの固定部材等によって位置が固定されることが好ましい。

[0148] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置では、特許文献３に記載の技術と同様に、光シフタ９を用いたいわゆるセルフヘテロダイン技術を利用しているが、これに限定するものではなく、ホモダイン技術等、他の方法を用いてもよい。

[0149] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置では、２つのプローブ光を電気光学プローブ１０１に与える構成であるとしたが、これに限定

するものではなく、３つ以上のプローブ光を電気光学プローブ１０１に与える構成であってもよい。また、電気光学プローブ１０１は、１つのプローブ光を与えるような電磁波測定装置において用いられてもよい。

[0150] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置では、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向と光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１とが沿うように設けられている構成であるとしたが、これに限定するものではない。電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿っている構成であればよく、たとえば、光ファイバ１６の固有偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿っておらず、光ファイバ１６と電気光学結晶５２との間に、光ファイバ１６からのプローブ光の偏波方向を電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿うように制御する偏波制御素子が設けられる構成であってもよい。

[0151] また、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿っている構成は、たとえば、検出感度のピーク値の１／２以上となる構成に相当し、好ましくは、検出感度のピーク値の３／４以上となる構成に相当する。検出感度のピーク値が得られる構成は、一例として、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向と一致する構成である。

[0152] ところで、特許文献１～３に記載の技術を超えて、電磁波を良好に測定可能な技術が望まれる。

[0153] 具体的には、たとえば、特許文献１に記載の技術では、直線偏光の偏波面の角度を、電気光学結晶の２つの電気的主軸のうちいずれかの軸に対して略４５度に傾けることから、たとえば最大の電気光学効果が電気的主軸に存在している自然複屈折を持つ電気光学結晶を使用する場合、傾けた角度に応じて電気／光の変換効率が下がり、検出感度が低下する。

[0154] また、たとえば、特許文献２に記載の技術は、プローブ光の偏波変調を応用した電界計測手法であり、たとえば自然複屈折を持つ電気光学結晶を使用

する場合、電気光学結晶自身が持つ自然複屈折の外乱等による揺らぎが検出感度の揺らぎに直結するため、測定安定性が低下する。また、光ファイバにおいて伝搬中の偏波の変動も検出感度の変動を誘起し、測定安定性が低下する。これらの外乱由来の偏波変調を抑制するためには、偏波安定化システムを別途要することとなり、測定系が複雑かつ高価になる。

[0155] これに対して、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブでは、光ファイバ１６は、電気光学結晶５２と光学的に結合されている。そして、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸の方向に沿うように設けられている。

[0156] このような構成により、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶５２の中で大きな電気光学効果を有する固有軸Ｄ２に揃えることができる。そして、固有軸Ｄ２の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波３６とプローブ光とが電気光学結晶５２中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学効果が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。

[0157] したがって、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブでは、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0158] また、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブでは、電気光学結晶５２は、自然複屈折を有する。

[0159] このように、大きな電気光学定数を有する種類が数多く存在する自然複屈折を有する電気光学結晶５２を用いる構成により、複屈折の影響の除去による測定の安定性向上の効果を得ながら、検出感度をより向上させることができる。

[0160] また、特許文献１および２に記載の技術では、プローブ光の偏光状態が、温度等に起因する自然複屈折の揺らぎによって大きく変動し、この変動が検出感度の揺らぎに大きく影響を及ぼす。

[0161] これに対して、偏波変調による電界計測を測定原理としていない、具体的には、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を電気光学結晶

５２の固有軸Ｄ２に揃える構成により、温度揺らぎに起因する変調効率の変動が非常に小さいことから、外乱の影響を受けにくい状態を実現し、被検出電磁波３６の振幅および位相を安定して計測することができる。

[0162] また、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブでは、電気光学結晶５２は、有機非線形光学結晶である。

[0163] このように、たとえば無機光学結晶と比べて大きな電気光学効果が得られる場合の多い有機非線形光学結晶を電気光学結晶５２として用いる構成により、検出感度をより向上させることができる。

[0164] また、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブでは、電気光学結晶５２は、ＤＡＳＴ、ＤＡＳＣ、ＤＳＴＭＳまたはＯＨ１である。

[0165] このように、特に電気光学定数の大きい有機非線形光学結晶を電気光学結晶５２として用いる構成により、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２に揃えることで自然複屈折率の揺らぎを抑えながら、検出感度を大幅に向上させることができる。

[0166] また、本発明の第１の実施の形態に係る電気光学プローブでは、光ファイバ１６は、偏波保持ファイバである。そして、電気光学結晶５２の固有軸の方向と光ファイバ１６の固有偏波方向とが沿うように設けられている。

[0167] このような構成により、光ファイバ１６を伝搬する光の偏波方向の乱れを抑制し、また、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２に光ファイバ１６の固有偏波方向Ｄ１をより確実かつ容易に揃えることができる。また、光ファイバ１６において光の偏波方向を制御する構成により、光ファイバ１６と電気光学結晶５２との間に、光ファイバ１６からのプローブ光の偏波方向を電気光学結晶５２の固有軸の方向に沿うように制御する偏波制御素子等を設ける必要がなくなる。

[0168] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置では、発光素子２は、発光素子１と異なる周波数で発光する。電気光学プローブ１０１は、発光素子１からの光および発光素子２からの光を受ける。光電磁波変換部１０は、発光素子１からの光および発光素子２からの光を受けて、受けた各光の

周波数の差の周波数を有する被検出電磁波３６を生成して電気光学プローブ１０１へ放射する。光シフタ９は、発光素子１または発光素子２と光電磁波変換部１０または電気光学プローブ１０１との間に設けられ、受けた光の周波数をシフトして出力する。そして、電気光学プローブ１０１において、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸の方向に沿うように設けられている。

[0169] このような構成により、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶５２の中で大きな電気光学定数を有する固有軸Ｄ２に揃えることができる。そして、固有軸Ｄ２の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波３６とプローブ光とが電気光学結晶５２中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学定数が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。

[0170] したがって、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置では、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0171] また、周波数シフタすなわち光シフタ９により少なくとも１つの光源からの出力光の周波数をシフトさせるとともに少なくとも２つの異なる周波数のプローブ光を電気光学結晶５２に入射する構成により、周波数をシフトさせないかまたは１つのプローブ光を電気光学結晶５２に入射する構成では２点以上測定する必要がある位相情報を、リアルタイムに計測することが可能となる。

[0172] より詳細には、少なくとも１つの光源から発光する光の周波数を光シフタ９によりシフトさせる構成により、光電磁波変換部１０により生成された電磁波の周波数と、電気光学プローブ１０１に入射させる異なる２つの光の周波数差との間に、周波数差を与えることができ、これにより、振幅および位相の情報を同時に取得することが可能となる。なお、この周波数差を与えない場合、すなわち光シフタ９を使用しない場合は、振幅および位相を同時に決定することはできず、２つ以上の測定値が必要となる。

[0173] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定方法では、まず、発光

素子１からの光、および発光素子１と異なる周波数で発光する発光素子２からの光を電気光学プローブ１０１に与えるとともに、発光素子１および発光素子２のいずれか一方の周波数と、発光素子１および発光素子２の他方の周波数をシフトした周波数との差の周波数を有する被検出電磁波３６を電気光学プローブ１０１へ放射するか、または、発光素子１および発光素子２のいずれか一方からの光、および発光素子１および発光素子２の他方からの光の周波数をシフトした光を電気光学プローブ１０１に与えるとともに、発光素子１の周波数と発光素子２の周波数との差の周波数を有する被検出電磁波３６を電気光学プローブ１０１へ放射する。次に、電気光学プローブ１０１から出力される光に基づいて被検出電磁波３６を測定する。そして、電気光学プローブ１０１において、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸の方向に沿うように設けられている。

[0174] これにより、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶５２の中で大きな電気光学定数を有する固有軸Ｄ２に揃えることができる。そして、固有軸Ｄ２の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波３６とプローブ光とが電気光学結晶５２中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学定数が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。

[0175] したがって、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定方法では、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0176] また、周波数シフタすなわち光シフタ９により少なくとも１つの光源からの出力光の周波数をシフトさせるとともに少なくとも２つの異なる周波数のプローブ光を電気光学結晶５２に入射する構成により、周波数をシフトさせないかまたは１つのプローブ光を電気光学結晶５２に入射する構成では２点以上測定する必要がある位相情報を、リアルタイムに計測することが可能となる。

[0177] より詳細には、少なくとも１つの光源から発光する光の周波数を光シフタ

９によりシフトさせる構成により、光電磁波変換部１０により生成された電磁波の周波数と、電気光学プローブ１０１に入射させる異なる２つの光の周波数差との間に、周波数差を与えることができ、これにより、振幅および位相の情報を同時に取得することが可能となる。なお、この周波数差を与えない場合、すなわち光シフタ９を使用しない場合は、振幅および位相を同時に決定することはできず、２つ以上の測定値が必要となる。

[0178] 次に、本発明の他の実施の形態について図面を用いて説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は繰り返さない。

[0179] ＜第２の実施の形態＞

本実施の形態は、第１の実施の形態に係る電磁波測定装置と比べてセルフヘテロダインとは異なる方式を採用した電磁波測定装置に関する。以下で説明する内容以外は第１の実施の形態に係る電磁波測定装置と同様である。

[0180] 図１５は、本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置の構成を示す図である。

[0181] 図１５を参照して、電磁波測定装置２０２は、電気光学プローブ１０１と、発光素子（光源）３１と、光位相変調器３２，３３と、シフタ３４と、発振器３５と、サーキュレータ３７と、光フィルタ３８と、受光素子（ＰＤ）３９とを備える。

[0182] 電磁波測定装置２０２では、電磁波測定装置２０１と異なり、被検出電磁波３６とプローブ光とが同期しない非同期計測を行う。たとえば、周波数ｆＥＭの被検出電磁波３６が発振器４０によって生成され、ホーンアンテナ等のアンテナ４１から電気光学プローブ１０１へ放射される。

[0183] 光位相変調器３２は、発光素子３１から受けた種光を、発振器３５から受けた周波数ｆｍの発振信号により位相変調して出力する。

[0184] シフタ３４は、発振器３５から受けた発振信号の位相をシフトして光位相変調器３３へ出力する。

[0185] 光位相変調器３３は、光位相変調器３２から受けた光を、シフタ３４から受けた発振信号により位相変調して出力する。

[0186] サーキュレータ３７経由で電気光学プローブ１０１へ伝送された光位相変調器３３からの光は、電気光学プローブ１０１において、被検出電磁波３６と相互作用され、かつ反射されてサーキュレータ３７へ出力され、サーキュレータ３７から光フィルタ３８へ出力される。

[0187] 図１６は、本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置におけるプローブ光および電気光学結晶による変調サイドバンドの一例を示す図である。

[0188] 図１６を参照して、光周波数コム、具体的には周波数ｆｍの間隔で並ぶ単一周波数の光で構成される変調サイドバンド群が、光位相変調器３３からプローブ光としてサーキュレータ３７へ出力される。

[0189] サーキュレータ３７は、光位相変調器３３からこのような光周波数コムを受けて、電気光学プローブ１０１へ出力する。

[0190] 電気光学プローブ１０１では、周波数ｆＥＭの被検出電磁波３６とサーキュレータ３７からの光周波数コムの各成分との相互作用により、各成分について新たにサイドバンド成分が生じる。なお、図１６では、注目すべき１つのサイドバンドの光である周波数ｆ１ｓ＝（ｆ１＋ｆＥＭ）の成分のみを示している。

[0191] 光フィルタ３８は、サーキュレータ３７から受けた光の周波数成分のうち、たとえば所定の周波数帯域外の成分を減衰させる。より詳細には、光フィルタ３８は、たとえば、サーキュレータ３７から受けた光のうち、電気光学プローブ１０１において生成された１つのサイドバンドの光、およびサーキュレータ３７が受ける光周波数コムの任意の成分を選択するバンドパスフィルタである。ここでは、光フィルタ３８は、周波数（ｆ１＋ｆＥＭ）の光および周波数ｆ２の光を出力するものとする。ただし、ｆＥＭ≠ｆ２－ｆ１の関係が成り立つ。

[0192] 受光素子３９は、光フィルタ３８を通過した光を電気信号に変換してロックインアンプ等の図示しない検出器へ出力する。

[0193] 図１７は、本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置の測定結果の一例を示す図である。図１７は、受光素子３９の出力信号をスペクトラムア

ナライザで測定した結果を示している。

[0194] 図１７において、縦軸は信号強度であり、１目盛が１０ｄＢである。横軸は周波数であり、１目盛が１００Ｈｚである。

[0195] 本測定では、発光素子３１から出力される種光の波長を１５５０ｎｍとし、発振器３５から出力される発振信号の周波数ｆｍを１２．６ＧＨｚとし、被検出電磁波３６の周波数ｆＥＭを７５．６０１７７ＧＨｚとした。

[0196] すなわち、図１６に示すように、ｆＥＭ＜（ｆ２－ｆ１）＝６×ｆｍに設定した。この場合、電気光学プローブ１０１において生成された１つのサイドバンドの光である周波数ｆ１ｓ＝（ｆ１＋ｆＥＭ）の光、およびサーキュレータ３７が受ける光周波数コムにおける周波数ｆ２の成分の周波数差は、１２．６ＧＨｚ×６－７５．６０１７７ＧＨｚ＝１．７７ＭＨｚとなる。

[0197] 受光素子３９から出力されるＩＦ信号、すなわち周波数ｆ１ｓの光および周波数ｆ２の光間におけるヘテロダイン検出の結果生じるＩＦ帯の電気信号は、被検出電磁波３６の振幅および位相の情報を含んでいる。

[0198] 図１７を参照して、受光素子３９の出力信号において、マーカ１として周波数１．７６９０３５ＭＨｚおよび振幅－３４．６４ｄＢｍの成分が得られており、電磁波測定装置２０２を用いて高感度かつ安定に、７５．６０１７７ＧＨｚの電磁波を計測できたことが分かる。

[0199] なお、電磁波測定装置２０２では、２つの光位相変調器を用いて光周波数コムを生成する構成であるとしたが、これに限定するものではなく、たとえば、モード同期レーザを用いる構成であってもよいし、位相変調器および強度変調器を用いる構成であってもよいし、１つの位相変調器を用いる構成であってもよいし、１つの強度変調器を用いる構成であってもよい。

[0200] また、電磁波測定装置２０２では、光周波数コムを生成する構成であるとしたが、これに限定するものではない。たとえば周波数ｆ１およびｆ２の光を非同期に生成する２つの光源を用いる構成であってもよい。

[0201] その他の構成および動作は第１の実施の形態に係る電磁波測定装置と同様であるため、ここでは詳細な説明を繰り返さない。

[0202] なお、本発明の第１の実施の形態および第２の実施の形態に係る電磁波測定装置では、プローブ光として複数の周波数の光を用いる構成であるとしたが、これに限定するものではない。電気光学プローブ１０１は、プローブ光として単一の周波数の光を用いる電磁波測定装置に適用することも可能である。

[0203] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置および本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置における検出器は、被検出電磁波３６の振幅および位相を計測する構成であるとしたが、これに限定するものではない。検出器は、被検出電磁波３６の振幅および位相のいずれか一方を計測する構成であってもよい。また、検出器は、たとえば、被検出電磁波３６の周波数、その一例として周波数ゆらぎを計測する構成であってもよい。具体的には、検出器は、たとえば、スペクトラムアナライザ、オシロスコープ、周波数カウンタまたはパーソナルコンピュータであってもよい。

[0204] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置は、被検出電磁波３６を計測する検出器を備える構成であるとしたが、これに限定するものではなく、検出器を備えず、外付けの検出器が用いられる構成であってもよい。すなわち、受光素子１４，３９の出力する電気信号が、電磁波測定装置２０１，２０２による被検出電磁波３６の計測結果を示している。

[0205] また、本発明の第１の実施の形態に係る電磁波測定装置および本発明の第２の実施の形態に係る電磁波測定装置では、被検出電磁波３６が電気光学プローブ１０１に放射される構成であるとしたが、これに限定するものではない。電磁波測定装置は、被検出電磁波３６が電気光学プローブ１０１に与えられる構成であればよく、たとえば、電磁波が発生する空間に電気光学プローブ１０１を配置することにより、被検出電磁波３６が電気光学プローブ１０１に与えられる構成であってもよい。

[0206] 以上のように、本発明の第１の実施の形態および第２の実施の形態に係る電磁波測定装置では、電気光学プローブ１０１は、光源からの光、および被検出電磁波３６を受ける。光フィルタは、電気光学プローブ１０１から出力

された光を受ける。受光素子は、光フィルタを通過した光を電気信号に変換する。

[0207] このような構成により、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶５２の中で大きな電気光学定数を有する固有軸Ｄ２に揃えることができる。そして、固有軸Ｄ２の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波３６とプローブ光とが電気光学結晶５２中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学定数が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。

[0208] したがって、本発明の第１の実施の形態および第２の実施の形態に係る電磁波測定装置では、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0209] また、本発明の第１の実施の形態および第２の実施の形態に係る電磁波測定方法では、まず、光源からの光を電気光学プローブ１０１に与えるとともに、被検出電磁波３６を電気光学プローブ１０１に光ファイバ１６経由で与える。次に、電気光学プローブ１０１から光ファイバ１６経由で出力される光に基づいて被検出電磁波３６を測定する。

[0210] これにより、電気光学結晶５２に入射されるプローブ光の偏波方向を、電気光学結晶５２の中で大きな電気光学定数を有する固有軸Ｄ２に揃えることができる。そして、固有軸Ｄ２の方向に沿った偏波方向のプローブ光を用いて、被検出電磁波３６とプローブ光とが電気光学結晶５２中で相互作用する構成により、たとえば、電気光学定数が大きいことよる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。

[0211] したがって、本発明の第１の実施の形態および第２の実施の形態に係る電磁波測定方法では、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0212] なお、本発明の第１の実施の形態および第２の実施の形態に係る電気光学プローブは、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿うように設けられている構

成であるとしたが、これに限定するものではない。

[0213] 電磁波測定装置は、以下のような構成であってもよい。すなわち、一例として、図１５に示す電磁波測定装置２０２において、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向と光ファイバ１６のスロー軸等の固有偏波方向Ｄ１とが沿うように設けられている電気光学プローブ１０１を用いる。そして、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向と電気光学結晶５２へ入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向とのなす角をたとえば略４５度に設定し、電気光学プローブ１０１と受光素子３９との間に接続される偏光ビームスプリッタ等の偏光分離素子を設ける。たとえば、偏光分離素子は、光フィルタ３８と受光素子３９との間に接続され、光フィルタ３８を通過した光から、電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿った偏波方向の成分とこれに直交する偏波方向の成分とを分離して受光素子３９へ出力する。なお、偏光分離素子は、光フィルタ３８の前段に設けられてもよい。

[0214] このような構成により、たとえば、本発明の実施の形態に係る電磁波測定装置および電磁波測定方法において、電気光学結晶５２に入射される光ファイバ１６からの光の偏波方向が電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向に沿っていない場合でも、たとえば、偏波分離素子等を用いて電気光学結晶５２の固有軸Ｄ２の方向の偏波成分を分離して取り出すことができる。これにより、たとえば、電気光学効果が大きいことによる検出感度の最大化、すなわち高感度な電界計測を実現することができる。したがって、電気光学結晶を用いて電磁波を良好に測定することができる。

[0215] 上記実施の形態は、すべ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る。本発明の範囲は、上記説明ではなく請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

符号の説明

[0216] １，２　発光素子（光源）

３，４　光増幅器

５，６　光分岐器

７，８　光合波器

９　光シフタ

１０　光電磁波変換部

１１　発振器

１２　サーキュレータ

１３　光フィルタ

１４　受光素子

１５　振幅／位相検出器

１６　光ファイバ

２１　光電変換器

２２　アンテナ

３１　発光素子（光源）

３２，３３　光位相変調器

３４　シフタ

３５，４０　発振器

３７，６１　サーキュレータ

３８，６２　光フィルタ

３９，６３　受光素子

４１　アンテナ

５１　反射部

５２　電気光学結晶

５３　レンズ

１０１　電気光学プローブ

２０１，２０２　電磁波測定装置

Ｄ１　固有偏波方向，固有軸

Ｄ２　固有軸

請求の範囲

[請求項1] 電磁波を検出するための電気光学プローブであって、

電気光学結晶と、

前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、

前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている、電気光学プローブ。

[請求項2] 前記電気光学結晶は、自然複屈折を有する、請求の範囲第１項に記載の電気光学プローブ。

[請求項3] 前記電気光学結晶は、有機非線形光学結晶である、請求の範囲第１項または第２項に記載の電気光学プローブ。

[請求項4] 前記電気光学結晶は、ＤＡＳＴ（４－Ｎ，Ｎ－ｄｉｍｅｔｈｙｌａｍｉｎｏ－４’－Ｎ’－ｍｅｔｈｙｌ－ｓｔｉｌｂａｚｏｌｉｕｍ ｔｏｓｙｌａｔｅ）、ＤＡＳＣ（４－Ｎ，Ｎ－ｄｉｍｅｔｈｙｌａｍｉｎｏ－４’－Ｎ’－ｍｅｔｈｙｌ－ｓｔｉｌｂａｚｏｌｉｕｍ ｐ－ｃｈｌｏｒｏｂｅｎｚｅｎｅｓｕｌｆｏｎａｔｅ）、ＤＳＴＭＳ（４－Ｎ，Ｎ－ｄｉｍｅｔｈｙｌａｍｉｎｏ－４’－Ｎ’－ｍｅｔｈｙｌ－ｓｔｉｌｂａｚｏｌｉｕｍ ２，４，６－ｔｒｉｍｅｔｈｙｌｂｅｎｚｅｎｅｓｕｌｆｏｎａｔｅ）またはＯＨ１（２－（３－（４－Ｈｙｄｒｏｘｙｓｔｙｒｙｌ）－５，５－ｄｉｍｅｔｈｙｌｃｙｃｌｏｈｅｘ－２－ｅｎｙｌｉｄｅｎｅ）ｍａｌｏｎｏｎｉｔｒｉｌｅ）である、請求の範囲第３項に記載の電気光学プローブ。

[請求項5] 前記光ファイバは、偏波保持ファイバであり、

前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている、請求の範囲第１項から第４項のいずれか１項に記載の電気光学プローブ。

[請求項6] 電磁波を検出するための電気光学プローブであって、

電気光学結晶と、

前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、

前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている、電気光学プローブ。

[請求項7] 光源と、

前記光源からの光、および電磁波を受ける電気光学プローブと、

前記電気光学プローブから出力された光を受ける光フィルタと、

前記光フィルタを通過した光を電気信号に変換する受光素子とを備え、

前記電気光学プローブは、

電気光学結晶と、

前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、

前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている、電磁波測定装置。

[請求項8] 光源と、

前記光源からの光、および電磁波を受ける電気光学プローブと、

前記電気光学プローブから出力された光を受ける光フィルタと、

前記光フィルタを通過した光を電気信号に変換する受光素子とを備え、

前記電気光学プローブは、

電気光学結晶と、

前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、

前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている、電磁波測定装置。

[請求項9] 電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記電気光学結晶へ入射される前記光ファイバからの光の偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、

光源からの光を前記電気光学プローブに与えるとともに、電磁波を前記電気光学プローブに与えるステップと、

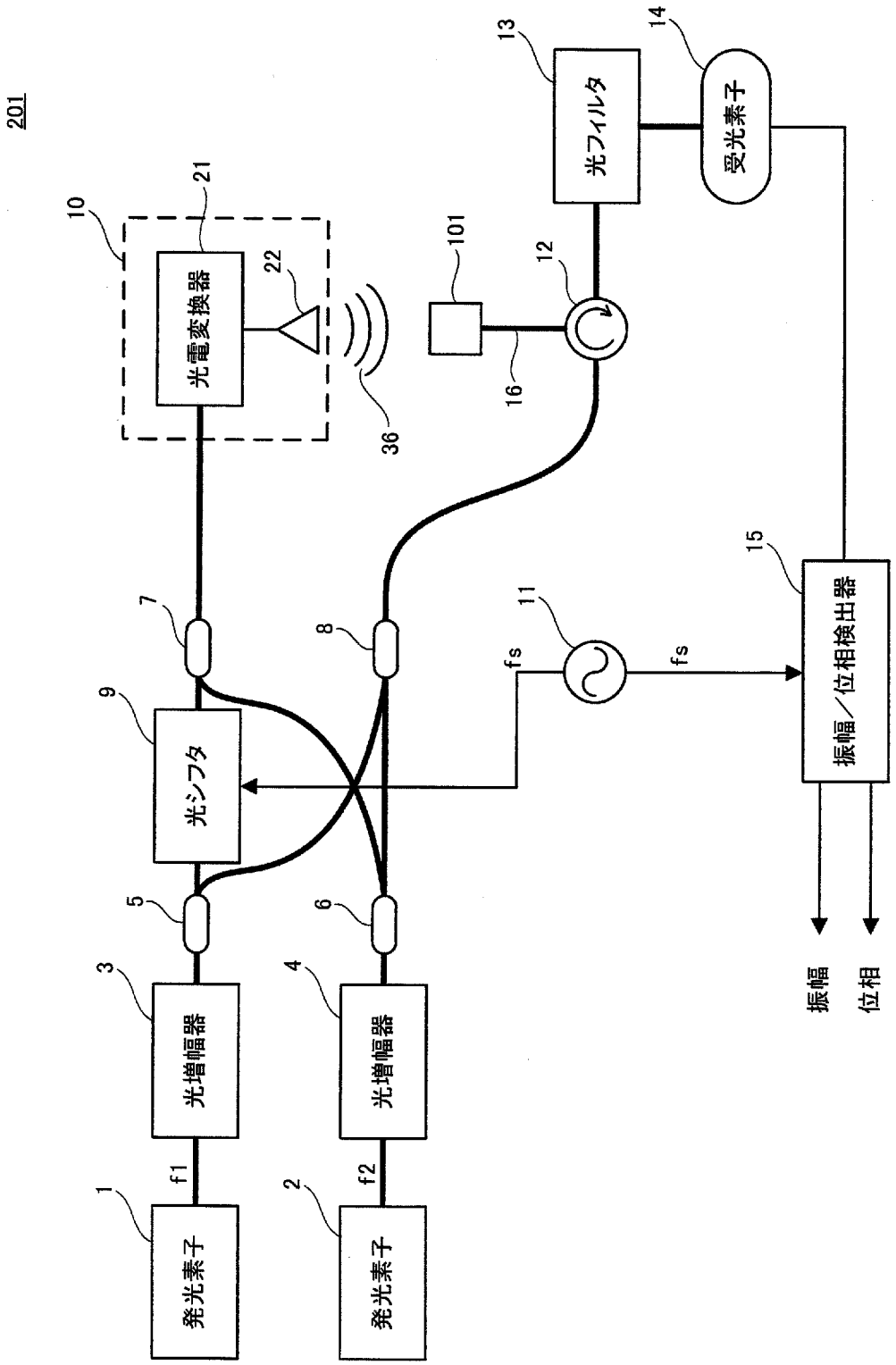
前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む、電磁波測定方法。

[請求項10] 電気光学結晶と、前記電気光学結晶と光学的に結合された光ファイバとを備え、前記電気光学結晶の固有軸の方向と前記光ファイバの固有偏波方向とが沿うように設けられている電気光学プローブを用いる電磁波測定方法であって、

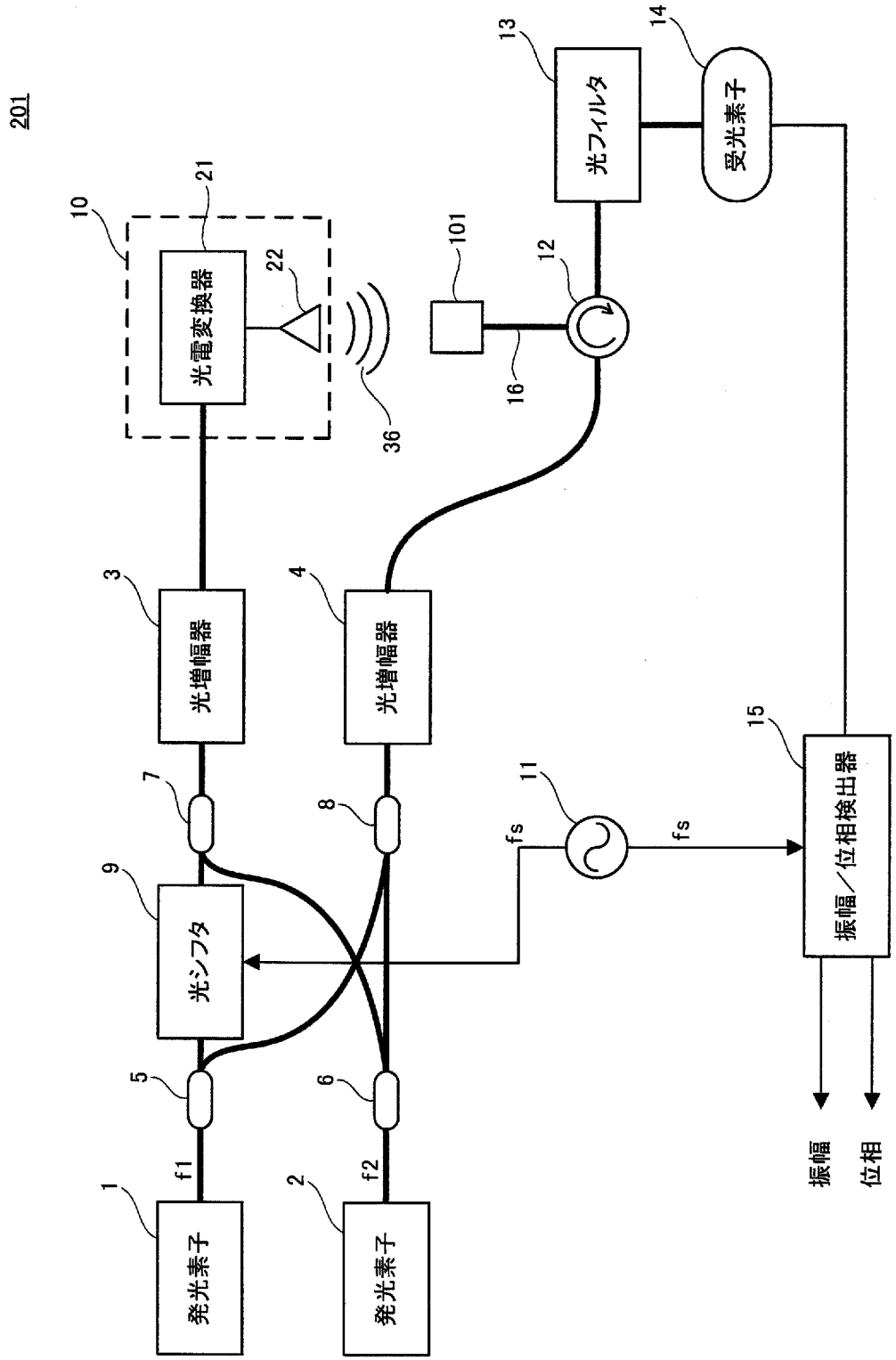
光源からの光を前記電気光学プローブに与えるとともに、電磁波を前記電気光学プローブに与えるステップと、

前記電気光学プローブから出力される光に基づいて前記電磁波を測定するステップとを含む、電磁波測定方法。

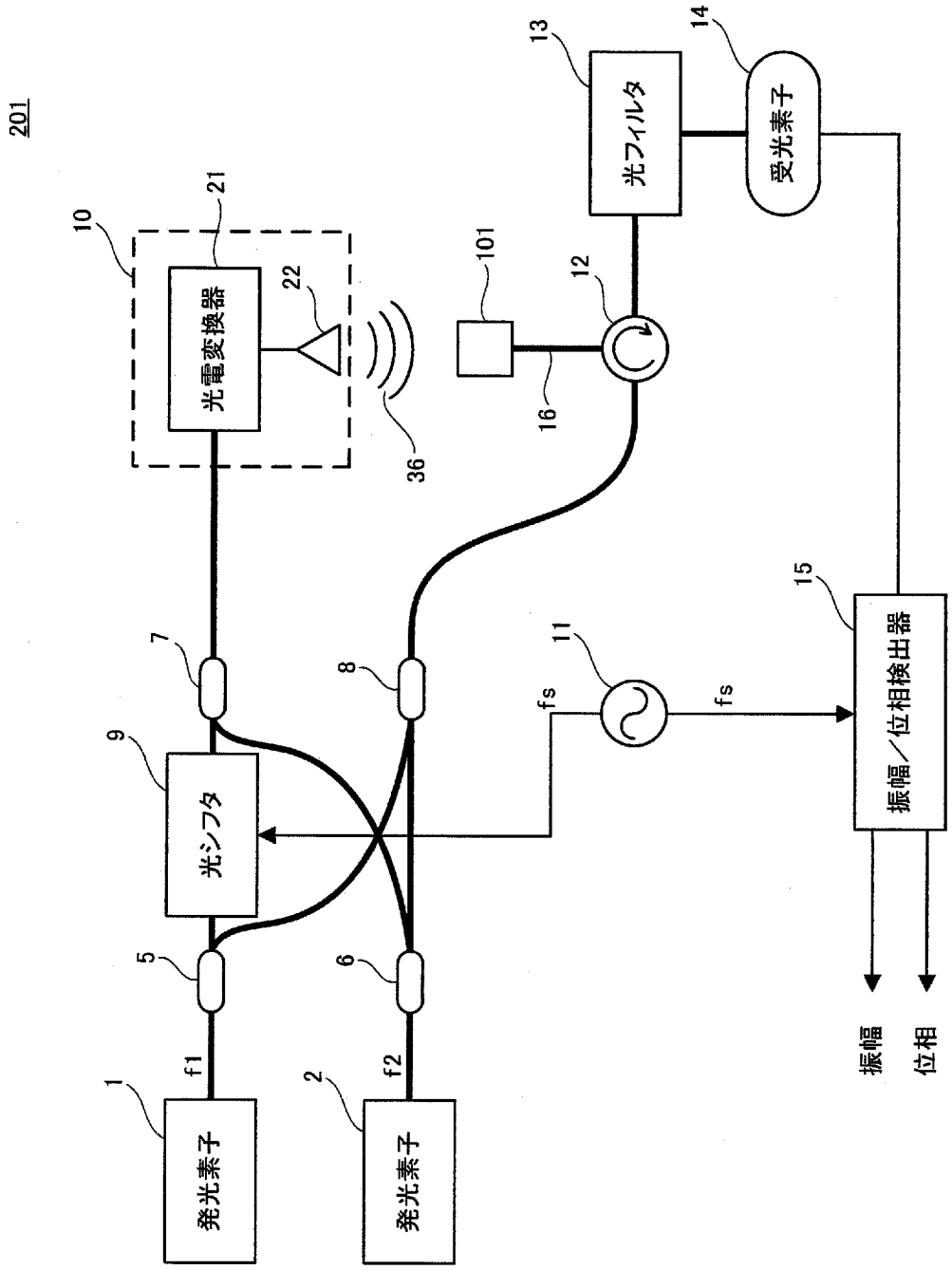
[図1]


201
10
21
光電変換器
22
36
101
16
12
13
光フィルタ
14
受光素子
7
8
9
光シフタ
11
fs
fs
15
振幅／位相検出器
5
6
3
光増幅器
4
光増幅器
f1
f2
1
発光素子
2
発光素子
振幅
位相

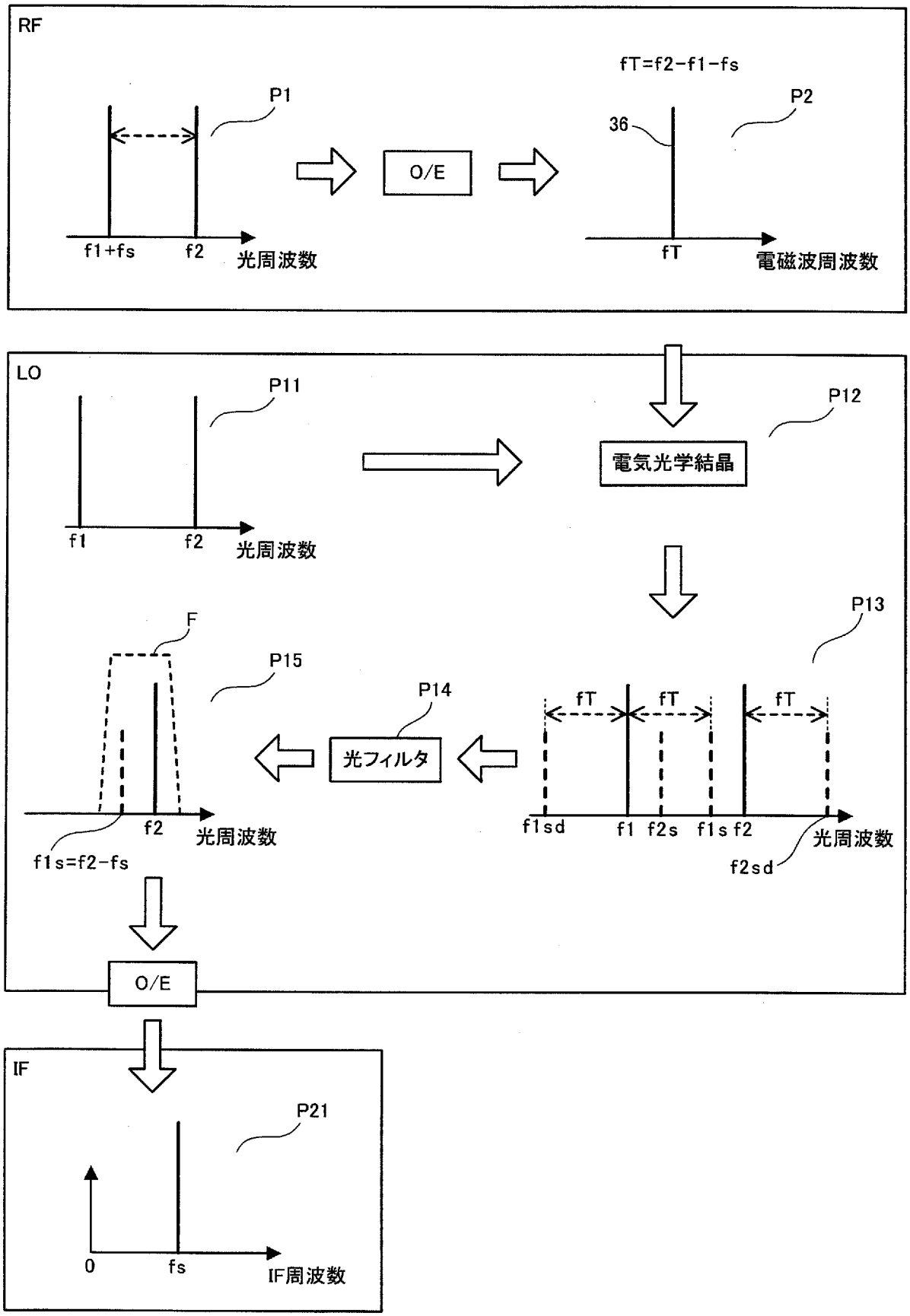
[図2]


201
10
21
光電変換器
22
36
101
12
16
13
光フィルタ
14
受光素子
3
光増幅器
4
光増幅器
7
8
9
光シフタ
5
6
f1
f2
1
発光素子
2
発光素子
11
fs
fs
15
振幅／位相検出器
振幅
位相

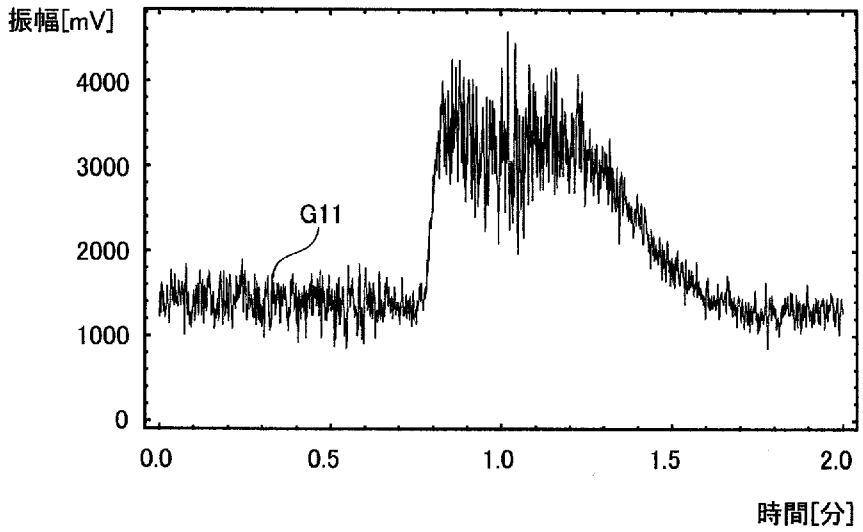
[図3]


201
10
21
光電変換器
22
36
101
16
12
13
光フィルタ
14
受光素子
7
8
9
光シフタ
11
fs
fs
15
振幅／位相検出器
5
6
f1
f2
1
発光素子
2
発光素子
振幅
位相

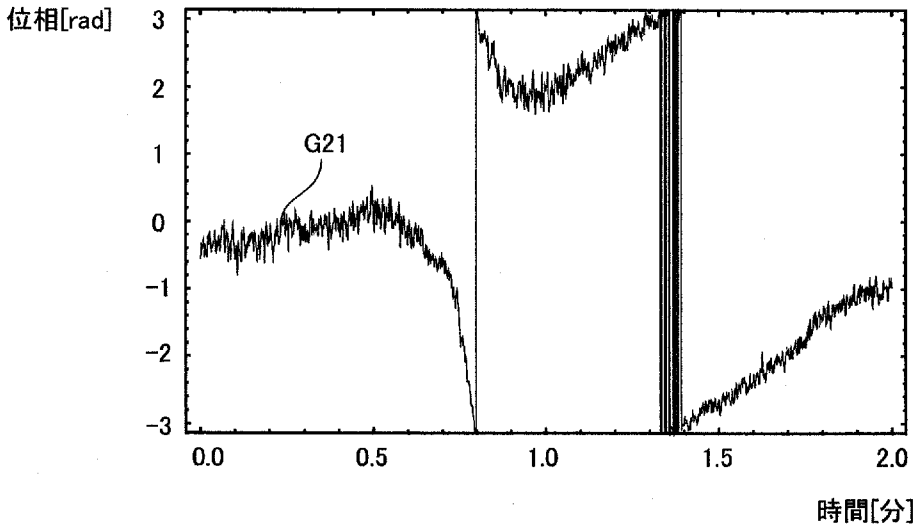
[図4]


RF
P1
f1+fs
f2
光周波数
O/E
fT=f2−f1−fs
P2
36
fT
電磁波周波数
LO
P11
f1
f2
光周波数
P12
電気光学結晶
P13
fT
fT
fT
f1sd
f1
f2s
f1s
f2
光周波数
f2sd
P14
光フィルタ
F
P15
f2
光周波数
f1s=f2−fs
O/E
IF
P21
0
fs
IF周波数

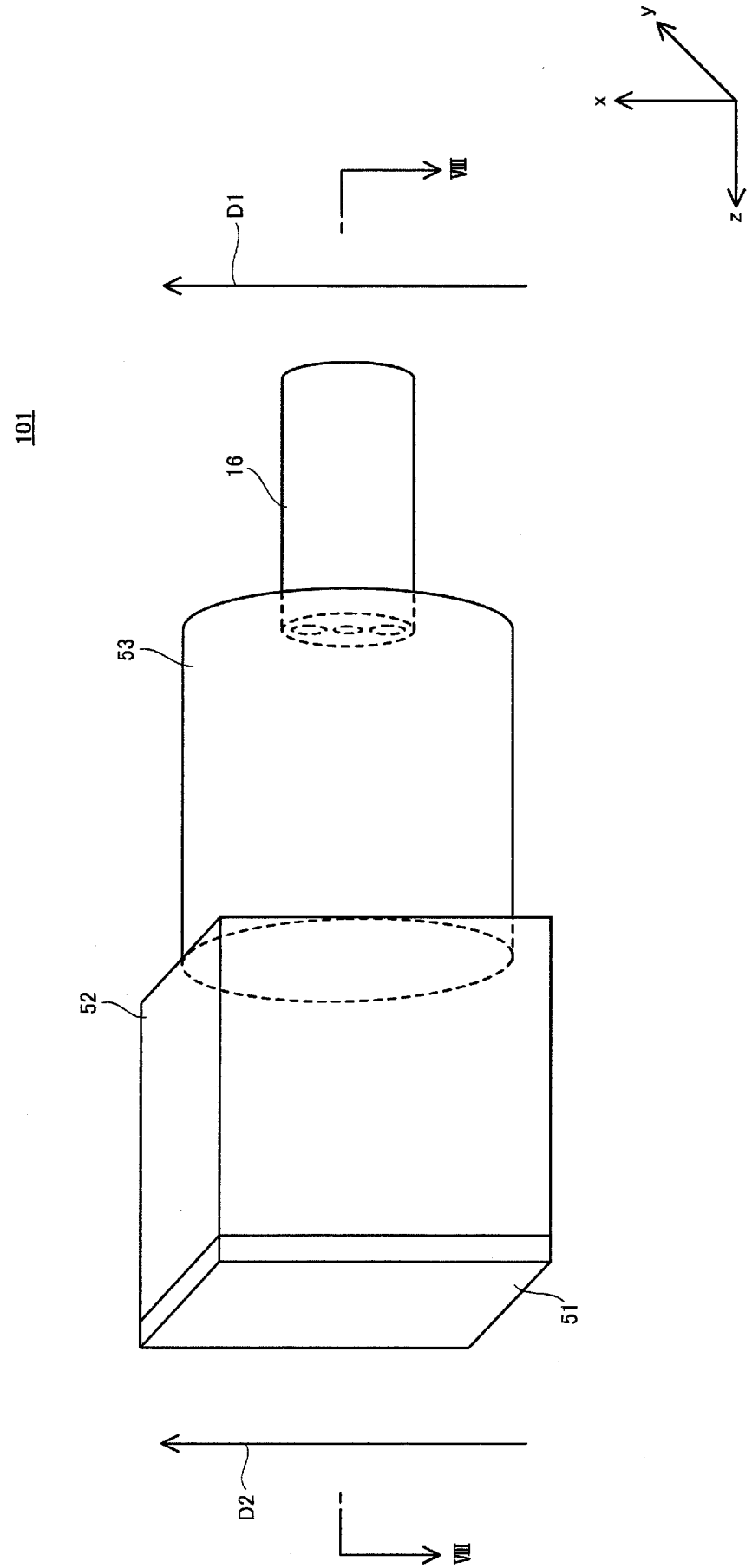
[図5]


振幅[mV]
4000
3000
2000
1000
0
G11
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
時間[分]

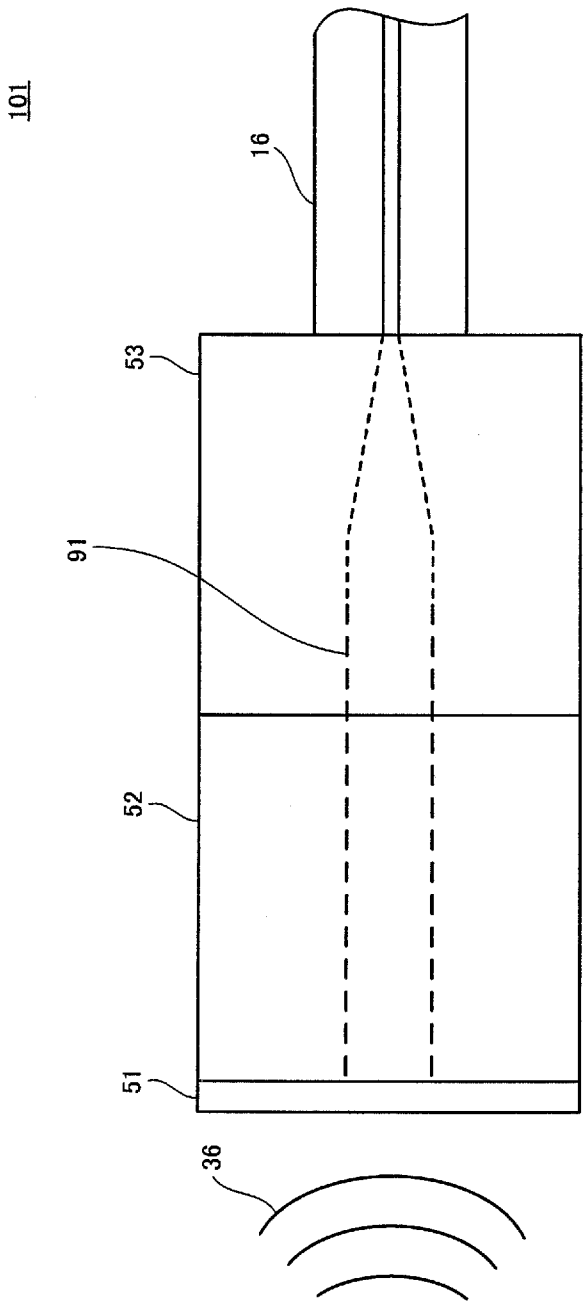
[図6]


位相[rad]
3
2
1
0
−1
−2
−3
G21
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
時間[分]

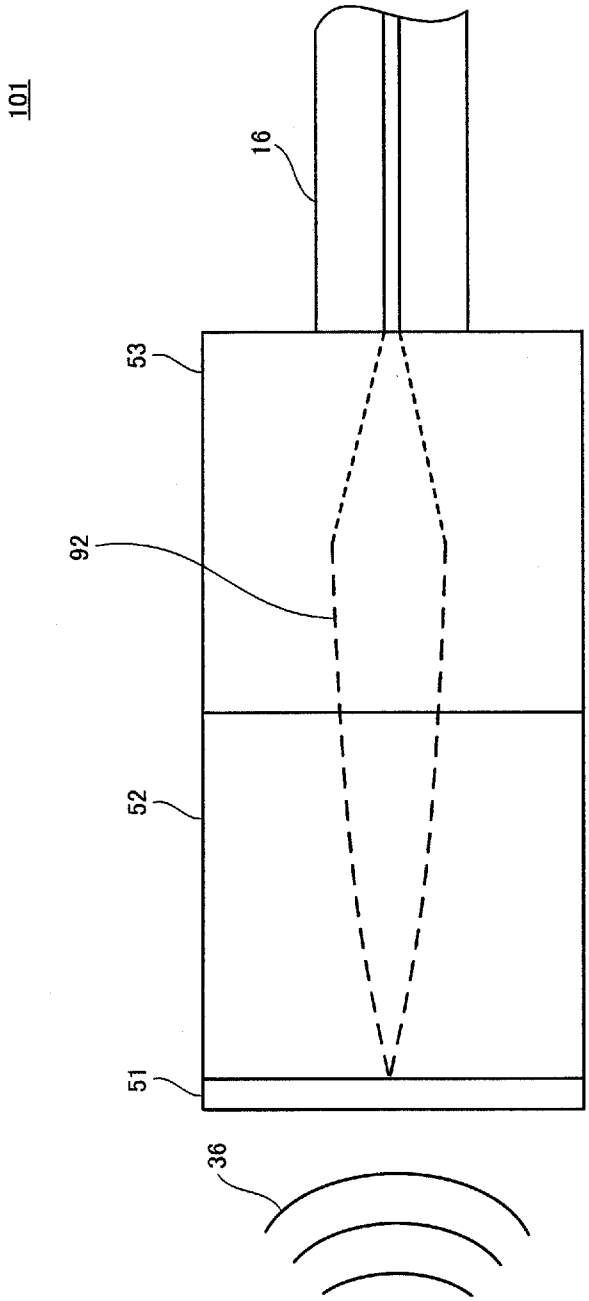
[図7]



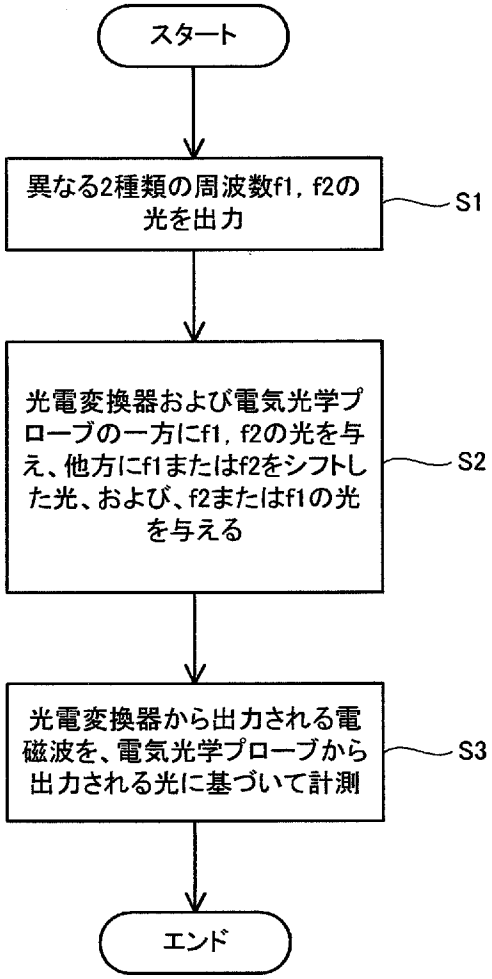
[図8]



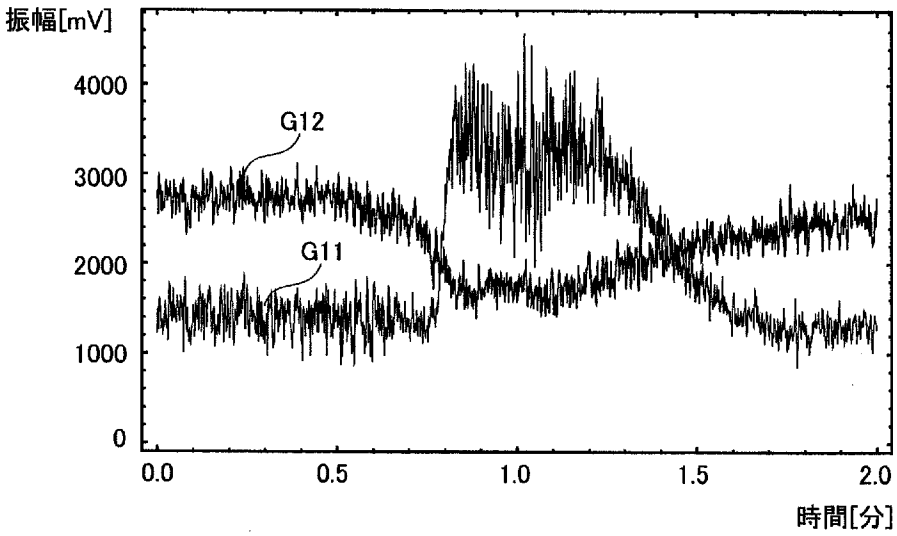
[図9]



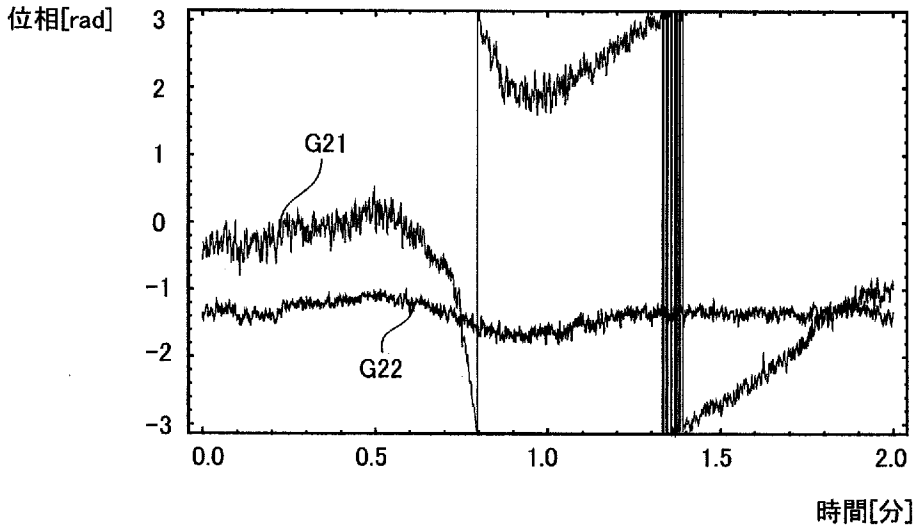
[図10]


スタート
異なる2種類の周波数f1, f2の光を出力
S1
光電変換器および電気光学プローブの一方にf1, f2の光を与え、他方にf1またはf2をシフトした光、および、f2またはf1の光を与える
S2
光電変換器から出力される電磁波を、電気光学プローブから出力される光に基づいて計測
S3
エンド

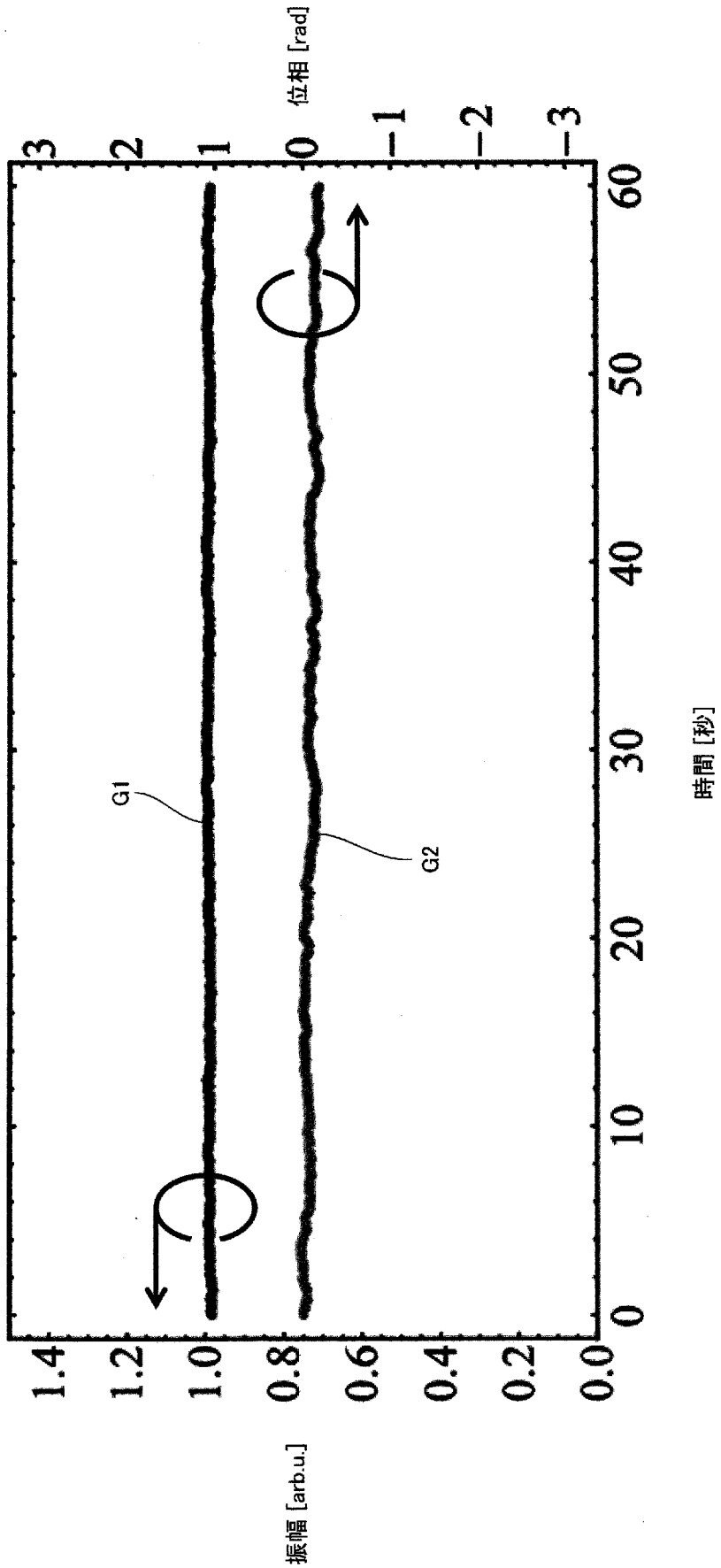
[図11]


振幅[mV]
4000
3000
2000
1000
0
G12
G11
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
時間[分]

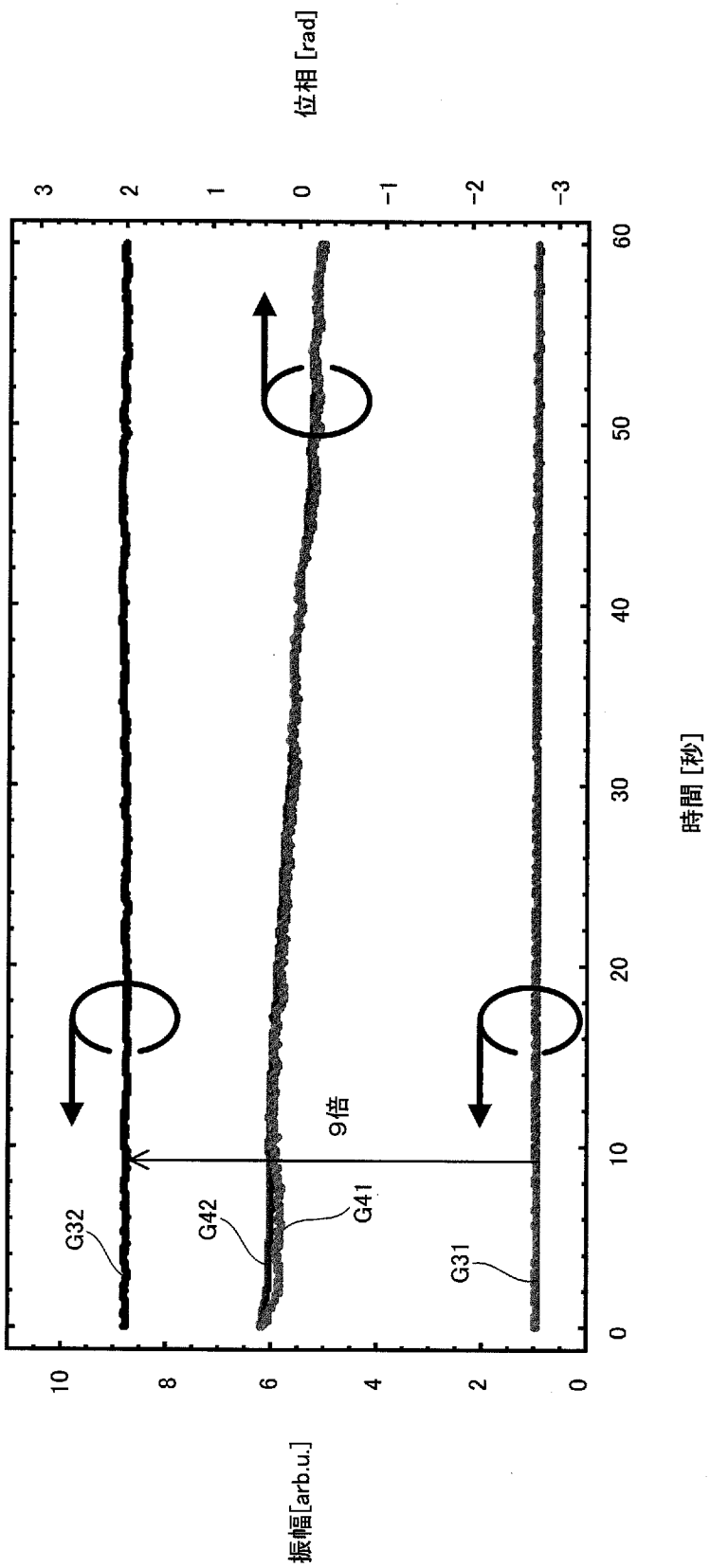
[図12]



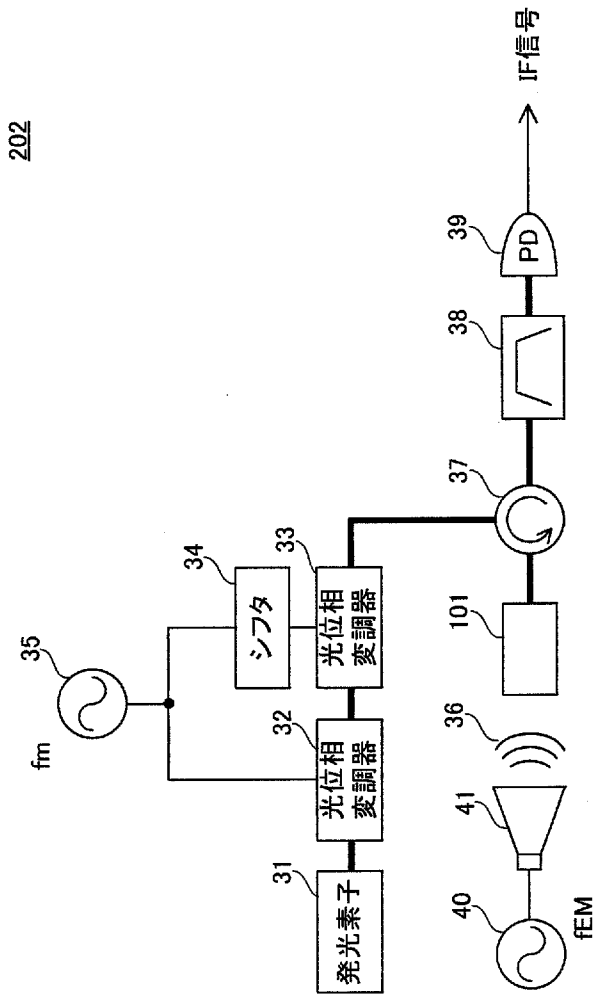
[図13]


位相 [rad]
3
2
1
0
−1
−2
−3
G1
G2
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
振幅 [arb.u.]
0
10
20
30
40
50
60
時間 [秒]

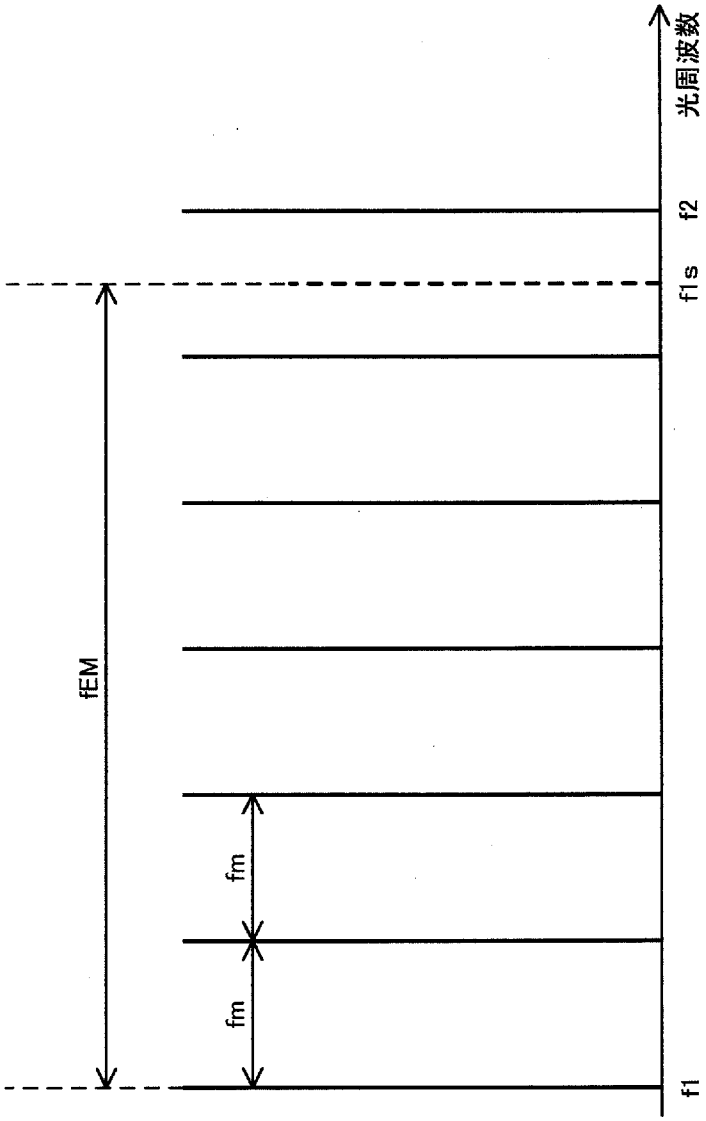
[図14]


位相 [rad]
3
2
1
0
−1
−2
−3
振幅[arb.u.]
10
8
6
4
2
0
0
10
20
30
40
50
60
時間 [秒]
G32
G42
G41
G31
9倍

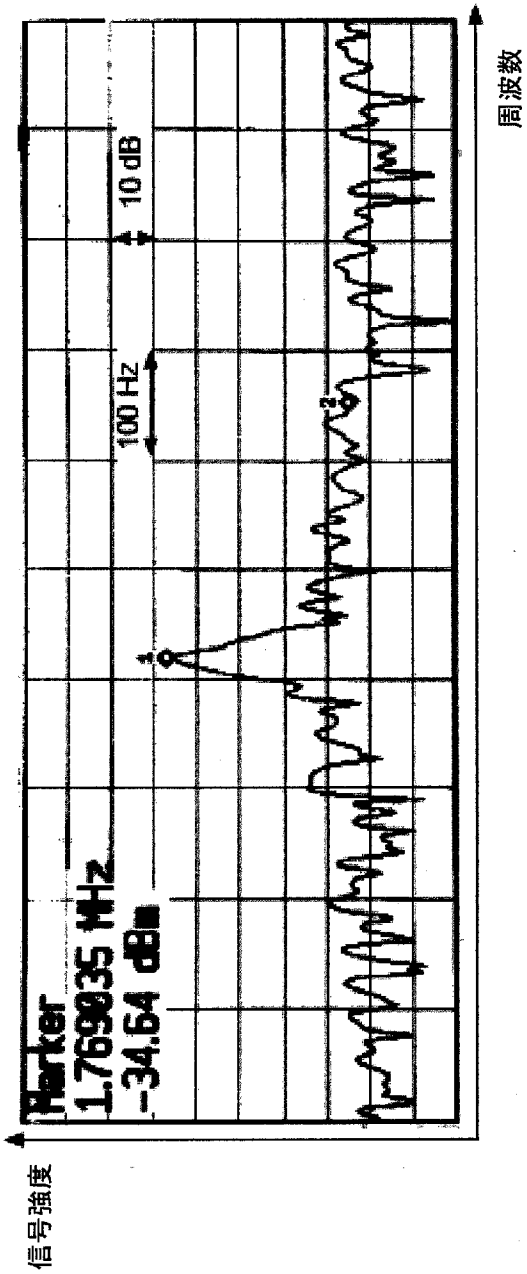
[図15]


202
35
fm
34
シフタ
33
光位相変調器
32
光位相変調器
31
発光素子
101
37
38
39
PD
IF信号
36
41
40
fEM

[図16]



[図17]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2016/069076

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01R29/08(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)
G01R29/08, G01N21/35

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	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2005-201819 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 28 July 2005 (28.07.2005), paragraphs [0001], [0009] to [0013], [0021] to [0054]; fig. 1, 2, 4, 5 (Family: none)	1-2,6-10 3-5
Y	JP 2009-25053 A (Panasonic Corp.), 05 February 2009 (05.02.2009), paragraphs [0001], [0053] to [0100]; fig. 3 (Family: none)	3-5

☐ 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 02 September 2016 (02.09.16)	Date of mailing of the international search report 13 September 2016 (13.09.16)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3,Kasumigaseki,Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915,Japan	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１６／０６９０７６

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01R29/08(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（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01R29/08, G01N21/35

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	１９７１－２０１６年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１６年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１６年

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

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X Y	JP 2005-201819 A（日本電信電話株式会社） 2005.07.28, 段落【０００１】,【０００９】－【００１３】,【００２１】－【００５４】,【図１】,【図２】,【図４】,【図５】 (ファミリーなし)	1-2,6-10 3-5
Y	JP 2009-25053 A（パナソニック株式会社） 2009.02.05, 段落【０００１】,【００５３】－【０１００】,【図３】 (ファミリーなし)	3-5

☐　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 ０２．０９．２０１６	国際調査報告の発送日 １３．０９．２０１６
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 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）　２Ｓ　５７０１ 永井　皓喜 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２１６