

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4941298号
(P4941298)

(45) 発行日 平成24年5月30日(2012.5.30)

(24) 登録日 平成24年3月9日(2012.3.9)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 R 29/08 (2006.01) G O 1 R 29/08 F

請求項の数 21 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2007-523434 (P2007-523434)	(73) 特許権者	000004237
(86) (22) 出願日	平成18年6月23日 (2006.6.23)		日本電気株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2006/312614		東京都港区芝五丁目7番1号
(87) 国際公開番号	W02007/000947	(74) 代理人	100102864
(87) 国際公開日	平成19年1月4日 (2007.1.4)		弁理士 工藤 実
審査請求日	平成20年10月16日 (2008.10.16)	(72) 発明者	岩波 瑞樹
(31) 優先権主張番号	特願2005-189260 (P2005-189260)		東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
(32) 優先日	平成17年6月29日 (2005.6.29)	(72) 発明者	中田 正文
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願(平成17年度新エネルギー・産業技術総合開発機構「ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術」に関する委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受けるもの)		(72) 発明者	増田 則夫
			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電界センサ、磁界センサ、電磁界センサ、及びそれらを用いた電磁界測定システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光ファイバと、
前記光ファイバの端部における端面上に設けられ、前記光ファイバを介して入射する光を反射し、屈折率が電界又は磁界で変化する材料を含む光学層と
を具備し、
前記光学層は、前記光ファイバの端部の端面上にエアロゾルデポジション法により直接形成されている

電磁界センサ。

【請求項2】

請求項1に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層は、前記端面上に直接形成された結晶性の膜である
電磁界センサ。

【請求項3】

請求項2に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層の上部に誘電体層を更に具備する
電磁界センサ。

【請求項4】

請求項1乃至3のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層は、電気光学層を備える

電磁界センサ。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層は、磁気光学層を備える
を具備する
電磁界センサ。

【請求項 6】

請求項 4 又は 5 に記載の電磁界センサにおいて、
前記端面は、凸面である
電磁界センサ。

10

【請求項 7】

請求項 4 乃至 6 のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記光ファイバは、前記端部が伸張された略円錐であり、
前記光学層は、前記略円錐の先端部の側面に設けられている
電磁界センサ。

【請求項 8】

請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層と前記端面との間に誘電体層を更に具備し、
前記光学層は、前記誘電体層上に直接形成された結晶性の膜である
電磁界センサ。

20

【請求項 9】

請求項 1 乃至 8 のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層の厚みは 1 μm 以上 8 μm 以下である
電磁界センサ。

【請求項 10】

請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層を有する前記光ファイバは複数あり、一つに束ねられている
電磁界センサ。

【請求項 11】

請求項 10 に記載の電磁界センサにおいて、
複数の前記光ファイバは、一次的に束ねられている
電磁界センサ。

30

【請求項 12】

請求項 10 に記載の電磁界センサにおいて、
複数の前記光ファイバは、二次元的に最密充填になるように束ねられている
電磁界センサ。

【請求項 13】

請求項 1 に記載の前記電磁界センサとしての電界検知用の複数の電界センサと、
請求項 1 に記載の前記電磁界センサとしての磁界検知用の複数の磁界センサと
を具備し、
前記複数の電界センサと前記複数の磁界センサとは、一つに束ねられている
電磁界センサ。

40

【請求項 14】

請求項 13 に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層は、前記端面上に直接形成された結晶性の膜である
電磁界センサ。

【請求項 15】

請求項 14 に記載の電磁界センサにおいて、
前記光学層と前記端面との間に誘電体層を更に具備し、
前記光学層は、前記誘電体層上に直接形成された結晶性の膜である

50

電磁界センサ。

【請求項 16】

請求項 13 乃至 15 のいずれか一項に記載の電磁界センサにおいて、
前記複数の電界センサの各々と、前記複数の磁界センサの各々とは、互い違いに整列されて束ねられる

電磁界センサ。

【請求項 17】

光を発するレーザ光源と、
前記光を光ファイバの端部で反射する、請求項 1 乃至 16 のいずれか一項に記載の電磁界センサと、

前記反射光を検出する検出部と
を具備する

電磁界測定システム。

【請求項 18】

(a) 光ファイバの端部の端面上にエアロゾルデポジション法により電気光学層及び磁気光学層のいずれか一方をセンサ層として直接形成する工程と、

(b) 前記センサ層を熱処理する工程と

を具備する

電磁界センサの製造方法。

【請求項 19】

請求項 18 に記載の電磁界センサの製造方法において、

前記 (a) 工程は、

(a1) 前記端部を研磨して、凸面状の端面を形成する工程を備える

電磁界センサの製造方法。

【請求項 20】

請求項 19 に記載の電磁界センサの製造方法において、

前記 (a) 工程は、

(a2) 前記端部を伸張して、略円錐状の端面を形成する工程を備える

電磁界センサの製造方法。

【請求項 21】

(m) 束になっている複数のセンサのうちの第 1 センサが検出した第 1 検出信号を取得するステップと、

(n) 前記複数のセンサのうちの第 2 センサが検出した第 2 検出信号を取得する工程と、

、

(o) 前記第 1 検出信号と前記第 2 検出信号との加算平均としての第 1 加算平均信号を算出する工程と、

(p) 前記複数のセンサのうち、未だ検出信号を取得されていない他のセンサが検出した第 3 検出信号を取得する工程と、

(q) 前記第 1 加算平均信号と前記第 3 検出信号との加算平均を算出して、前記第 1 加算平均信号とする工程と、

(r) 前記複数のセンサの全てについて、検出信号の加算平均を行うまで前記 (p) ステップ及び前記 (q) ステップを繰り返すステップと

を具備し、

前記複数のセンサの各々は、

光ファイバと、

前記光ファイバの端部における凸面の端面上に設けられた電気光学層及び磁気光学層のいずれか一方としての光学層と

を備え、

前記光学層は、前記光ファイバの端部の端面上にエアロゾルデポジション法により直接形成されている

10

20

30

40

50

電磁界センサの電磁界検知方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電界センサ、磁界センサ、電磁界センサ、及びそれらを用いた電磁界測定システムに関し、特に微細領域での測定に適用される電界センサ、磁界センサ、電磁界センサ、及びそれらを用いた電磁界測定システムに関する。

【背景技術】

【0002】

微細領域の電磁界を測定する電磁界センサーと、それを用いた電磁界測定システムが知られている。図1Aは、従来の電界測定システムの一例を示すブロック図である。図1Bは、その電界測定システムに用いられている電界センサの断面図である。この電界測定システム820は、図1Aに示すように、光ファイバ801、連続レーザー光源800、ファイバアンプ802、偏光コントローラ803、光サーキュレータ804、電界センサー805、検光子806、ファイバアンプ807、フォトディテクタ808、スペクトラムアナライザ809を具備する。電界センサー805は、図1Bに示すように、光ファイバ801、電気光学結晶812、誘電体多層反射層813を備える。電気光学結晶812は、光ファイバ801の先端に接着層811を介して接着された微小な電界検知素子である。誘電体多層反射層813は、電気光学結晶812の底面に設けられ、光を反射する。

【0003】

この電界測定システム820の電界検出原理を以下に概述する。連続レーザー光源800は、レーザー光を出射する。ファイバアンプ802は、そのレーザー光を増幅する。偏光コントローラ803は、そのレーザー光の偏光面を制御する。光サーキュレータ804は、レーザー光を電界センサー805へ出射する。電気光学結晶812の底面の誘電体多層反射層813は、そのレーザー光を反射する。このとき、電気光学結晶812の屈折率は、回路基板810から発生する電界により変化する。それに伴い、その結晶中を伝搬するレーザー光の偏光状態は、その外部電界の強さに応じた変調を受けている。光サーキュレータ804は、変調され反射してきたレーザー光を再び光ファイバ801へ戻す。検光子806は、そのレーザー光を強度変調光に変換する。ファイバアンプ807は、変換後のレーザー光を増幅する。フォトディテクタ808は、増幅されたレーザー光を電気信号に変換する。スペクトラムアナライザ809は、その電気信号を検出する。スペクトラムアナライザ809で検出される電気信号のピークは、外部電界に起因する信号に対応する。本システムの原理上、外部電界の強さに応じてその信号の強度が異なる。そのため、回路基板810上の電界センサー805の位置を変えることにより電界分布が得られる。

【0004】

図1Bにおける電気光学結晶812を磁気光学結晶とすることにより、図1Aは従来の磁界測定システムを示すことになる。この場合の磁界検出原理は、上述の電界検出原理の説明中の電界を磁界とすることで説明される。

【0005】

従来の電界測定システムあるいは磁界測定システムは、光ファイバの先端に取り付けられた電界センサあるいは磁界センサを用いている。これらの電界センサあるいは磁界センサは、微小加工された電気光学結晶812あるいは磁気光学結晶が光ファイバの先端に接着された構造を有している。その適用領域と空間分解能は、結晶サイズにより制限される。すなわち、結晶サイズが小さいほど、より微小な領域に適用でき、空間分解能も高くなる。空間分解能は結晶内を伝搬するセンサ光の体積によって決まる。センサ光の体積が小さいほど高空間分解能となる。例えば、光ファイバの先端に磁気光学結晶が接着された従来の磁界センサでは、平面サイズ $270\mu\text{m} \times 270\mu\text{m}$ 、厚み $11\mu\text{m}$ の結晶を用いて $10\mu\text{m}$ 級の空間分解能を有するセンサが実現されている。しかし、このような構造では、結晶の微小加工技術の限界により、これ以上のセンサの小型化、高空間分解能化の実現は困難である。すなわち、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能なセンサーを

10

20

30

40

50

提供することができない。

【 0 0 0 6 】

また、従来の電磁界センサは、前述のように微小加工された結晶を光ファイバの先端に有する。ただし、一般的に、その結晶の平面サイズがファイバの断面積よりも大きい。そのため、複数本の電磁界センサを束ねることが困難であった。また、厚みの等しい結晶を複数個準備することが困難であった。更に、エネルギー損失の原因となる接着層の厚みの等しいセンサーを複数本準備することが困難であった。これらの理由により、空間分解能と感度の等しい複数本の電磁界センサを束ねて電磁界測定システムを構築することができなかった。これらの理由のため、センサを走査させずに2次元情報を測定することができなかった。また、複数本のセンサ間での信号処理による磁界測定システムの高感度化が実現

10

【 0 0 0 7 】

関連する技術として、特開平7 - 104013号公報にプローブが開示されている。このプローブは、ガラスブロックと、ガラスプレートと、透明電極と、電気光変換素子と、誘電体多層反射膜と、電線と、光ファイバと、ファイバ固定部と、クランプ部とを含む。ガラスブロックは、角推形の石英ガラスの頂点を底面と平行面で削り取った先端部を有する。ガラスプレートは、このガラスブロックを同一平面状に一系列に複数個並べて保持する。透明電極は、複数個並べた前記ガラスブロックの斜面と削り取った面とに同時に蒸着した。電気光変換素子は、前記ガラスブロックの先端部に接着する。誘電体多層反射膜は、この電気光変換素子上であって前記ガラスブロックと接着した面の反対面に位置しレーザー光を反射する。電線は、前記透明電極から引き出す。光ファイバは、前記ガラスプレート上に位置し前記電気光変換素子にレーザー光を導く。ファイバ固定部は、この光ファイバをガラスプレート上に固定する。クランプ部は、この固定部と被検査物の検査する面の反対の面とを挟み込む。

20

【 0 0 0 8 】

特開平6 - 82488号公報に光変成器用センサが開示されている。この光変成器用センサは、偏光子と検光子との間にファラデー素子を配するとともに、前記偏光子の入光側及び前記検光子の出光側に夫々複数の光ファイバ群からなる第一及び第二のファイババンドルを設けてなる。この光変成器用センサは、前記ファラデー素子面を指向する前記第一のファイババンドルの端面を凸球面研磨するとともに研磨部表面に誘電体膜を形成し、この誘電体膜を前記偏光子としている。

30

【 0 0 0 9 】

特開平7 - 120504号公報に電圧測定装置が開示されている。この電圧測定装置は、レーザー光源と、電気光学部材と、反射手段と、検出手段とを備える。レーザー光源は、第1及び第2の出射端面を有する。電気光学部材は、表面に高反射コートが形成された曲面を有し、この曲面の曲率中心点と前記レーザー光源の第1の出射端面の光出射点とが一致するように前記曲面の反対側の面と前記レーザー光源の第1の出射端面とを接合させた、電界に応じて光に対する屈折率が変化する。反射手段は、前記レーザー光源の第2の出射端面側に設けられている。検出手段は、前記反射手段を透過して出射するレーザー光の光強度を検出する。

40

【 0 0 1 0 】

特開昭59 - 145977号公報に磁界測定装置の技術が開示されている。この磁界測定装置は、検出部と光ファイバと計測部とからなる。検出部は、光ファイバの端部又は途中に偏光子とファラデー回転能素子を装着している。光ファイバは、上記検出部へ光を送りかつ上記検出部からの光を伝送する。計測部は、上記光ファイバに光源を結合し、かつ、上記検出部からの光の変動を計測する。

【 0 0 1 1 】

特開平11 - 67061号公報に電界放出カソードと磁気センサが開示されている。この電界放出カソードは、先端部をテーパ状に成形したガラスファイバと、前記ガラスフ

50

イバの長手方向の中心部に埋設されているカーボン繊維からなる。前記カーボン繊維と絶縁された状態で前記ガラスファイバの周辺部が導電性材料により被覆されている。

【0012】

特開2001-281470号公報に強磁性体含有光ファイバ並びに該光ファイバを用いた電流センサ及び磁界センサが開示されている。この電流センサは、光を射出する光源と、入射する光を2方向に分岐するビームスプリッタと、光を直線偏光にする偏光板と、強磁性体の粒子を含む磁性体膜で一端面を覆ったことを特徴とする光ファイバと、光を検出する検出器とを備え、前記光源から射出された光は、前記ビームスプリッタ及び前記偏光板を介して前記光ファイバに入射され、該入射された光は、前記光ファイバの入射端とは逆の端で反射されて前記入射端から射出され、該射出された光は、前記偏光板及びビームスプリッタを介して前記検出器に入射されるようにした。

10

【0013】

特開2000-162566号公報に磁気光学効果増大素子およびその製造方法が開示されている。この磁気光学効果増大素子は、第1および第2の誘電体多層反射膜間にフェライト膜を挟んでサンドイッチ構造とするとともに、ファブリペロー共鳴条件を満足させるように構成している。前記フェライト膜をフェライトめっき法により20以上100以下の温度で作製するようにしている。

【0014】

特開昭60-263866号公報に光電界センサの技術が開示されている。この光電界センサは、電界により光の偏光の直交成分に位相差が生じるポッケルス効果を有するポッケルス素子を用いてなる。この光電界センサは、光ファイバの先端に偏光子、前記ポッケルス素子、1/8波長板および反射鏡からなるセンサ部を設け、光ファイバによって光源からの光を前記ポッケルス素子に伝播すると共に前記ポッケルス素子を通過して前記反射鏡で反射されて再び前記ポッケルス素子を通過した光を受光部に伝播する構成としている。

20

【0015】

また、関連する技術がT. Ohara, et al, "Two-Dimensional Field Mapping of Microstrip Lines with a Band Pass Filter or a Photonic Bandgap Structure by Fiber-Optic EO Spectrum Analysis System", Proc. Int. Topical Meeting Microwave Photonics, Oxford, U.K., Sept. 2000, pp. 210-213. に関示されている。

30

【0016】

また、関連する技術がS. Wakana, et al, "Fiber-Edge Electrooptic/Magneto-optic Probe for Spectral-Domain Analysis of Electromagnetic Field", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No. 12, Dec. 2000, pp. 2611-2616. に関示されている。

40

【0017】

また、関連する技術がE. Yamazaki, et al, "Three-Dimensional Magneto-Optic Near-Field Mapping over 10 - 50 μm-Scale Line and Space Circuit Patterns", Proc. the 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Nov. 2001, p. 318. に関示されている。

【0018】

また、関連する技術がE. Yamazaki, et al, "High-Frequency Magneto-Optic Probe Based on BiRIG

50

Rotation Magnetization”, IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, No. 7, July 2003, pp. 1338-1344. に開示されている。

【0019】

また、関連する技術が M. Iwanami, et al, “Wideband Magneto-optic Probe with 10 μm -Class Spatial

Resolution”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 4B, Apr. 2004, pp. 2288-2292. に開示されている。

10

【発明の開示】

【0020】

本発明の目的は、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電界センサ、磁界センサ、電磁界センサ、及びそれらを用いた電磁界測定システムを提供することにある。

【0021】

本発明の他の目的は、走査させずに2次元情報が測定可能な電界センサ、磁界センサ、電磁界センサ、及びそれらを用いた電磁界測定システムを提供することにある。

【0022】

上記課題を解決するために、本発明の電界センサは、光ファイバと、光ファイバの端部における端面上に設けられ、光ファイバを介して入射する光を反射する光学層とを具備する。

20

【0023】

上記の電磁界センサにおいて、光学層は、電気光学層を備えていても良い。上記の電磁界センサにおいて、光学層は、磁気光学層を備えていても良い。上記の電磁界センサにおいて、端面は、凸面であっても良い。上記の電磁界センサにおいて、光ファイバは、端部が伸張された略円錐であっても良い。光学層は、略円錐の先端部の側面に設けられても良い。上記の電磁界センサにおいて、光学層と端面との間に誘電体層を更に具備しても良い。上記の電磁界センサにおいて、光学層を有する光ファイバは複数あり、一つに束ねられていても良い。上記の電磁界センサにおいて、複数の光ファイバは、一次元的に束ねられて

30

【0024】

上記の電磁界センサは、上記各項のいずれか一項に記載の電磁界センサとしての電界検知用の複数の電界センサと、上記各項のいずれか一項に記載の電磁界センサとしての磁界検知用の複数の磁界センサとを具備していても良い。複数の電界センサと複数の磁界センサとは、一つに束ねられていても良い。上記の電磁界センサにおいて、複数の電界センサの各々と、複数の磁界センサの各々とは、互い違いに整列されて束ねられていても良い。

【0025】

上記課題を解決するために、本発明の電磁界測定システムは、レーザ光源と、電磁界センサと、検出部とを具備する。レーザ光源は、光を発する。電磁界センサは、上記各項のいずれか一項に記載されている。検出部は、反射光を検出する。

40

【0026】

上記課題を解決するために、本発明の電磁界センサの製造方法は、(a)光ファイバの端部の端面上にエアロゾルデポジションにより電気光学層及び磁気光学層のいずれか一方をセンサ層として形成する工程と、(b)センサ層を熱処理する工程とを具備する。

【0027】

上記の電磁界センサの製造方法において、(a)工程は、(a1)端部を研磨して、凸面状の端面を形成する工程を備えていても良い。上記の電磁界センサの製造方法において、(a)工程は、(a2)端部を伸張して、略円錐状の端面を形成する工程を備えていて

50

も良い。

【0028】

上記課題を解決するために、本発明の電磁界センサの電磁界検知方法は、(m)束になっている複数のセンサのうちの第1センサが検出した第1検出信号を取得するステップと、(n)複数のセンサのうちの第2センサが検出した第2検出信号を取得する工程と、(o)第1検出信号と第2検出信号との加算平均としての第1加算平均信号を算出する工程と、(p)複数のセンサのうち、未だ検出信号を取得されていない他のセンサが検出した第3検出信号を取得する工程と、(q)第1加算平均信号と第3検出信号との加算平均を算出して、第1加算平均信号とする工程と、(r)複数のセンサの全てについて、検出信号の加算平均を行うまで(p)ステップ及び(q)ステップを繰り返すステップとを具備する。複数のセンサの各々は、光ファイバと、光ファイバの端部における凸面の端面上に設けられた電気光学層及び磁気光学層のいずれか一方とを備える。

10

【0029】

本発明によれば、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムが提供される。さらに、走査させずに2次元情報が測定可能であり、信号処理による高感度化が可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムが提供される。

【図面の簡単な説明】

【0030】

【図1A】図1Aは、従来の電界(磁界)測定システムの一例を示すブロック図である。

20

【図1B】図1Bは、従来の電界(磁界)測定システムに用いられている電界センサの断面図である。

【図2A】図2Aは、本発明の第1の実施の形態に係る電界センサを用いる電界測定システムの構成を示すブロック図である。

【図2B】図2Bは、本発明の第1の実施の形態に係る電界センサの断面図である。

【図3】図3は、本発明に係る電界センサと従来の電界センサを用いて測定した電界分布の一例を示すグラフである。

【図4】図4は、本発明の第1の実施の形態に係る電界センサの変形例の構成を示す断面図である。

【図5】図5は、本発明の第1の実施の形態に係る電界センサの他の変形例の構成を示す断面図である。

30

【図6】図6は、本発明の第2の実施の形態に係る電界センサの構成を示す断面図である。

【図7】図7は、本発明の電界センサと従来の電界センサを用いて測定した電界分布の一例を示すグラフである。

【図8】図8は、第1の実施の形態の電界センサを複数本束ねて形成された電界センサの一例を示す図である。

【図9】図9は、本発明の電界センサと従来の電界センサとにおける電気信号の検出結果を示すグラフである。

【図10A】図10Aは、本発明の第4の実施の形態に係る磁界センサを用いる磁界測定システムの構成を示すブロック図である。

40

【図10B】図10Bは、本発明の第4の実施の形態に係る磁界センサの断面図である。

【図11】図11は、本発明の磁界センサと従来の磁界センサを用いて測定した磁界分布の一例を示すグラフである。

【図12】図12は、本発明の第5の実施の形態に係る磁界センサの構成を示す断面図である。

【図13】図13は、本発明の磁界センサと従来の磁界センサを用いて測定した磁界分布の一例を示すグラフである。

【図14】図14は、第1の実施の形態の磁界センサ505を複数本束ねて形成された磁界センサ805の一例を示す図である。

50

【図 15】図 15 は、電界センサ 105 及び磁界センサ 505 を複数本束ねて形成された電磁界センサ 905 の一例を示す図である。

【図 16】図 16 は、電界測定システムに含まれる情報処理装置の構成を示すブロック図である。

【図 17】図 17 は、本発明の磁界センサの実施の形態の製造方法を示すフローチャートである。

【図 18】図 18 は、平均信号検出部の動作を示すフローチャートである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0031】

以下、本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの実施の形態に関して、添付図面を参照して説明する。

【0032】

(第 1 の実施の形態)

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第 1 の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして電界センサ、電磁界測定システムについて電界センサを用いる電界測定システムについて説明する。

【0033】

図 2 A は、本発明の第 1 の実施の形態に係る電界センサを用いる電界測定システムの構成を示すブロック図である。図 2 B は、本発明の第 1 の実施の形態に係る電界センサの断面図である。この電界測定システム 120 は、図 2 A に示すように、光ファイバ 101、連続レーザ光源 100、ファイバアンプ 102、偏光コントローラ 103、光サーキュレータ 104、電界センサ 105、検光子 106、ファイバアンプ 107、フォトディテクタ 108、スペクトラムアナライザ 109 を具備する。

【0034】

光ファイバ 101、連続レーザ光源 100、ファイバアンプ 102、偏光コントローラ 103、光サーキュレータ 104、検光子 106、ファイバアンプ 107、フォトディテクタ 108、スペクトラムアナライザ 109 は、光ファイバ 801、連続レーザ光源 800、ファイバアンプ 802、偏光コントローラ 803、光サーキュレータ 804、検光子 806、ファイバアンプ 807、フォトディテクタ 808、及びスペクトラムアナライザ 809 と同様である。ただし、光サーキュレータ 104 と電界センサ 105 との間は、本発明では、光ファイバ 112 である。

【0035】

電界センサ 105 は、図 2 B に示すように、光ファイバ 112、電気光学層 115 を備える。光ファイバ 112 は、クラッド層 113 及びコア 114 層を含む。光ファイバ 112 は、一方の端部を光サーキュレータ 104 に接続されている。他方の端部は、その端面 135 が研磨により凸状の曲面に加工されている。その端面 135 上には、微小な電界検知素子である電気光学層 115 が直接形成されている。電気光学層 115 の外側の表面 136 は、測定対象に向けられる。電気光学層 115 が凸状の曲面状に形成されていることは、光が曲面で集光されるためセンサ光の体積が縮小される結果、従来よりも分解能を高めることができ好ましい。

【0036】

次に、本発明の電界測定システムの第 1 の実施の形態の動作を説明する。連続レーザ光源 100 は、レーザ光を出射する。ファイバアンプ 102 は、そのレーザ光を増幅する。偏光コントローラ 103 は、そのレーザ光の偏光面を制御する。光サーキュレータ 104 は、レーザ光を電界センサ 105 へ出射する。光ファイバ 112 のコア層 114 を進んだレーザ光 (131) は、電気光学層 115 の底面において、電気光学層 115 の屈折率と空気の屈折率との差により反射される。このとき、電気光学層 115 の屈折率は、回路基板 110 から発生する電界により変化する。それに伴い、その電気光学層 115 中を伝搬するレーザ光の偏光状態は、その外部電界の強さに応じた変調を受けている。光サーキュレータ 104 は、変調され反射してきたレーザ光 (132) を再び光ファイバ 101 へ戻

10

20

30

40

50

す。検光子 106 は、そのレーザ光を強度変調光に変換する。ファイバアンプ 107 は、変換後のレーザ光を増幅する。フォトディテクタ 108 は、増幅されたレーザ光を電気信号に変換する。スペクトラムアナライザ 109 は、その電気信号を検出する。スペクトラムアナライザ 109 で検出される電気信号のピークは、外部電界に起因する信号に対応する。本システムの原理上、外部電界の強さに応じてその信号の強度が異なる。そのため、回路基板 110 上の電界センサ 105 の位置を変えることにより電界分布が得られる。

【0037】

電界センサの空間分解能は電気光学層 115 内を伝搬するセンサ光（レーザ光）の体積によって決まる。センサ光（レーザ光）の体積が小さいほど高空間分解能となる。

このうち、高さ方向の分解能は電気光学層 115 の厚さで定まるため、薄いことが望ましい。従来はバルクの電気光学部材を加工により薄層化して、光ファイバーの先端に接着させていた。バルク部材の加工による薄層化は 10 μm 程度が加工上の限界である。そのため、高さ方向の分解能を高めることは困難であった。しかし、本発明では、研磨により凸状の曲面に加工された光ファイバ 112 の先端に、電気光学層 115 を直接に薄膜で形成する。したがって、加工限界の 10 μm に制限されることなく、電気光学層 115 の厚さをより薄くすることができる。それにより、高さ方向分解能を向上させることができる。電気光学層 115 の厚さとしては、例えば、1 μm 以上 8 μm 以下が好ましい。1 μm 以上より薄いと、電界計測に十分な S/N 比を得ることができなくなる。8 μm 以下であれば好ましい高分解能が得られる。

【0038】

また、水平方向の分解能は電気光学層 115 中を伝搬するレーザ光の径で定まるため、光径が絞り込まれることが望ましい。従来は上述のように接着層が存在していたため光径を十分に絞れなかった。本発明では、上述のように、光ファイバ 112 の先端に電気光学層 115 を直接に薄膜で形成しているため、接着層を用いる必要がない。したがって、接着層に妨害されることなく、レーザ光の径を絞り込むことができる。それにより、水平方向分解能を向上させることができる。

以上のように、高さ方向及び水平方向の分解能を向上することで電界センサ 105 の空間分解能の高分解能化を実現した。

【0039】

次に、本発明の電界センサの第 1 の実施の形態の製造方法を説明する。

電気光学層 115 は、エアロゾルデポジション法により形成した。エアロゾルデポジション法は、まず、超微粒子をエアロゾル発生器に充填する。次に、キャリアガス（例示：窒素、空気）をエアロゾル発生器に導入して超微粒子を均一に分散させたエアロゾルを作り出す。続いて、そのエアロゾルを成膜室に搬送してノズルから基板に向かって噴射し堆積させる。これにより、所望の膜が成膜される。このとき、超微粒子（脆性材料）は機械的衝撃力が付加されて基板に到達するので、基板上で粉碎されながら、堆積する。

【0040】

図 17 は、本発明の電界センサの実施の形態の製造方法を示すフローチャートである。まず、エアロゾルデポジション法による成膜に用いる基板を準備する（ステップ S01）。基板は、光ファイバ 112 を用いる。成膜面は、光ファイバ 112 の端部の端面 135 である。光ファイバ 112 の端部を、研磨により凸状の曲面に加工して形成する。次に、エアロゾルデポジション法による成膜を行う（ステップ S02）。エアロゾルデポジション法による電気光学層 115 の成膜条件は、以下のとおりである。電気光学層 115 の成膜の膜厚は 6000 nm とした。原料粉末は Pb(Zr0.6Ti0.4)O3（以下、「PZT」とする）、キャリアガスは酸素をそれぞれ用いた。基板（光ファイバ 112 の端面 135）に対するノズルの入射角を 10 度、ガス流量を 12 リットル/分、ノズル-基板間距離を 5 mm、成膜速度を 0.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、加振器の振動数を 250 rpm として成膜した。

【0041】

その後、熱処理を含む以下の処理を行った（ステップ S03）。すなわち、まず、成膜

後、電気光学層 115 を大気中で、600、15 分間程度熱処理した。この熱処理により、電気光学層 115 の電気光学効果を発現させた。さらに、200 で 100 kV/cm 程度の電界印加の下で分極処理を行った。一次電気光学係数 r_{33} は 200 pm/V であった。熱処理後、電気光学層 115 の膜の表面 136 の凹凸を除去するために、膜厚 5400 nm まで研磨し、平坦化した。

以上の製造方法により、電界センサ 105 が形成された。

【0042】

上記の説明では、電気光学層 115 の組成として PZT の場合を説明した。しかし、この組成に限定されるものではなく、例えば、La を添加した組成であっても良い。また、ジルコン酸チタン酸鉛系の材料以外にも、電気光学効果の大きいチタン酸バリウム、ストロンチウム置換チタン酸バリウム、タンタリウム置換ニオブ酸カリウム、等も有効な材料である。

10

【0043】

本発明では、電気光学層 115 の成膜にエアロゾルデポジション法を用いていることも発明の特徴のひとつである。その理由は以下による。本発明の目的の一つは、高分解能な電界センサを提供することにある。そのためには、加工された光ファイバの先端に電気光学層 115 を直接薄膜で形成することが重要である。また、電界計測に十分な S/N 比を得るためには、その膜厚は 1 μ m 以上であることが望ましい。1 μ m の強誘電体透明膜をガラス、プラスチックや高分子を含む樹脂や任意の組成の誘電体上に実現できるのは、現在の技術ではスパッタ法でもゾル・ゲル法でも不可能であり、ただエアロゾルデポジション法でのみ可能である。

20

【0044】

図 3 は、本発明に係る電界センサと従来の電界センサを用いて測定した電界分布の一例を示すグラフである。曲線 A1 は本発明の電界センサを用いた場合であり、曲線 B1 は従来の電界センサを用いた場合である。横軸は位置を示し、縦軸は電界強度に対応する電気信号を示す。電界分布の測定は、配線幅/間隔 5 μ m の 3 線ミランダ配線上空で行った。ミランダ配線には 10 MHz、15 dBm の信号を印加した。電界センサをミランダ配線上空 10 μ m の位置に配置し、ミランダ配線を横断する方向に 1 μ m ピッチで走査させたときに得られた電界分布である。従来の電界センサの場合、隣接配線間で観測されるはずの電界ピークが不明瞭であった(曲線 B1)。一方、本発明の電界センサの場合、電界ピークが明瞭に観測されている(曲線 A1)。この結果から、本発明の電界センサが従来の電界センサよりも高空間分解能であることが分かる。

30

【0045】

図 4 は、本発明の第 1 の実施の形態に係る電界センサの変形例の構成を示す断面図である。この電界センサ 205 は、電界センサ 105 と比較して、センサ感度をより高めることができる。電界センサ 205 は、光ファイバ 212、電気光学層 215 及び誘電体多層膜反射層 216 を含む。光ファイバ 212 は、コア層 214 とそれを囲むクラッド層 213 より構成されている。端部は、その端面 235 が研磨により凸状の曲面に加工されている。その端面 235 上には、微小な電界検知素子である電気光学層 215 が直接形成されている。誘電体多層膜反射層 216 は、電気光学層 215 の外側の表面 236 上に形成されている。例えば、図 17 のステップ S03 の後に、誘電体多層膜反射層 216 を、イオンプレーティング法で形成するステップを入れる。誘電体多層膜反射層 216 の存在により反射するレーザー光の光量を大きくすることができる。それにより、S/N 比を高めることができる。

40

なお、誘電体多層膜反射層 216 の外側の表面 237 は、測定対象に向けられる。

【0046】

図 5 は、本発明の第 1 の実施の形態に係る電界センサの他の変形例の構成を示す断面図である。この電界センサ 305 は、電界センサ 205 と比較して、センサ感度をさらに高めることができる。電界センサ 305 は、光ファイバ 312、下部誘電体多層膜反射層 317、電気光学層 315 及び上部誘電体多層膜反射層 316 を含む。光ファイバ 312 は

50

、コア層 314 とそれを囲むクラッド層 313 より構成されている。端部は、その端面 338 が研磨により凸状の曲面に加工されている。下部誘電体多層膜反射層 317 は、その端面 338 上に直接形成されている。例えば、図 17 のステップ S01 の後でステップ S02 の前に、下部誘電体多層膜反射層 317 を、イオンプレーティング法で形成するステップを入れる。電界検知素子である電気光学層 315 は、下部誘電体多層膜反射層 317 の表面 335 上に形成されている。既述の図 17 のステップ S02、S03 のように形成する。上部誘電体多層膜反射層 316 は、電気光学層 315 の外側の表面 336 上に形成されている。例えば、図 17 のステップ S03 の後に、上部誘電体多層膜反射層 316 を、イオンプレーティング法で形成するステップを入れる。下部誘電体多層膜反射層 317 と電気光学層 315 と上部誘電体多層膜反射層 316 とは、ファブリペロ共振器構造を構成している。このようなファブリペロ共振器構造を形成することにより、電気光学層 315 の上面 (336) と下面 (335) でレーザ光の多重反射が生じる。これは電気光学層 315 内の光路長が増加することと等価であり、光の変調度の増大をもたらす結果、S/N 比をさらに高めることができる。

【0047】

本発明により、より小型で高空間分解能で、LSI チップ / パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

【0048】

(第 2 の実施の形態)

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第 2 の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして電界センサ、電磁界測定システムについて電界センサを用いる電界測定システムについて説明する。

【0049】

本実施の形態では、電界測定システムは基本的に第 1 の実施の形態の電界測定システム 120 と同様である。しかし、本実施の形態の電界測定システムにおける電界センサ 405 の構成が、第 1 の実施の形態の電界センサ 105 の構成と異なる。

【0050】

図 6 は、本発明の第 2 の実施の形態に係る電界センサの構成を示す断面図である。電界センサ 405 は光ファイバ 412、電気光学層 415 を備える。光ファイバ 412 は、クラッド層 413 及びコア 414 層を含む。光ファイバ 412 は、一方の端部を光サーキュレータ 104 に接続されている。他方の端部は、円錐 431 を形成されている。ただし、正確に円錐状の形状でなくても良く、端部を加熱中の引張り操作により伸張した場合にできる概ね円錐状の形状であれば良い。その円錐 431 の先端部の側面 (曲面) 435 には、微小な電界検知素子である電気光学層 415 が直接形成されている。電気光学層 415 の外側の表面 436 は、測定対象に向けられる。電界センサ 405 のその他の構成については、第 1 の実施の形態と同様である。

【0051】

次に、本発明の第 2 の実施の形態に係る電界測定システムの動作については、電界センサ 405 を用いる他は第 1 の実施の形態と同様である。

【0052】

この場合にも、第 1 の実施の形態と同様の効果を得ることができる。更に、本実施の形態の電界センサ 105 は、凸状の曲面 135 に加工された光ファイバ 112 の先端に電気光学層 115 を形成して作製する第 1 の実施の形態の電界センサ 105 よりも、さらにレーザ光を集光することが可能である。そのため、第 1 の実施の形態の電界センサ 105 よりも高空間分解能となる。

【0053】

光ファイバの端部の形状は、上記の第 1 の実施の形態や本実施の形態に限定されるものではない。その形状は、光ファイバ 412 の先端部のように、端部で反射したレーザ光が集光しやすい形状であることが好ましい。これにより、測定に寄与するレーザ光が増え、電界センサの感度や S/N 比を向上することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 4 】

次に、本発明の電界センサの第2の実施の形態の製造方法については、光ファイバ412を用いる他は図17に示す第1の実施の形態と同様である。ただし、ステップS01における基板としての光ファイバ412の端部は、以下のようにして加工される。まず、端部を加熱し、その加熱中の端部を引張り操作により伸張させて、適当な位置にて切断する。その後、その先端部を研磨により鋭利に尖らせて形成した。この場合にも、第1の実施の形態と同様の効果を得ることができる。

【 0 0 5 5 】

図7は、本発明の電界センサと従来の電界センサを用いて測定した電界分布の一例を示すグラフである。曲線A2は本発明の電界センサを用いた場合であり、曲線B2は従来の電界センサを用いた場合である。横軸は位置を示し、縦軸は電界強度に対応する電気信号を示す。電界分布の測定は、配線幅/間隔5 μ mの3線ミアンダ配線上空で行った。ミアンダ配線には10MHz、15dBmの信号を印加した。電界センサをミアンダ配線上空10 μ mの位置に配置し、ミアンダ配線を横断する方向に1 μ mピッチで走査させたときに得られた電界分布である。従来の電界センサの場合、隣接配線間で観測されるはずの電界ピークが不明瞭であった(曲線B2)。一方、本発明の電界センサの場合、電界ピークが明瞭に観測されている(曲線A2)。この結果から、本発明の電界センサが従来の電界センサよりも高空間分解能であることが分かる。さらに、第1の実施の形態に記載の電界センサ105を用いた場合よりも中央部2箇所の電界ピークの相対強度が強い。図7は、本実施の形態の電界センサ405が第1の実施の形態に記載の電界センサ105よりも高空間分解能であることを示している。

【 0 0 5 6 】

本発明により、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

【 0 0 5 7 】

(第3の実施の形態)

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第3の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして電界センサ、電磁界測定システムについて電界センサを用いる電界測定システムについて説明する。

【 0 0 5 8 】

本実施の形態では、電界測定システムは基本的に第1の実施の形態の電界測定システム120と同様である。ただし、1点ごとの電界測定ではなく、電界センサ105を複数本束ねて複数点の電界測定を一度に行う点で第1の実施の形態と異なる。

【 0 0 5 9 】

複数点での電界測定の方法としては、例えば、電界測定システム120を複数用意し、それらに属する複数の電界センサ105を束ねる方法が考えられる。図8は、第1の実施の形態の電界センサ105を複数本束ねて形成された電界センサ705の一例を示す図である。電気光学層115の側から見た図である。電界センサ705は、一次元的に並んだ複数の電界センサ105が、更に、二次元的に最密充填になるように(千鳥状、蜂の巣状)に束ねられている。そして、各電界測定システム120のスペクトラムアナライザ109からのデータを一台のコンピュータ(図示されず)で処理するようにする。

【 0 0 6 0 】

電界センサ105をこのように束ねた電界センサ705を用いて電界強度を測定することで、従来より極めて短時間で、走査させずに高分解能な電界強度の二次元分布を得ることが可能となる。

【 0 0 6 1 】

電界センサは、単に一次元的に一列に並んだ複数の電界センサ105だけであっても良い。その場合、束ねた方向に対して垂直な方向へ、狭ピッチで走査させることにより、従来より短時間で高分解能な電界強度の二次元分布を得ることができる。

【 0 0 6 2 】

また、電界測定システム120は一つで、電界センサとして電界センサ705を用いても良い。その場合、光サーキュレータ104と電界センサ705との間に、レーザ光が入射する電界センサ705内の電界センサ105を連続的に切り替えるレーザ切替部(図示されず)を設ける。このようにすることで、一つの電界測定システム120で連続的に高分解能な電界強度の二次元分布を測定することも可能である。

【0063】

また、複数の光ファイバを束ねた電界センサ705では、それを構成する個々の電界センサ105間の平均信号の検出を行うことにより、ノイズを平均化することができる。それにより、S/N比を高めることができる。平均信号の検出は、スペクトラムアナライザ109に内蔵された情報処理装置や、スペクトラムアナライザ109に接続された情報処理装置(後述)において、そのプログラムにより行う。

10

【0064】

図16は、電界測定システム120(磁界測定システム520)に含まれる情報処理装置700の構成を示すブロック図である。情報処理装置700は、コンピュータに例示され、スペクトラムアナライザ109、509に接続されている。情報処理装置700は、平均信号を検出するプログラムとしての平均信号検出部701を内部のメモリに格納している。

【0065】

図18は、平均信号検出部701の動作を示すフローチャートである。平均信号の検出は、平均信号検出部701が、電界センサ705を構成する個々の電界センサ105からの信号及びノイズの加算平均を行って求めている。具体的には、例えば、以下のプロセスである。

20

始めに、一つの電界センサ105からのノイズを含む信号(データ)をスペクトラムアナライザから取得する(ステップS11)。次に、別の電界センサ105からのノイズを含む信号(次のデータ)をスペクトラムアナライザから取得する(ステップS12)。そして、一つの電界センサ105からのノイズを含む信号と別の電界センサ105からのノイズを含む信号との間で加算平均を行い、加算平均信号を求める(ステップS13)。ここで、全ての電界センサ105からの信号について加算平均を行ったか否かを判断する(ステップS14)。全ての電界センサ105からの信号について加算平均を行っていない場合(ステップS14:NO)、ステップS12へ戻る。そして、次の別の電界センサ105からのノイズを含む信号を取得し(ステップS12)、ステップS13での加算平均信号と間で更に加算平均を行い、加算平均信号を求める(ステップS13)。このような処理を電界センサ705に含まれる全ての電界センサ105にわたって逐次実行する。ただし、加算平均とは、複数の信号を重ね合わせ、それを信号の総数で割る操作である。全ての電界センサ105からの信号について加算平均を行った場合(ステップS14:YES)、計算結果を出力する。ただし、加算平均とは、複数の信号を重ね合わせ、それを信号の総数で割る操作である。

30

【0066】

その他の構成、動作、製造方法については、第1の実施の形態と同様である。

【0067】

図9は、本発明の電界センサ705と従来の電界センサとにおける電気信号の検出結果を示すグラフである。横軸は周波数を示し、縦軸は電界強度に対応する電気信号を示す。曲線A3は、本発明の電界センサ705を電界測定システム120に組み込み、レーザ光が入射する電界センサ105を逐次切り替えて連続的に測定する過程で、個々の電界センサ105の間の平均信号の検出を行った結果である。曲線B3は、従来の電界センサによる電気信号の検出結果を示している。被測定回路は単一直線ストリップ導体を有するマイクロストリップ線路とし、各センサーを線路上空10 μ mの位置に固定して測定を行った。線路には10MHz、15dBmの信号を印加した。本発明の電界センサ705を適用した結果、ノイズが低減され、従来の電界センサに比べてS/N比を高め、高感度化実現することができた。

40

50

【 0 0 6 8 】

なお、本実施の形態の電界センサは、第 1 の実施の形態の電界センサを複数本束ねて形成されている。しかし、束ねる電界センサを第 2 の実施の形態の電界センサとしてもよい。また、束ねる電界センサは第 1 の実施の形態、第 2 の実施の形態の電界センサに限定されるものではない。例えば、電気光学層が平坦な光ファイバ端面上に形成されている電界センサであってもよい。

【 0 0 6 9 】

本発明により、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

【 0 0 7 0 】

(第 4 の実施の形態)

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第 4 の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして磁界センサ、電磁界測定システムについて磁界センサを用いる磁界測定システムについて説明する。

【 0 0 7 1 】

図 10 A は、本発明の第 4 の実施の形態に係る磁界センサを用いる磁界測定システムの構成を示すブロック図である。図 10 B は、本発明の第 4 の実施の形態に係る磁界センサの断面図である。この磁界測定システム 5 2 0 は、図 10 A に示すように、光ファイバ 5 0 1、連続レーザ光源 5 0 0、ファイバアンプ 5 0 2、偏光コントローラ 5 0 3、光サーキュレータ 5 0 4、磁界センサ 5 0 5、検光子 5 0 6、ファイバアンプ 5 0 7、フォトディテクタ 5 0 8、スペクトラムアナライザ 5 0 9 を具備する。

【 0 0 7 2 】

光ファイバ 5 0 1、光ファイバ 5 1 2、連続レーザ光源 5 0 0、ファイバアンプ 5 0 2、偏光コントローラ 5 0 3、光サーキュレータ 5 0 4、検光子 5 0 6、ファイバアンプ 5 0 7、フォトディテクタ 5 0 8、及びスペクトラムアナライザ 5 0 9 は、第 1 の実施の形態の光ファイバ 1 0 1、光ファイバ 1 1 2、連続レーザ光源 1 0 0、ファイバアンプ 1 0 2、偏光コントローラ 1 0 3、光サーキュレータ 1 0 4、検光子 1 0 6、ファイバアンプ 1 0 7、フォトディテクタ 1 0 8、スペクトラムアナライザ 1 0 9 と同様である。

【 0 0 7 3 】

磁界センサ 5 0 5 は、図 10 B に示すように、光ファイバ 5 1 2、磁気光学層 5 1 5 を備える。光ファイバ 5 1 2 は、クラッド層 5 1 3 及びコア 5 1 4 層を含む。光ファイバ 5 1 2 は、一方の端部を光サーキュレータ 5 0 4 に接続されている。他方の端部は、その端面 5 3 5 が研磨により凸状の曲面に加工されている。その端面 5 3 5 上には、微小な磁界検知素子である磁気光学層 5 1 5 が直接形成されている。磁気光学層 5 1 5 の外側の表面 5 3 6 は、測定対象に向けられる。磁気光学層 5 1 5 が凸状の曲面状に形成されていることは、光が曲面で集光されるためセンサ光の体積が縮小される結果、従来よりも分解能を高めることができ好ましい。

【 0 0 7 4 】

次に、本発明の第 4 の実施の形態に係る磁界測定システムの動作を説明する。連続レーザ光源 5 0 0 は、レーザ光を出射する。ファイバアンプ 5 0 2 は、そのレーザ光を増幅する。偏光コントローラ 5 0 3 は、そのレーザ光の偏光面を制御する。光サーキュレータ 5 0 4 は、レーザ光を磁界センサ 5 0 5 へ出射する。光ファイバ 5 1 2 のコア層 5 1 4 を進んだレーザ光 (5 3 1) は、磁気光学層 5 1 5 の底面において、磁気光学層 1 1 5 の屈折率と空気の屈折率との差により反射される。このとき、磁気光学層 5 1 5 の屈折率は、回路基板 5 1 0 から発生する磁界により変化する。それに伴い、その磁気光学層 5 1 5 中を伝搬するレーザ光の偏光状態は、その外部磁界の強さに応じた変調を受けている。光サーキュレータ 5 0 4 は、変調され反射してきたレーザ光 (5 3 2) を再び光ファイバ 5 0 1 へ戻す。検光子 5 0 6 は、そのレーザ光を強度変調光に変換する。ファイバアンプ 5 0 7 は、変換後のレーザ光を増幅する。フォトディテクタ 5 0 8 は、増幅されたレーザ光を電気信号に変換する。スペクトラムアナライザ 5 0 9 は、その電気信号を検出する。スペク

10

20

30

40

50

トラムアナライザ509で検出される電気信号のピークは、外部磁界に起因する信号に対応する。本システムの原理上、外部磁界の強さに応じてその信号の強度が異なる。そのため、回路基板510上の磁界センサ505の位置を変えることにより磁界分布が得られる。

【0075】

磁界センサの空間分解能は磁気光学層515内を伝搬するセンサ光（レーザ光）の体積によって決まる。センサ光（レーザ光）の体積が小さいほど高空間分解能となる。

このうち、高さ方向の分解能は磁気光学層515の厚さで定まるため、薄いことが望ましい。従来はバルクの磁気光学部材を加工により薄層化して、光ファイバーの先端に接着させていた。バルク部材の加工による薄層化は10 μ m程度が加工上の限界である。そのため、高さ方向の分解能を高めることは困難であった。しかし、本発明では、研磨により凸状の曲面に加工された光ファイバ512の先端に、磁気光学層515を直接に薄膜で形成する。したがって、加工限界の10 μ mに制限されることなく、磁気光学層515の厚さをより薄くすることができる。それにより、高さ方向分解能を向上させることができる。磁気光学層515の厚さとしては、例えば、1 μ m以上8 μ m以下が好ましい。1 μ m以上より薄いと、磁界計測に十分なS/N比を得ることができなくなる。8 μ m以下であれば好ましい高分解能が得られる。

【0076】

また、水平方向の分解能は磁気光学層515中を伝搬するレーザ光の径で定まるため、光径が絞り込まれることが望ましい。従来は上述のように接着層が存在していたため光径を十分に絞れなかった。本発明では、上述のように、光ファイバ512の先端に磁気光学層515を直接に薄膜で形成しているので、接着層を用いる必要がない。したがって、接着層に妨害されることなく、レーザ光の径を絞り込むことができる。それにより、水平方向分解能を向上させることができる。

以上のように、高さ方向及び水平方向の分解能を向上することで磁界センサ505の空間分解能の高分解能化を実現した。

【0077】

次に、本発明の第1の実施の形態に係る磁界センサの製造方法を説明する。

磁気光学層515は、エアロゾルデポジション法により形成した。エアロゾルデポジション法は、まず、超微粒子をエアロゾル発生器に充填する。次に、キャリアガス（例示：窒素、空気）をエアロゾル発生器に導入して超微粒子を均一に分散させたエアロゾルを作り出す。続いて、そのエアロゾルを成膜室に搬送してノズルから基板に向かって噴射し堆積させる。これにより、所望の膜が成膜される。このとき、超微粒子（脆性材料）は機械的衝撃力が付加されて基板に到達するので、基板上で粉碎されながら、堆積する。

【0078】

図17は、本発明の磁界センサの実施の形態の製造方法を示すフローチャートである。まず、エアロゾルデポジション法による成膜に用いる基板を準備する（ステップS01）。基板は、光ファイバ512を用いる。成膜面は、光ファイバ512の端部の端面535である。光ファイバ512の端部を、研磨により凸状の曲面に加工して形成する。次に、エアロゾルデポジション法による成膜を行う（ステップS02）。エアロゾルデポジション法による磁気光学層515の成膜条件は、以下のとおりである。磁気光学層515の成膜の膜厚は4000nmとした。原料粉末はBi置換YIG（イットリウム - 鉄 - ガーネット）、キャリアガスは酸素をそれぞれ用いた。基板（光ファイバ512の端面535）に対するノズルの入射角を30度、ガス流量を8リットル/分、ノズル基板間距離を5mm、成膜速度を1.0 μ m/min、加振器の振動数を250rpmとして成膜した。

【0079】

その後、熱処理を含む以下の処理を行った（ステップS03）。すなわち、成膜後、磁気光学層515を大気中で、600、15分間程度熱処理した。この熱処理により、磁気光学層515の磁気光学効果を発現させた。ファラデー回転角は7deg/mmであった。熱処理後、磁気光学層515の膜の表面536の凹凸を除去するために、膜厚360

10

20

30

40

50

0 nmまで研磨し、平坦化した。

以上の製造方法により、磁界センサ505が形成された。

【0080】

上記の説明では、磁気光学層515の組成としてBi置換YIGの場合を説明した。しかし、この組成に限定されるものではなく、例えば、Ceを添加した組成であっても良い。また、YIG系の材料以外にも、磁気光学効果の大きいスピネル構造、ヘキサゴナル構造のいずれかを有するフェライト等も有効な材料である。さらに、磁気光学層として鉄、ニッケル、コバルトのいずれかを含有する強磁性膜の極薄層を用いることができる。

【0081】

本発明では、磁気光学層515の成膜にエアロゾルデポジション法を用いていることも発明の特徴のひとつである。その理由は以下による。本発明の目的の一つは、高分解能な磁界センサを提供することにある。そのためには、加工された光ファイバの先端に磁気光学層515を直接薄膜で形成することが重要である。また、磁界計測に十分なS/N比を得るためには、その膜厚は1 μm以上であることが望ましい。1 μmの強誘電体透明膜をガラス、プラスチックや高分子を含む樹脂や任意の組成の誘電体上に実現できるのは、現在の技術ではスパッタ法でもゾル・ゲル法でも不可能であり、ただエアロゾルデポジション法でのみ可能である。

【0082】

図11は、本発明の磁界センサと従来の磁界センサを用いて測定した磁界分布の一例を示すグラフである。曲線A4は本発明の磁界センサを用いた場合であり、曲線B4は従来の磁界センサを用いた場合である。横軸は位置を示し、縦軸は磁界強度に対応する電気信号を示す。磁界分布の測定は、配線幅/間隔5 μmの3線ミアンダ配線上空で行った。ミアンダ配線には10 MHz、15 dBmの信号を印加した。磁界センサをミアンダ配線上空10 μmの位置に配置し、ミアンダ配線を横断する方向に1 μmピッチで走査させたときに得られた磁界分布である。従来の磁界センサの場合、隣接配線間で観測されるはずの磁界ピークが観察されなかった(曲線B4)。一方、本発明の磁界センサの場合、磁界ピークが明瞭に観測されている(曲線A4)。この結果から、本発明の磁界センサが従来の磁界センサよりも高空間分解能であることが分かる。

【0083】

本発明により、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

【0084】

(第5の実施の形態)

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第5の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして磁界センサ、電磁界測定システムについて磁界センサを用いる磁界測定システムについて説明する。

【0085】

本実施の形態では、磁界測定システムは基本的に第4の実施の形態の磁界測定システム520と同様である。しかし、本実施の形態の磁界測定システムにおける磁界センサ605の構成が、第4の実施の形態の磁界センサ505の構成と異なる。

【0086】

図12は、本発明の第5の実施の形態に係る磁界センサの構成を示す断面図である。磁界センサ605は光ファイバ612、磁気光学層615を備える。光ファイバ612は、クラッド層613及びコア614層を含む。光ファイバ612は、一方の端部を光サーキュレータ504に接続されている。他方の端部は、円錐631を形成されている。ただし、正確に円錐状の形状でなくても良く、端部を加熱中の引張り操作により伸張した場合にできる概ね円錐状の形状であれば良い。その円錐631の先端部の側面(曲面)635には、微小な磁界検知素子である磁気光学層615が直接形成されている。磁気光学層615の外側の表面636は、測定対象に向けられる。磁界センサ605のその他の構成については、第4の実施の形態と同様である。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 7 】

次に、本発明の第 5 の実施の形態に係る磁界測定システムの動作については、磁界センサ 6 0 5 を用いる他は、第 4 の実施の形態と同様である。

【 0 0 8 8 】

この場合にも、第 4 の実施の形態と同様の効果を得ることができる。更に、本実施の形態の磁界センサ 6 0 5 は、凸状の曲面 5 3 5 に加工された光ファイバ 5 1 2 の先端に磁気光学層 5 1 5 を形成して作製する第 4 の実施の形態の磁界センサ 5 0 5 よりも、さらにレーザー光を集光することが可能である。そのため、第 4 の実施の形態の磁界センサ 5 0 5 よりも高空間分解能となる。

【 0 0 8 9 】

光ファイバの端部の形状は、第 4 の実施の形態や本実施の形態に限定されるものではない。その形状は、光ファイバ 6 1 2 の先端部のように、端部で反射したレーザー光が集光しやすい形状であることが好ましい。これにより、測定に寄与するレーザー光が増え、磁界センサの感度や S / N 比を向上することができる。

【 0 0 9 0 】

次に、本発明の第 5 の実施の形態に係る磁界センサの製造方法については、光ファイバ 6 1 2 を用いる他は図 1 7 に示す第 4 の実施の形態と同様である。ただし、基板としての光ファイバ 6 1 2 の端部は、以下のようにして加工される。まず、端部を加熱し、その加熱中の端部を引張り操作により伸張させて、適当な位置にて切断する。その後、その先端部を研磨により鋭利に尖らせて形成した。この場合にも、第 4 の実施の形態と同様の効果を得ることができる。

【 0 0 9 1 】

図 1 3 は、本発明の磁界センサと従来の磁界センサを用いて測定した磁界分布の一例を示すグラフである。曲線 A 5 は本発明の磁界センサを用いた場合であり、曲線 B 4 は従来の磁界センサを用いた場合である。なお、曲線 A 4 は、図 1 1 で説明したものと同一である。横軸は位置を示し、縦軸は磁界強度に対応する電気信号を示す。磁界分布の測定は、配線幅 / 間隔 5 μm の 3 線ミアンダ配線上空で行った。ミアンダ配線には 1 0 M H z 、 1 5 d B m の信号を印加した。磁界センサをミアンダ配線上空 1 0 μm の位置に配置し、ミアンダ配線を横断する方向に 1 μm ピッチで走査させたときに得られた磁界分布である。従来の磁界センサの場合、隣接配線間で観測されるはずの磁界ピークが観測されなかった（曲線 B 4）。一方、本発明の磁界センサの場合、磁界ピークが明瞭に観測されている（曲線 A 5）。この結果から、本発明の磁界センサが従来の磁界センサよりも高空間分解能であることが分かる。さらに、第 4 の実施の形態に記載の磁界センサ 5 0 5 を用いた場合（曲線 A 4）よりも中央部 2 箇所磁界ピークの相対強度が強い。図 1 3 は、本実施の形態の磁界センサ 6 0 5 が第 4 の実施の形態に記載の磁界センサ 5 0 5 よりも高空間分解能であることを示している。

【 0 0 9 2 】

また、本発明の電界センサの実施の形態で説明された内容と同様の効果により、磁気光学層の上あるいは上下に誘電体多層膜反射層を形成することにより本発明の磁界センサをより高感度とすることができる。

【 0 0 9 3 】

本発明により、より小型で高空間分解能で、L S I チップ / パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

【 0 0 9 4 】

（第 6 の実施の形態）

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第 6 の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして磁界センサ、電磁界測定システムについて磁界センサを用いる磁界測定システムについて説明する。

【 0 0 9 5 】

本実施の形態では、磁界測定システムは基本的に第 4 の実施の形態の磁界測定システム

10

20

30

40

50

520と同様である。ただし、1点ごとの磁界測定ではなく、磁界センサ505を複数本束ねて複数点の磁界測定を一度に行う点で第4の実施の形態と異なる。

【0096】

複数点での磁界測定の方法としては、例えば、磁界測定システム520を複数用意し、それらに属する複数の磁界センサ505を束ねる方法が考えられる。図14は、第1の実施の形態の磁界センサ505を複数本束ねて形成された磁界センサ805の一例を示す図である。磁気光学層515の側から見た図である。磁界センサ900は、一次元的に並んだ複数の磁界センサ505が、更に、二次元的に最密充填になるように(千鳥状、蜂の巣状)に束ねられている。そして、各磁界測定システム520のスペクトラムアナライザ509からのデータを一台のコンピュータ(図示されず)で処理するようにする。

10

【0097】

磁界センサ505をこのように束ねた磁界センサ900を用いて磁界強度を測定することで、従来より極めて短時間で、走査させずに高分解能な磁界強度の二次元分布を得ることが可能となる。

【0098】

磁界センサは、単に一次元的に一列に並んだ複数の磁界センサ505だけであっても良い。その場合、束ねた方向に対して垂直な方向へ、狭ピッチで走査させることにより、従来より短時間で高分解能な磁界強度の二次元分布を得ることができる。

【0099】

また、磁界測定システム520は一つで、磁界センサとして磁界センサ900を用いても良い。その場合、光サーキュレータ504と磁界センサ900との間に、レーザ光が入射する磁界センサ900内の磁界センサ505を連続的に切り替えるレーザ切替部(図示されず)を設ける。このようにすることで、一つの磁界測定システム520で連続的に高分解能な磁界強度の二次元分布を測定することも可能である。

20

【0100】

また、複数の光ファイバを束ねた磁界センサ900では、それを構成する個々の磁界センサ505間の平均信号の検出を行うことにより、ノイズを平均化することができる。それにより、S/N比を高めることができる。平均信号の検出は、スペクトラムアナライザ109に内蔵された情報処理装置や、スペクトラムアナライザ109に接続された情報処理装置(後述)において、そのプログラムにより行う。平均信号の検出方法は、第3の実施の形態(図16、図18)で説明したとおりである。

30

【0101】

その他の構成、動作、製造方法については、第4の実施の形態と同様である。

【0102】

なお、本実施の形態の磁界センサは、第4の実施の形態の磁界センサを複数本束ねて形成されている。しかし、束ねる磁界センサを磁界測定システムの第5の実施の形態の磁界センサとしてもよい。また、束ねる磁界センサは磁界測定システムの第4の実施の形態、第5の実施の形態の磁界センサに限定されるものではない。例えば、磁気光学層が平坦な光ファイバ端面上に形成されている磁界センサであってもよい。

【0103】

本発明により、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

40

【0104】

(第7の実施の形態)

本発明の電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムの第7の実施の形態について、添付図面を参照して説明する。ここでは、電磁界センサとして電界センサ及び磁界センサを用いる磁界測定システムについて説明する。

【0105】

本実施の形態では、電磁界測定システムは基本的に第1の実施の形態の電界測定システム120又は第4の実施の形態の磁界測定システム520と同様である。ただし、1点ご

50

との電界測定及び磁界測定ではなく、電界センサ105及び磁界センサ505を複数本束ねて複数点の電界測定及び磁界測定を一度に行う点で第1の実施の形態の電界測定システム120又は第4の実施の形態の磁界測定システム520と異なる。

【0106】

複数点での電界測定及び磁界測定の方法としては、例えば、電界測定システム120及び磁界測定システム520を複数用意し、それらに属する複数の電界センサ105及び磁界センサ505を束ねる方法が考えられる。図15は、電界センサ105及び磁界センサ505を複数本束ねて形成された電磁界センサ905の一例を示す図である。電気光学層115及び磁気光学層515の側から見た図である。電磁界センサ905は、一次元的に交互に並んだ複数の電界センサ105及び磁界センサ505が、更に、二次元的に最密充填になるように(千鳥状、蜂の巣状)に束ねられている。そして、各電界測定システム120及び磁界測定システム520のスペクトラムアナライザ109及びスペクトラムアナライザ509からのデータを一台のコンピュータ(図示されず)で処理するようにする。

10

【0107】

電界センサ105及び磁界センサ505をこのように束ねた電磁界センサ905を用いて電界強度及び磁界強度を測定することで、従来より極めて短時間で、高分解能な電界強度及び磁界強度の二次元分布(高空間分解能電磁界マップ)を得ることが可能となる。

【0108】

電磁界センサ905は、単に一次元的に一列に並んだ複数の電界センサ105及び磁界センサ505だけであっても良い。その場合、束ねた方向に対して垂直な方向へ、狭ピッチで走査させることにより、従来より短時間で高分解能な電界強度及び磁界強度の二次元分布(高空間分解能電磁界マップ)を得ることができる。

20

【0109】

また、一つの磁界測定システム520が磁界センサとして電磁界センサ905の複数の磁界センサ505を用い、一つの電界測定システム120が電界センサとして電磁界センサ905の複数の電界センサ105を用いても良い。その場合、光サーキュレータ104と電磁界センサ905の複数の電界センサ105との間、及び、光サーキュレータ504と電磁界センサ905の複数の磁界センサ505との間に、レーザー光が入射する電界センサ105又は磁界センサ505を連続的に切り替えるレーザー切替部(図示されず)を設ける。このようにすることで、一つの磁界測定システム520及び一つの電界測定システム120で連続的に高分解能な電磁界強度の二次元分布を測定することも可能である。

30

【0110】

また、一つの電磁界測定システム(磁界測定システム520又は電界測定システム120)が、電磁界センサ905の複数の電界センサ105及び磁界センサ505を用いても良い。その場合、光サーキュレータ104又は光サーキュレータ504と電磁界センサ905との間に、レーザー光が入射する電界センサ105及び磁界センサ505を連続的に切り替えるレーザー切替部(図示されず)を設ける。このようにすることで、一つの電磁界測定システムで連続的に高分解能な電磁界強度の二次元分布を測定することも可能である。

【0111】

また、複数の光ファイバを束ねた電磁界センサ905では、それを構成する個々の電界センサ105間の平均信号及び個々の磁界センサ505間の平均信号の検出を行うことにより、ノイズを平均化することができる。それにより、電界強度及び磁界強度のそれぞれのS/N比を高めることができる。平均信号の検出は、スペクトラムアナライザ109やそれに接続されたコンピュータ(図示されず)において、そのプログラムにより行う。平均信号の検出方法は、第3の実施の形態で説明したとおりである。

40

【0112】

その他の構成、動作、製造方法については、第1の実施の形態、第4の実施の形態と同様である。

【0113】

なお、本実施の形態の電磁界センサは、第1の実施の形態の電界センサ及び第4の実施

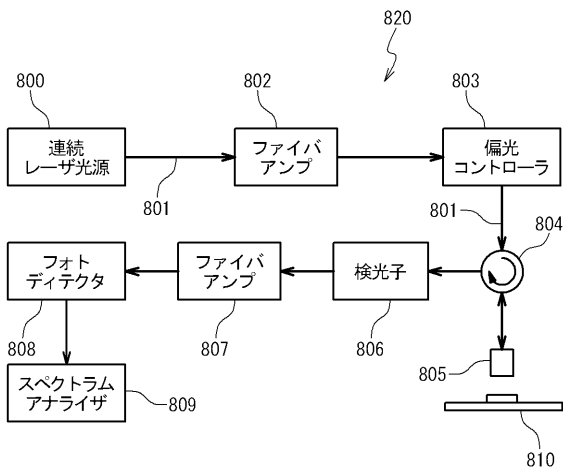
50

の形態の磁界センサを複数本束ねて形成されている。しかし、束ねる電界センサを第2の実施の形態の電界センサ、束ねる磁界センサを第5の実施の形態の磁界センサとしてもよい。また、束ねる電界センサは第1、第2の実施の形態の電界センサに限定されるものではない。同様に、束ねる磁界センサは第4、5の実施の形態の磁界センサに限定されるものではない。例えば、電気光学層が平坦な光ファイバー端面上に形成されている電界センサであってもよい。磁気光学層が平坦な光ファイバー端面上に形成されている磁界センサであってもよい。

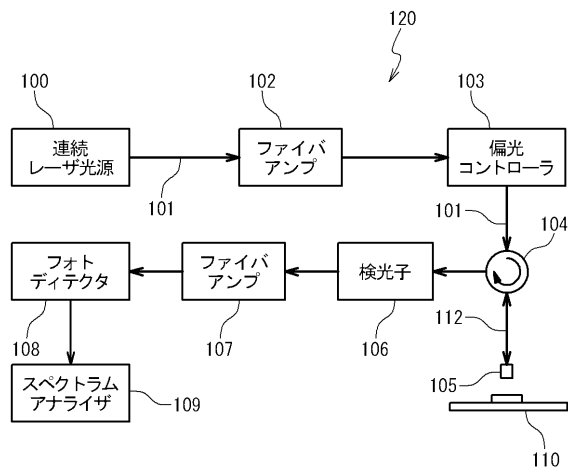
【0114】

本発明により、より小型で高空間分解能で、LSIチップ/パッケージの微細領域に適用可能な電磁界センサとそれを用いた電磁界測定システムを得ることができる。

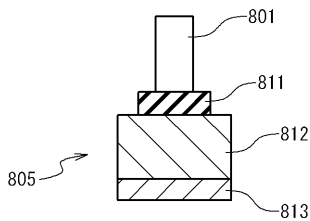
【図1A】



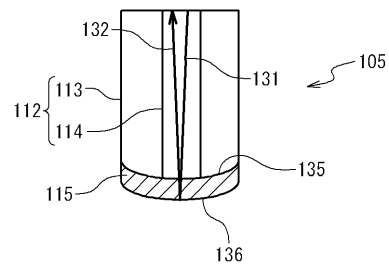
【図2A】



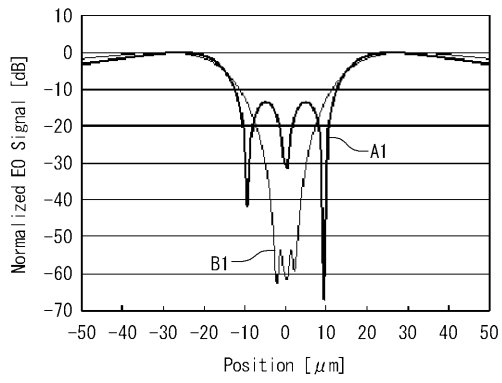
【図1B】



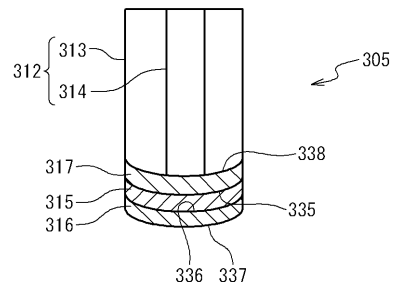
【図2B】



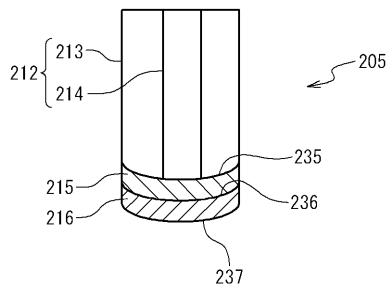
【 図 3 】



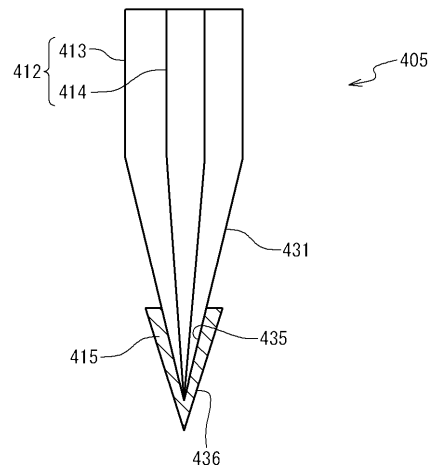
【 図 5 】



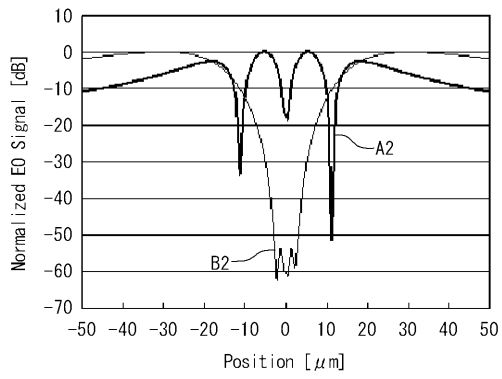
【 図 4 】



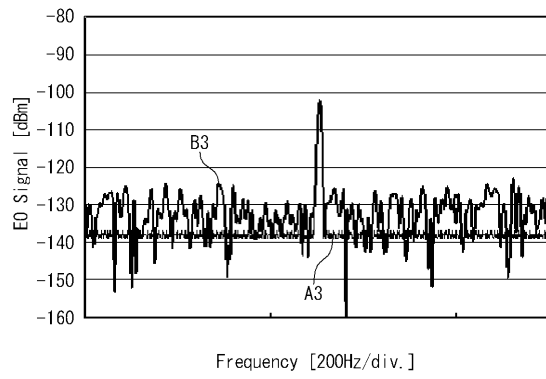
【 図 6 】



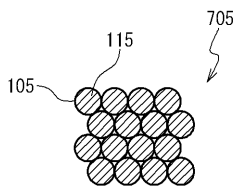
【 図 7 】



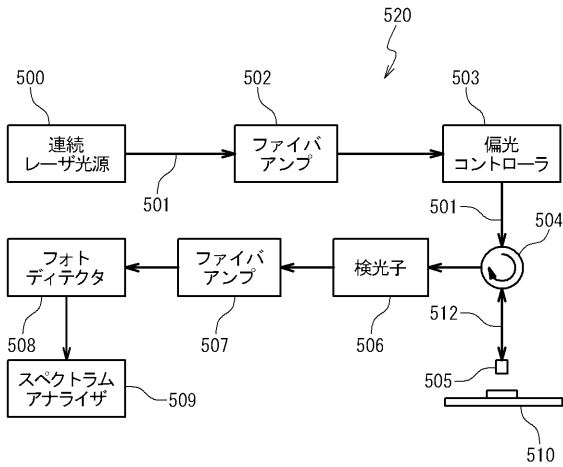
【 図 9 】



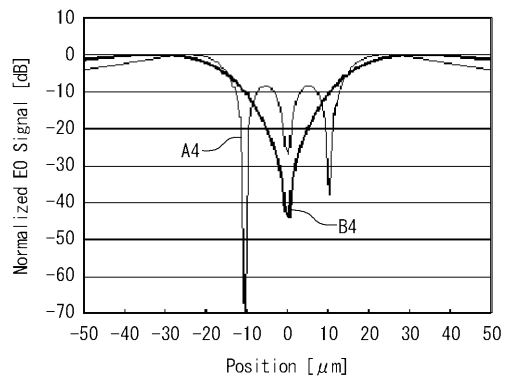
【 図 8 】



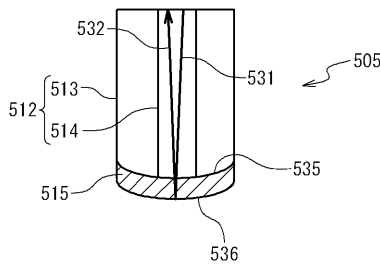
【図10A】



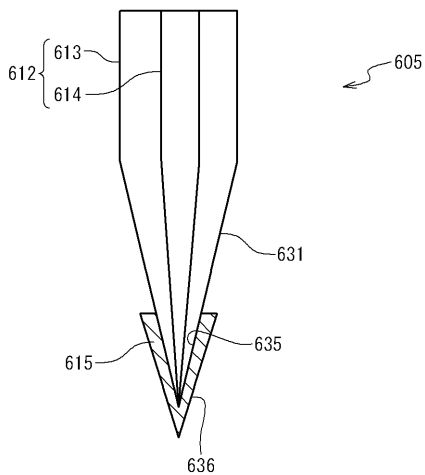
【図11】



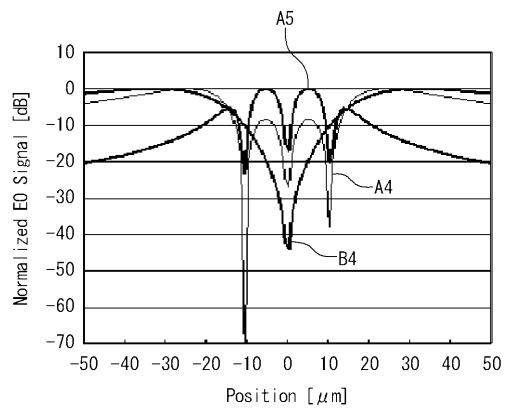
【図10B】



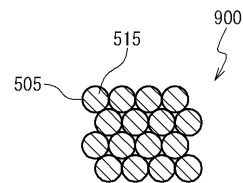
【図12】



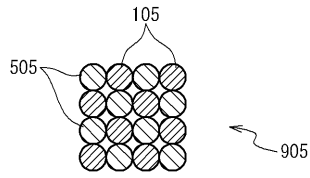
【図13】



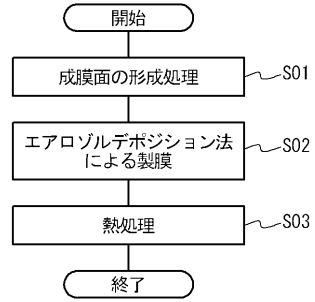
【図14】



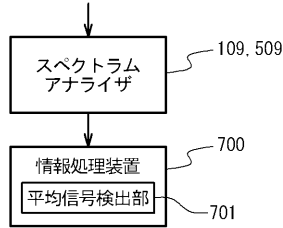
【図15】



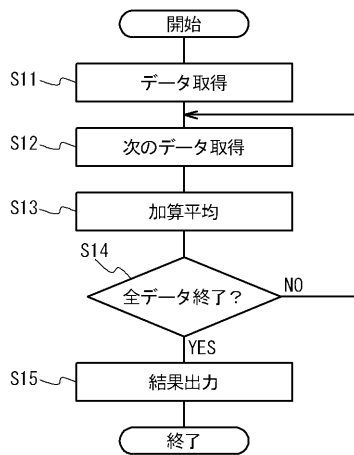
【図17】



【図16】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 大橋 啓之
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

審査官 中村 直行

(56)参考文献 特開平07-244086(JP,A)
特開平02-186282(JP,A)
特開平02-291984(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01R 29/00 - 29/26