

(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
2022年10月6日(06.10.2022)



(10) 国際公開番号

WO 2022/210695 A1

(51) 国際特許分類:
G01R 33/20 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2022/015393

(22) 国際出願日: 2022年3月29日(29.03.2022)

(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 2021-059798 2021年3月31日(31.03.2021) JP

(71) 出願人: 住友電気工業株式会社
(SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.)
[JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北
浜四丁目5番33号 Osaka (JP). 日新電機
株式会社(NISSIN ELECTRIC CO., LTD.) [JP/

JP]; 〒6158686 京都府京都市右京区梅津
高畝町4 7 番地 Kyoto (JP).

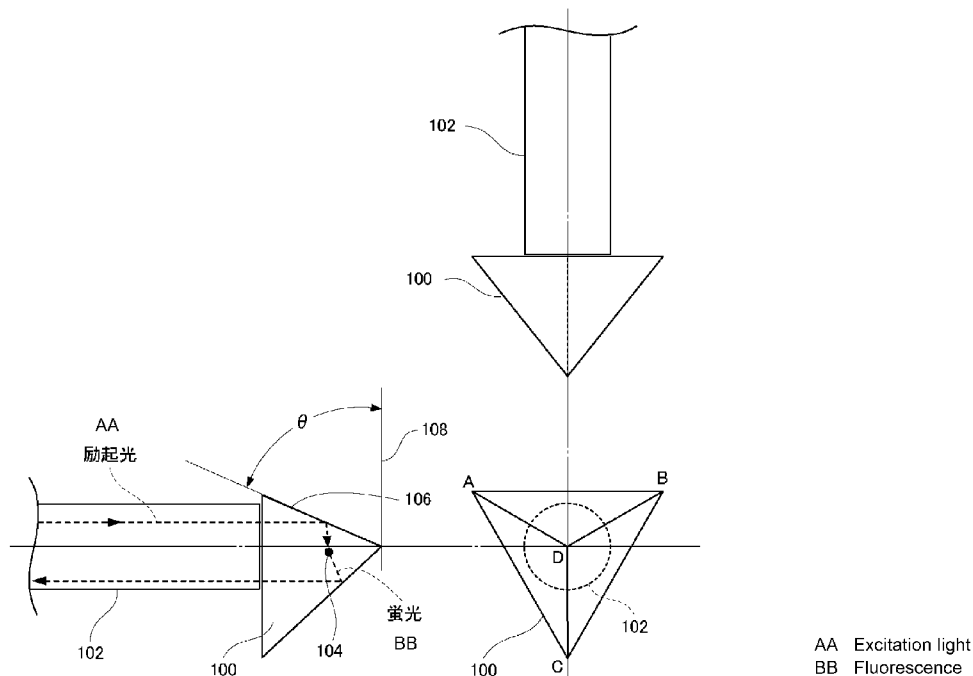
(72) 発明者: 出口 洋成 (DEGUCHI, Hiroshige);
〒6158686 京都府京都市右京区梅津高畝町4 7
番地 日新電機株式会社内 Kyoto (JP). 辰巳 夏
生(TATSUMI, Natsuo); 〒6158686 京都府京都
市右京区梅津高畝町4 7 番地 日新電機株式
会社内 Kyoto (JP). 林 司(HAYASHI, Tsukasa);
〒6158686 京都府京都市右京区梅津高畝町4
7 番地 日新電機株式会社内 Kyoto (JP). 西
林 良樹(NISHIBAYASHI, Yoshiki); 〒5410041
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
住友電気工業株式会社内 Osaka (JP).

(74) 代理人: 清水 敏, 外 (SHIMIZU, Satoshi et al.);
〒5300002 大阪府大阪市北区曽根崎新地二丁

(54) Title: DIAMOND MAGNETO-OPTICAL SENSOR

(54) 発明の名称: ダイヤモンド光磁気センサ

[図4]



(57) Abstract: Provided is a diamond magneto-optical sensor including: a diamond that has a color center having an electron spin; and a reflective surface that reflects excitation light propagating through an optical system and entering the inside of the diamond. The reflective surface reflects synchrotron radiation emitted from the color center excited by the excitation light and focuses the synchrotron radiation in the direction toward the optical system.



目 5 番 3 号 堂 島 T S S ビル 4 階 堂 島 特 許
事務所北新地支所内 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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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：

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約：ダイヤモンド光磁気センサは、電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、光学系を介して伝搬され、ダイヤモンドの内部に入射する励起光を反射する反射面とを含み、反射面は、励起光により励起されたカラーセンタから放射される放射光を反射して光学系の方向に集光する。

明 細 書

発明の名称：ダイヤモンド光磁気センサ

技術分野

[0001] 本開示は、ダイヤモンド光磁気センサに関する。本出願は、2021年3月31日出願の日本出願第2021-059798号に基づく優先権を主張し、前記日本出願に記載された全ての記載内容を援用するものである。

背景技術

[0002] ダイヤモンドのNV中心（以下、NVセンタという）を用いた光磁気センサが知られている。ダイヤモンド中の炭素の置換位置に入った窒素と、その窒素に隣接する空孔から成るNVセンタは負に帯電すると、その基底状態は三重項状態（即ち、スピン S が $S=1$ ）になる。そのNVセンタを波長532nm（即ち緑色光）により励起すると波長637nm（即ち赤色光）の蛍光を発する。蛍光の発光強度はスピン状態により変化し、スピン状態はNVセンタに印加された磁界とマイクロ波又はラジオ波とによる磁気共鳴で変化するため、ダイヤモンド光磁気センサとして利用できる。

[0003] ダイヤモンド光磁気センサは、NVセンタを含有したダイヤモンド基板と、光源からの励起光を伝送してNVセンタに照射する光学系と、NVセンタからの蛍光を集光して光検出器に伝送する光学系と、電源からのマイクロ波を伝送してNVセンタに照射する導波路から構成される。

[0004] 例えば、下記非特許文献1には、コプレーナ導波路にダイヤモンドセンサを載せてマイクロ波を照射する構成が開示されている。ダイヤ基板の形状は直方体であり、励起光はダイヤ基板の横から照射され、蛍光はダイヤ基板の上から集光される。

先行技術文献

非特許文献

[0005] 非特許文献1：増山雄太、波多野雄治、岩崎孝之、波多野睦子、“コプレーナ導波路を用いた高感度マクロダイヤモンド磁力計”、第79回応用物理学会

秋季学術講演会講演予稿集（発行日：2018年9月5日）

発明の概要

[0006] 本開示のある局面に係るダイヤモンド光磁気センサは、電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、光学系を介して伝搬され、ダイヤモンドの内部に入射する励起光を反射する反射面とを含み、反射面は、励起光により励起されたカラーセンタから放射される放射光を反射して光学系の方向に集光する。

[0007] 本開示の別の局面に係るダイヤモンド光磁気センサは、電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、光学系を介して伝搬される励起光をダイヤモンドの内部に入射できる微小部分と、微小部分から入射した励起光により励起されたカラーセンタから放射される放射光を反射して、受光素子に導く受光光学系の方向に集光する反射面とを含み、反射面は、微小部分よりも大きな面積を持ち、同一位置から異なる方向に放射された放射光を、複数の光路により受光光学系まで導く。

図面の簡単な説明

- [0008] [図1]図1は、Ib型ダイヤモンドに関する光の透過率を示すグラフである。
- [図2]図2は、スピン検出コントラスト比と励起光のパワー密度との関係を示すグラフである。
- [図3]図3は、本開示の実施形態に係るダイヤモンド光磁気センサを示す斜視図である。
- [図4]図4は、図3に示したダイヤモンド光磁気センサと光ファイバとの配置を示す三面図である。
- [図5]図5は、ダイヤモンド光磁気センサと光ファイバとの間に集光素子を配置する構成を示す側面図である。
- [図6]図6は、ダイヤモンド光磁気センサに入射されるNVセンタの励起光の光路を示す模式図である。
- [図7]図7は、ダイヤモンド光磁気センサのNVセンタから放射される蛍光の光路を示す模式図である。

[図8]図8は、屈折率を考慮せずにダイヤモンドから放射される蛍光の光路を示す模式図である。

[図9]図9は、屈折率を考慮してダイヤモンドから放射される蛍光の光路を示す模式図である。

[図10]図10は、反射鏡を設けた場合にダイヤモンドから放射される蛍光の光路を示す模式図である。

[図11]図11は、コーナーキューブ形状のダイヤモンドから放射される蛍光の光路を示す模式図である。

[図12]図12は、第1変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す断面図である。

[図13]図13は、第2変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す二面図である。

[図14]図14は、図13とは別の第2変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す斜視図である。

[図15]図15は、第3変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す側面図である。

[図16]図16は、第4変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す斜視図である。

[図17]図17は、第5変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す斜視図である。

[図18]図18は、図17に示したダイヤモンド光磁気センサと光ファイバとの配置を示す三面図である。

[図19]図19は、先端部の形状が図17に示したダイヤモンド光磁気センサと異なるダイヤモンド光磁気センサを示す断面図である。

[図20]図20は、第6変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す斜視図である。

[図21]図21は、先端部の形状が図20に示したダイヤモンド光磁気センサと異なるダイヤモンド光磁気センサを示す断面図である。

[図22]図22は、第7変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す斜視図である。

[図23]図23は、先端部の形状が図22に示したダイヤモンド光磁気センサと異なるダイヤモンド光磁気センサを示す断面図である。

[図24]図24は、第8変形例に係るダイヤモンド光磁気センサの構成を示す斜視図である。

[図25]図25は、先端部の形状が図24に示したダイヤモンド光磁気センサと異なるダイヤモンド光磁気センサを示す断面図である。

[図26]図26は、励起光及び蛍光を空間伝送する構成の一例を示す模式図である。

[図27]図27は、実施例1の構成を示す模式図である。

[図28]図28は、図27に示したマイクロ波照射部の構成を示す斜視図である。

[図29]図29は、実験結果を示すグラフである。

[図30]図30は、比較結果を示すグラフである。

[図31]図31は、実施例2の構成を示す模式図である。

発明を実施するための形態

[0009] [本開示が解決しようとする課題]

光源からの励起光を伝送してNVセンタに照射する光学系は、NVセンタのスピンの状態を初期化し、その後の変化を読み取るため励起光を照射する。光磁気センサとして速い応答性と高い感度を得るためには、NVセンタに対して励起光の照射をできるだけ均一、強力且つ広範囲に行う必要がある。

[0010] NVセンタからの蛍光を集光して光検出器に伝送する光学系は、NVセンタのスピンの状態により変化する蛍光を集光する。光磁気センサとして速い応答性と高い感度を得るためには、NVセンタからの蛍光をできるだけ広範囲から高い効率で集光する必要がある。

[0011] 即ち、ダイヤモンドのNVセンタから放射される蛍光の集光効率、NVセンタを励起する励起光の吸収効率、及び、励起光の照射パワー密度をより向

上でできれば好ましい。各課題に関して以下に具体的に説明する。

[0012] (蛍光の集光効率)

蛍光を伝送する光ファイバのコアの直径を ϕ_c 、開口数を N_c とし、ダイヤモンドの屈折率を n 、ダイヤモンド内部の NV センタからの蛍光を集光可能なエリアの直径を ϕ_d 、集光可能な深さを d_d 、集光可能な開口数を N_d とする。ここで、 ϕ_d と N_d との積については、ラグランジュの不変量の法則とダイヤモンド表面での屈折のため、

$$\phi_d \times N_d < \phi_c \times N_c / n \quad (\text{式 1})$$

による制限がある。また、 d_d については、

$$d_d = \phi_d / N_d \quad (\text{式 2})$$

となる。例えば、光ファイバの端部において、ダイヤモンドをコアに密着させて配置した場合、 $\phi_c = \phi_d$ と考えることができ、式 1 から、

$$N_d < N_c / n \quad (\text{式 3})$$

が導かれる。

[0013] 市販されている光ファイバの開口数 N_c は約 0.07 から約 0.5 の範囲である。その中でも開口数の大きい（例えば $N_c = 0.5$ ）光ファイバを選んで用いたとしても、ダイヤモンドの屈折率 n が約 2.5 であることから、式 3 から、集光可能な開口数 N_d は、 $N_d < 0.2$ となる。したがって、NV センタからの蛍光は概ね全天周にランダムに放射されると考えると、光ファイバのコアの端面に到達して光ファイバを伝送される蛍光の集光率 η は、全天周の立体角 $4\pi \text{ sr}$ （ステラジアン）に対して、

$$\eta \doteq (0.2 \times 0.2 \times \pi) / (4 \times \pi) = 0.01 \quad (\text{式 4})$$

となり、最大でも 1% の効率に留まる。

[0014] 例えば、ダイヤモンドと光ファイバの端面のコアとの間に対物レンズを配置して集光することが考えられる。その場合、対物レンズの開口数を N_t とすると、光学系の倍率を N_t / N_c としたときに効率は最大になる。しかし、その場合にも、 $\phi_d = N_c \times \phi_c / N_t$ となり、上記の式 1 から、開口数 N_d には、

$$N_d < N_t / n \quad (\text{式 } 5)$$

の制限がある。対物レンズの開口数 N_t は大きいものでも約 1 強に留まるため、開口数 N_c の大きい（例えば $N_c = 0.5$ ）光ファイバと組み合わせたとしても、ダイヤモンドの屈折率 n が約 2.5 であるので、式 5 から、 $N_d < 0.4$ となる。したがって、光ファイバのコアの端面に到達して光ファイバを伝送される蛍光の集光率 η は、

$$\eta \doteq (0.4 \times 0.4 \times \pi) / (4 \times \pi) = 0.04 \quad (\text{式 } 6)$$

となり、最大でも 4 % の効率に留まる。

[0015] このように、高電圧の電力機器での計測に便利のように、NV センタから光検出器への蛍光の伝送に光ファイバを用いると、NV センタからの蛍光の集光率は、せいぜい数 % 程度の低い効率に留まる。

[0016] ダイヤモンド光磁気センサの感度 δB （即ち検出磁場 B の分解能）の理論式として、下記の式 7 が知られている。

[0017] [数 1]

$$\delta B \sim \frac{1}{\gamma \sqrt{\eta}} \frac{1}{C} \frac{1}{\sqrt{N T_2}} (T / \sqrt{\text{Hz}}) \quad (\text{式 } 7)$$

[0018] 式 7 中、 γ は磁気回転比（即ち定数）であり、電子の磁気回転比（ $1.76 \times 10^{11} \text{ rad/s/T}$ ）に近い値である。 η は蛍光の検出効率、即ち集光効率であり、上記のように、数 % に留まる。 C は、後述するスピン検出コントラスト比（即ち赤色光輝度の低下率）である。 N は励起光が照射され、且つ、蛍光が集光されるエリアに存在する負の電荷を持った NV センタの数である。 T_2 は電子スピンの横緩和時間である。上記の感度の理論式（式 7）から、また光磁気センサでは光量子雑音が測定感度の限界を決めることから、蛍光の集光効率 η が高いことが好ましいが、上記したように、蛍光の集光効率は数 % と、十分ではない。

[0019] （励起光の吸収効率）

NV センタのスピン状態を初期化し、その後の変化を読取るために、波長

532 nmの励起光を照射する。励起光の光源には緑色光の半導体レーザ、又は、YAGの2倍波の固体レーザが使い易い。ダイヤモンドは、不純物の有無、不純物の種類に応じて分類される。そのうち、不純物として窒素原子を含有する（即ち、NVセンタを有する）Ib型は、ダイヤモンドの種類の中で比較的黄色く見えて透過率が低い。Ib型ダイヤモンドに関する光の透過率を図1に示す。縦軸は透過率（%）を表し、横軸は波長（ μm ）を表す。図1において、波長が1.0 μm を挟んで、横軸のスケールが異なる。図1から分かるように、Ib型ダイヤモンドであっても、波長532 nm（即ち0.532 μm ）の緑色光はある程度透過するので、ダイヤモンドに光を吸収させるのに要する吸収長は数mmを越える。ダイヤモンドの光路長が短い（例えば厚みが薄い）場合には、励起光の殆どが透過してしまうため、励起光の吸収効率が悪い。

[0020] （励起光の照射パワー密度）

Ib型のダイヤモンド基板中に形成したNVセンタに関して、スピン検出コントラスト比（即ち赤色光輝度の低下率）と励起光のパワー密度との関係を実験により評価した。その結果を図2に示す。図2において、縦軸はスピン検出コントラスト比を表し、横軸は励起光のパワー密度を表す。図2から分かるように、光磁気センサとして高い感度を得るために、スピン検出コントラスト比を0.06以上に大きくするには、20 mW/mm²以上のパワー密度で励起光を照射する必要があることが分かった。

[0021] また、Ib型のダイヤモンド基板中に形成したNVセンタに関して、マイクロ波の周波数変化に対する応答速度（具体的には時定数）と励起光のパワー密度との関係を実験により評価した。その結果、光磁気センサとして高い応答速度を得るためには、照射する励起光のパワー密度を高くする必要があることが分かった。

[0022] したがって、本開示は、蛍光の集光効率が高く、励起光の吸収効率及びパワー密度が高いダイヤモンド光磁気センサを提供することを目的とする。

[0023] [本開示の効果]

本開示によれば、蛍光の集光効率が高く、励起光の吸収効率及びパワー密度が高いダイヤモンド光磁気センサを提供できる。

[0024] [本開示の実施形態の説明]

本開示の実施形態の内容を列記して説明する。以下に記載する実施形態の少なくとも一部を任意に組み合わせてもよい。

[0025] (1) 本開示の第1の局面に係るダイヤモンド光磁気センサは、電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、光学系を介して伝搬され、ダイヤモンドの内部に入射する励起光を反射する反射面とを含み、反射面は、励起光により励起されたカラーセンタから放射される放射光を反射して光学系の方向に集光する。これにより、蛍光の集光効率、励起光の吸収効率及びパワー密度を向上できる。したがって、ダイヤモンド光磁気センサの応答性及び感度を向上できる。

[0026] (2) 励起光は、光ファイバの出力部からダイヤモンドに入射され、反射面は、放射光を、光ファイバの出力部に集光することができる。これにより、蛍光の集光効率、励起光の吸収効率及びパワー密度をより向上できる。したがって、ダイヤモンド光磁気センサの応答性及び感度をより向上できる。

[0027] (3) 本開示の第2の局面に係るダイヤモンド光磁気センサは、電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、光学系を介して伝搬される励起光をダイヤモンドの内部に入射できる微小部分と、微小部分から入射した励起光により励起されたカラーセンタから放射される放射光を反射して、受光素子に導く受光光学系の方向に集光する反射面とを含み、反射面は、微小部分よりも大きな面積を持ち、同一位置から異なる方向に放射された放射光を、複数の光路により受光光学系まで導く。これにより、蛍光の集光効率、励起光の吸収効率及びパワー密度を向上できる。したがって、ダイヤモンド光磁気センサの応答性及び感度を向上できる。

[0028] (4) 励起光は、光ファイバの出力部から微小部分を経由し、ダイヤモンドに入射され、放射光は、反射面を経由して、光ファイバの出力部に集光してもよい。これにより、蛍光の集光効率、励起光の吸収効率及びパワー密度

をより向上できる。したがって、ダイヤモンド光磁気センサの応答性及び感度をより向上できる。

[0029] (5) ダイヤモンド光磁気センサは、ダイヤモンドを内包し、励起光及び放射光を透過させる部材をさらに含んでいてもよく、反射面は、部材に形成されていてもよい。これにより、高価なダイヤモンドの量を少なくでき、ダイヤモンド光磁気センサのコストを低減できる。

[0030] (6) 反射面は、ダイヤモンドに形成されていてもよい。これにより、ダイヤモンドとは別に反射面となる部材を設ける必要がなく、さらに、ダイヤモンドと大気との屈折率差が大きいことより反射面での臨界角を小さくでき反射効率が大きいセンサをコンパクトに形成できる。

[0031] (7) 反射面は、ダイヤモンドを内包する部材に形成されていてもよい。これにより、ダイヤモンドより加工の容易な部材への反射面の加工のみとなり、ダイヤモンドへの励起光の集光が容易となる。また、部材として、ダイヤモンドの屈折率により近い材料を選ぶことにより、大気との屈折率差を大きく保持し、ダイヤモンドへの励起光の入射を容易にし、且つ、反射面における臨界角を小さくでき、反射効率が大きいセンサをコンパクトに形成できる。

[0032] (8) 反射面は、焦点を結ぶ曲面又は複数の平面を含んでいてもよい。これにより、蛍光の集光効率をより一層向上できる。ここで焦点とは、異なる2光路以上で、その2光路がダイヤモンドに入射したときの間隔よりも近い位置に集まる点であればよく、いわゆる厳密な光学的な焦点でなくとも構わない。幾何学上1点に集まるほど好ましく、より多くの複数の光路が1点に集まることがさらに好ましい。

[0033] (9) ダイヤモンドは、平面と球冠とを有していてもよく、反射面は、球冠により形成されていてもよい。これにより、蛍光の集光効率の高いダイヤモンドの形状設計が容易になる。

[0034] (10) ダイヤモンドは、2つの球冠を有していてもよく、反射面は、2つの球冠のうちの第1の球冠により形成されていてもよい。これにより、蛍

光の集光効率の高いダイヤモンドの形状設計が容易になる。

[0035] (11) ダイヤモンドは、多面体に形成されていてもよく、反射面は、多面体の複数の面により形成されていてもよい。これにより、蛍光の集光効率の高いダイヤモンドの製造が容易になる。

[0036] (12) 反射面は平面を有していてもよく、励起光の入射軸に垂直な面と平面とが成す、励起光の入射側の角度は、 20° 以上 70° 以下であってもよい。これにより、蛍光の集光効率が高いダイヤモンドを実現できる。

[0037] (13) 垂直な面と平面とが成す角度は、 30° 以上 50° 以下であってもよい。これにより、蛍光の集光効率がより高いダイヤモンドを実現できる。

[0038] (14) ダイヤモンドは、コーナーキューブを有してもよい。これにより、蛍光の集光効率がより一層高いダイヤモンドを実現できる。

[0039] (15) ダイヤモンドを内包する部材は、コーナーキューブを有していてもよい。これにより、蛍光の集光効率がより一層高いダイヤモンドを実現できる。

[0040] (16) 光学系は、光ファイバを含み、ダイヤモンドの大きさは、光ファイバのコア径の $1/3$ 以上 3 倍以下であってもよい。これにより、光ファイバを伝送された励起光を効率よくダイヤモンドに照射でき、ダイヤモンドから放射される蛍光を効率よく光ファイバに入射できる。

[0041] (17) 光学系は、光ファイバを含み、ダイヤモンドは、光ファイバのコア径を直径とする円に内接する大きさ以上、当該円に外接する大きさ以下であってもよい。これにより、光ファイバを伝送された励起光を効率よくダイヤモンドに照射でき、ダイヤモンドから放射される蛍光を効率よく光ファイバに入射できる。

[0042] (18) 光学系は、光ファイバ及びレンズを含み、光ファイバを介して伝搬された励起光は、レンズから出力されてダイヤモンド光磁気センサに入射されてもよく、反射面は、カラーセンタから放射される放射光を、レンズに集光してもよく、レンズの倍率は、光ファイバの開口数の逆数であってもよ

く、ダイヤモンドの大きさは、光ファイバのコア径と開口数との積の80%以上120%以下の範囲であってもよい。これにより、光ファイバを伝送された励起光を、レンズを介して効率よくダイヤモンドに照射でき、ダイヤモンドから放射される蛍光を、レンズを介して効率よく光ファイバに入力できる。

[0043] [本開示の実施形態の詳細]

以下の実施形態においては、同一の部品には同一の参照番号を付してある。それらの名称及び機能も同一である。したがって、それらについての詳細な説明は繰返さない。

[0044] 図3を参照して本開示の実施形態に係るダイヤモンド光磁気センサ100は、NVセンタを含むダイヤモンドにより形成されている。ダイヤモンド光磁気センサ100は四面体に形成されている。図3において、4つの点A、B、C及びDは、四面体の頂点を表す。辺AD、BD及びCDに沿って、それぞれX軸、Y軸及びZ軸を示す。長さa、b及びcは、それぞれ辺AD、BD及びCDの長さを表す。角度 α は、辺ADと辺BDとの成す角度を表す。角度 β は、辺BDと辺CDとの成す角度を表す。角度 γ は、辺CDと辺ADとの成す角度を表す。ダイヤモンド光磁気センサ100の結晶方位の配置は任意であり、必ずしもX軸、Y軸及びZ軸により規定されない。

[0045] ダイヤモンド光磁気センサ100を用いて、磁場等を測定する場合、例えば、面ABCに垂直に励起光を入射する。これにより、ダイヤモンド光磁気センサ100内部のNVセンタに励起光が照射され、蛍光が放射される。ダイヤモンド光磁気センサ100の面ABC（即ち入射面）以外の3面（即ち、面ABD、面BCD及び面ACD）は、平坦な面に研磨されており、鏡（例えば、金属メッキ、金属蒸着等）を設けることなく反射面として機能する。全方位に放射される蛍光は、ダイヤモンド光磁気センサ100の面ABD、面BCD及び面ACDにより内部反射されて、面ABCから出力され、検出器により検出され得る。

[0046] ダイヤモンド光磁気センサ100の角度 α 、 β 及び γ は任意である。角度

α 、 β 及び γ は、いずれも 90° であることが好ましい。その場合のダイヤモンド光磁気センサ 100 の形状をコーナーキューブという。ダイヤモンド光磁気センサ 100 の辺 a 、 b 及び c は、 $0.5b \leq a \leq 1.5b$ 、 $0.5c \leq a \leq 1.5c$ を満たすことが好ましい。

[0047] 図 4 を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ 100 を用いて磁場測定を行うときには、ダイヤモンド光磁気センサ 100 は、面 ABC（図 3 参照）が光ファイバ 102 の端部（即ち、励起光の出力部）に対向するように配置される。図 4 の右下に、図 3 に示したダイヤモンド光磁気センサ 100 の頂点である点 A、B、C 及び D を示す。

[0048] 光ファイバ 102 は、ダイヤモンド光磁気センサ 100 に近接（当接している場合を含む）して配置されていればよい。光ファイバ 102 は、その光軸が、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の面 ABC（即ち入射面）に垂直になるように配置されることが好ましい。光源（例えばレーザダイオード等）から出力された光（例えば、波長約 532 nm ）は、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の NV センタ 104 の励起光として、光ファイバ 102 により伝送されダイヤモンド光磁気センサ 100 に入射する。NV センタ 104 から放射される蛍光は、上記したように、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の反射面（即ち、面 ABD、面 BCD 及び面 ACD）により内部反射されて、面 ABC から出力され、光ファイバ 102 により検出器まで伝送される。

[0049] このとき、ダイヤモンドの屈折率を 2.4 とすると、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の反射面 106（即ち面 ABD）と、光ファイバ 102 の光軸に垂直な垂直面 108 との成す角度 θ （度）は、屈折率が 2.4 の物質の全反射の臨界角が 24.6 度のため、 $20 \leq \theta \leq 70$ （ $45 - 25 \leq \theta \leq 45 + 25$ ）であることが好ましい。各反射面に関して、 θ をこの範囲に設定する（即ち、 θ がこの範囲内になるようにダイヤモンド光磁気センサ 100 を形成する）ことにより、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の内部において各反射面に入射する光を、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の前方且つ光ファイバ 102 の中心軸方向に反射できる。したがって、励起光が NV センタ

の励起に使用される割合を増大し、放射される蛍光が光ファイバ102に入射する割合を増大できる。より好ましくは、 $24.6 \leq \theta \leq 65.4$ ($45 - 20.4 \leq \theta \leq 45 + 20.4$) である。さらに好ましくは、 $38 \leq \theta \leq 52$ ($45 - (20.4/3) \leq \theta \leq 45 + (20.4/3)$) である。

[0050] ダイヤモンド光磁気センサ100の大きさは、光ファイバ102のコア径（即ちコアの直径）の $1/3$ 以上3倍以下であることが好ましい。ダイヤモンド光磁気センサ100の大きさとは、例えば、光ファイバ102に対向する面（即ち励起光の入射面）の外接円の大きさを意味する。また、ダイヤモンド光磁気センサ100は、光ファイバ102のコア径を直径とする円に内接する大きさ以上、当該円に外接する大きさ以下であることが好ましい。これにより、光ファイバ102により伝送された励起光を効率的にダイヤモンド光磁気センサ100に入射し、ダイヤモンド光磁気センサ100から放射される蛍光を光ファイバ102のコアに効率的に入射できる。

[0051] また、ダイヤモンド光磁気センサ100と光ファイバ102との間には、集光素子が配置されていてもよい。例えば、図5を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ100と光ファイバ102との間に、集光素子110及び112が配置されている。これにより、光ファイバ102により伝送されて光ファイバ102の端部から出力される励起光は、集光素子110及び112により集光されてダイヤモンド光磁気センサ100に照射される。ダイヤモンド光磁気センサ100のNVセンタから放射される蛍光は、集光素子112及び110により集光されて、光ファイバ102のコアの端部に入射されて、光ファイバ102により伝送される。

[0052] 集光素子110及び112により構成されるレンズの倍率は、光ファイバ102の開口数NAの逆数（即ち $1/NA$ ）であることが好ましい。また、ダイヤモンド光磁気センサ100の大きさは、光ファイバ102のコア径 ϕ と開口数NAとの積（即ち $\phi \times NA$ ）の80%以上120%以下の範囲であることが好ましい。これにより、光ファイバ102により伝送された励起光

を効率的にダイヤモンド光磁気センサ 100 に入射し、ダイヤモンド光磁気センサ 100 から放射される蛍光を光ファイバ 102 のコアに効率的に入射できる。

[0053] 上記では、光ファイバ 102 により励起光及び蛍光を伝送する場合を説明したが、これに限定されない。光ファイバ 102 の代わりに、複数の光ファイバコアを束ねたライトガイドを用いてもよい。

[0054] 図 6 に、励起光のダイヤモンド光磁気センサ 100 内部の光路を示す。図 6 を参照して、光ファイバ 102 から伝送される励起光（矢印参照）は、ダイヤモンド光磁気センサ 100 に入射し、複数の反射面（即ち、図 1 の面 A B D、面 B C D 及び面 A C D）により、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の内部で反射され、N V センタ 104 に照射される。即ち、N V センタ 104 には、前方（即ち光ファイバ 102 の側）からの励起光に限らず、後方及び上下左右からの励起光も含めて、全方位からの励起光が入射する。したがって、N V センタに入射する励起光の照射パワー密度を増大できる。特定の N V センタに到達するまでの光路中において吸収が小さい場合には、前方からの励起光だけの場合と比べて、励起光の照射パワー密度を最大で 6 倍に増大できる。これにより、ダイヤモンド光磁気センサの感度を向上できる。

[0055] また、複数の反射面で反射されて N V センタ 104 に入射する励起光の光路は、反射されずに直接 N V センタ 104 に入射する光路よりも長い（例えば、約 2 倍）。これにより、ダイヤモンド光磁気センサ 100 内における励起光の光路を、ダイヤモンドの吸収長に近づけることができ、励起光の吸収効率（即ち吸収の量子効率）を増大できる。即ち、励起させる N V センタの数が増大するので、放射される蛍光強度が増大する。これにより、ダイヤモンド光磁気センサの感度を向上できる。

[0056] 図 7 に、ダイヤモンド光磁気センサ 100 の N V センタから放射される蛍光の光路を示す。図 7 を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ 100 内部において、励起光が照射された N V センタ 104 は、全方位に蛍光（矢印参照）を放射する。このうち、前方（即ち光ファイバ 102 の側）に放射された

蛍光は直接光ファイバ102の端部（即ち励起光の出力部）に入射する。一方、後方及び上下左右に放射された蛍光は、複数の反射面（即ち、図1の面ABD、面BCD及び面ACD）により、ダイヤモンド光磁気センサ100の内部で反射された後、ダイヤモンド光磁気センサ100から出力されて光ファイバ102の端部（即ち励起光の出力部）に入射する。即ち、全方位に放射される蛍光を、前方に集光させることができ、蛍光の集光効率を増大できる。したがって、ダイヤモンド光磁気センサの感度を向上できる。

[0057] 図8～図11を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ100による、蛍光の集光効率の増大効果に関して、より具体的に説明する。図8には、矩形（例えば立方体）のダイヤモンドの内部から放射される蛍光の光路を示す。ここでは、ダイヤモンドの屈折率は1であるとして、考慮していない。この場合、中心軸に対する放射光の角度 θ （度）が、 $0 \leq \theta \leq 45$ の範囲（即ち網掛領域）の光が1つの観測面（即ち左側の面）から出力される。したがって、立体角の比率から、25%（ $= \pi / (4\pi)$ ）の放射光を検出できる。

[0058] 図9には、図8と同じ形状のダイヤモンドに関して、ダイヤモンドの屈折率 n （即ち約2.5）を考慮して、ダイヤモンド内部から放射される蛍光の光路を示す。この場合、中心軸に対する放射光の角度 θ （度）が、 $0 \leq \theta \leq 17$ の範囲（即ち網掛領域）の光が観測面（左側の面）から出力される。 $\theta > 17$ の光は、臨界角を超えているので、左側の面で反射される。したがって、図8とは異なり実際には、立体角の比率から、約2.3%（ $= 0.3^2 \pi / (4\pi)$ ）の放射光しか検出できない。

[0059] 図10は、ダイヤモンドの1つの面に反射鏡を配置した場合に関して、図9と同様にダイヤモンドの屈折率 n を考慮して、ダイヤモンド内部から放射される蛍光の光路を示す。便宜上、観測面に垂直方向のダイヤモンドの大きさは、図9の1/2にしている。この場合、図9と同様に、中心軸に対する放射光の角度 θ （度）が、 $0 \leq \theta \leq 17$ の範囲（即ち網掛領域）の光が観測面（即ち左側の面）から出力される。さらに、同じ角度範囲で後方に放射された光は、反射鏡により前方に反射され、同じ角度範囲で観測面から出力

される。したがって、図9の場合の約2倍の光が観測面（即ち左側の面）から出力される。立体角の比率から、約4.5%（ $= (0.3^2 \pi) \times 2 / (4 \pi)$ ）の放射光を検出できる。

[0060] 図11は、ダイヤモンドの屈折率 n を考慮して、コーナーキューブのダイヤモンドの内部から放射される蛍光の光路を示す。この場合、図9と同様に、中心軸に対する放射光の角度 θ （度）が、 $0 \leq \theta \leq 17$ の範囲（即ち網掛領域）の光が観測面（即ち左側の面）から出力される。また、後方及び側方に同じ角度範囲（即ち網掛領域）で放射された光は、コーナーキューブの観測面以外の面が反射面として機能し、前方に反射されて観測面から出力される。立体角の比率から、約35%（ $= ((0.3^2 \pi) \times 2 + 0.6 \times 2 \pi) / (4 \pi)$ ）の放射光を検出できる。

[0061] 上記のように、図9に示した平坦なダイヤモンドでは、NVセンタから前方に放射される蛍光の約2.3%が観測できる。反射面を設けた場合にも、蛍光の約4.5%が観測できるに留まる。これに対して、コーナーキューブのダイヤモンドを用いることにより、NVセンタから側方及び後方に放射される蛍光も前方に集光でき、約35%の蛍光を観測できる。平坦なダイヤモンドの場合と比較して、集光効率は約15倍に向上する。

[0062] 以上、ダイヤモンド光磁気センサ100は、蛍光の集光効率、励起光の吸収効率及びパワー密度を向上できる。したがって、応答性及び感度を向上したダイヤモンド光磁気センサを実現できる。

[0063] （第1変形例）

上記では、ダイヤモンド光磁気センサを、ダイヤモンドにより構成する場合を説明したが、これに限定されない。ダイヤモンド以外の部材を含んでもよい。第1変形例に係るダイヤモンド光磁気センサは、ダイヤモンド以外の部材を含む。

[0064] 図12を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ120は、NVセンタを含むダイヤモンド122と、ダイヤモンド122を内包するガラス124とを有する。ガラス124の形状は、図3に示したダイヤモンド光磁気センサ1

00と同様の形状（例えば、コーナーキューブ）である。ガラス124の各辺の寸法（即ち、図3に示したa、b及びc）及び角度（即ち、図3に示した α 、 β 及び γ ）に関する条件も、ダイヤモンド光磁気センサ100に関して示したものと同一であればよい。上記したように、図12において、入射面126に入射した励起光は、ダイヤモンド光磁気センサ120の内部で反射面128により反射され、1点鎖線の内部（以下、励起光増大エリアという）に集中する。したがって、ダイヤモンド122は、励起光増大エリアの内部に少なくとも一部が存在する大きさであればよく、ダイヤモンド122の形状は任意である。ダイヤモンドの周囲をガラス124により形成することにより、ダイヤモンドの量を少なくでき、ダイヤモンド光磁気センサのコストを低減できる。また、ガラスをコーナーキューブの形状に切削加工すればよいので、ダイヤモンドを切削加工する場合よりも、ダイヤモンド光磁気センサの製造が容易になる。

[0065] ダイヤモンド122のNVセンタから放射される蛍光は、上記したように、反射面128により反射され、入射面126から出力される。ダイヤモンド122を内包する部材はガラスに限定されない。緑色の光（即ち波長約490～560nm）及び赤色の光（即ち波長約630～800nm）の透過率が高ければよく、樹脂であってもよい。なお、ガラス124の屈折率はダイヤモンドよりも小さいので、反射面128の表面を平坦に加工し、鏡（例えば、金属メッキ、金属蒸着等）を設けることが好ましい。

[0066] （第2変形例）

上記では、反射面が平面である場合を説明したが、これに限定されない。第2変形例に係るダイヤモンド光磁気センサは、曲面の反射面を有する。

[0067] 図13を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ130は、NVセンタを含み、平面の入射面132と曲面の反射面134とを有する。励起光は入射面132に入射される。反射面134は、例えば、放物面又は楕円体面等の焦点136を結ぶ曲面である。反射面134は、入射面132の側から見て、凹形状であればよい。反射面134が凹形状であれば、入射面132からダ

ダイヤモンド光磁気センサ 130 に入射した励起光は、ダイヤモンド光磁気センサ 130 内部において反射面 134 により前方（即ち入射面 132 の側）に反射される。したがって、励起光の光路が長くなり NV センタの励起光の吸収効率を増大できる。NV センタから放射される蛍光は、ダイヤモンド光磁気センサ 130 内部において反射面 134 により前方（即ち入射面 132 の側）に反射されて集光され、入射面 132 から出力される。したがって、蛍光の集光効率を増大できる。

[0068] また、ダイヤモンド光磁気センサの反射面は、球面であってもよい。図 14 を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ 140 は、NV センタを含み、平面の入射面 142 と曲面の反射面 144 とを有する。ダイヤモンド光磁気センサ 140 は、半径 r の球体を、その中心 O を通らない平面で切除して得られる、中心 O を含まない球欠である。反射面 144 は、切除された球面の一部（即ち球冠）である。励起光は入射面 142 からダイヤモンド光磁気センサ 140 に入射する。ダイヤモンド光磁気センサ 140 に入射した励起光は、ダイヤモンド光磁気センサ 140 内部において反射面 144 により前方（即ち入射面 142 の側）に反射される。したがって、励起光の光路が長くなり NV センタの励起光の吸収効率を増大できる。NV センタから放射される蛍光は、ダイヤモンド光磁気センサ 140 内部において反射面 144 により前方（即ち入射面 142 の側）に反射されて集光され、入射面 142 から出力される。したがって、蛍光の集光効率を増大できる。図 14 に示した長さ d 及び e に関しては、 $r > d > 3r/4$ 、及び、 $3r/2 > e > r/2$ であることが好ましい。長さ d は入射面 142 の直径であり、長さ e は球欠の高さ（即ち、入射面 142 から球冠までの垂直距離の最大値）である。

[0069] 第 2 変形例に係るダイヤモンド光磁気センサに関しても、第 1 変形例と同様に、NV センタを含むダイヤモンドと、それを内包するガラスとを含むように形成されてもよい。その場合、ダイヤモンドを内包するガラスは、図 13 又は図 14 に示した形状に形成される。

[0070] （第 3 変形例）

上記では、励起光の入射面が平面である場合を説明したが、これに限定されない。第3変形例に係るダイヤモンド光磁気センサは、曲面の入射面を有する。

[0071] 図15を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ150は、NVセンタを含み、曲面の入射面152と曲面の反射面154とを有する。入射面152及び反射面154はいずれも球冠であり、ダイヤモンド光磁気センサ150は、2つの球欠を平面で接合した形状をしている。励起光は入射面152からダイヤモンド光磁気センサ150に入射する。ダイヤモンド光磁気センサ150に入射した励起光は、ダイヤモンド光磁気センサ150内部において反射面154により前方（即ち入射面152の側）に反射される。したがって、励起光の光路が長くなりNVセンタの励起光の吸収効率を増大できる。NVセンタから放射される蛍光は、ダイヤモンド光磁気センサ150内部において反射面154により前方（即ち入射面152の側）に反射されて集光され、入射面152から出力される。したがって、蛍光の集光効率を増大できる。

[0072] 反射面154が、図14に示したように半径 r の球体を切除した2つの球欠により形成されていれば、図15に示した長さ d 及び e に関しては、 $r > d > 3r/4$ 、及び、 $3r/2 > e > r/2$ であることが好ましい。ダイヤモンド光磁気センサ150が、このような形状であれば、励起光が、入射面152及び反射面154の接合面に垂直な軸に平行に入射面152に入射する場合、励起光をダイヤモンド光磁気センサ150の内部で集光できる。

[0073] 第3変形例に係るダイヤモンド光磁気センサに関しても、第1変形例と同様に、NVセンタを含むダイヤモンドと、それを内包するガラスとを含むように形成されてもよい。その場合、ダイヤモンドを内包するガラスは、図15に示した形状に形成される。

[0074] （第4変形例）

上記では、ダイヤモンド光磁気センサが四面体である場合を説明したが、これに限定されない。第4変形例に係るダイヤモンド光磁気センサは、5面

体以上の多面体である。

[0075] 図16を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ160は、NVセンタを含み、三角柱（即ち5面体）に形成されており、入射面162と、入射面162以外の4つの反射面（即ち反射面164等）とを有する。励起光は入射面162からダイヤモンド光磁気センサ160に入射する。ダイヤモンド光磁気センサ160に入射した励起光は、ダイヤモンド光磁気センサ160内部において反射面164等の複数の反射面により前方（即ち入射面162の側）に反射される。したがって、励起光の光路が長くなりNVセンタの励起光の吸収効率を増大できる。NVセンタから放射される蛍光は、ダイヤモンド光磁気センサ160内部において反射面164等の複数の反射面により前方（即ち入射面162の側）に反射されて集光され、入射面162から出力される。したがって、蛍光の集光効率を増大できる。

[0076] ダイヤモンド光磁気センサ160を用いて磁場測定を行う場合、図16に示した角度 δ は90度であることが好ましい。入射面162は正方形であること、即ち、直交する2辺の長さ h 及び i が等しいことが好ましい。また、長さ f 、 g 、 h 及び i に関しては、次の関係を満たすことが好ましい。

$$g \times (1 / 1.4 - 0.5) \leq f \leq g \times (1 / 1.4 + 0.5)$$

$$h \times (1 / 1.4 - 0.5) \leq f \leq h \times (1 / 1.4 + 0.5)$$

$$i \times (1 / 1.4 - 0.5) \leq f \leq i \times (1 / 1.4 + 0.5)$$

[0077] ダイヤモンド光磁気センサは、6面体以上の多面体であってもよい。また、図13及び図14に示した曲面の反射面を、複数の平面により近似した多面体であってもよい。

[0078] 第4変形例に係るダイヤモンド光磁気センサに関しても、第1変形例と同様に、NVセンタを含むダイヤモンドと、それを内包するガラスとを含むように形成されてもよい。その場合、ダイヤモンドを内包するガラスは、5面体以上の多面体（例えば、図16に示した三角柱）に形成される。

[0079] （第5変形例）

上記では、ダイヤモンド磁気センサにおいて、励起光が入射した面から出

力される蛍光を検出する場合（即ち、励起光のダイヤモンド磁気センサへの入射方向と蛍光のダイヤモンド磁気センサからの出力方向とが逆である場合）を説明したが、これに限定されない。第5変形例に係るダイヤモンド光磁気センサにおいては、励起光の入射方向と蛍光の出力方向とが同じであり、励起光が入射する面と異なる面から出力される蛍光が検出される。

[0080] 図17を参照して、第5変形例に係るダイヤモンド光磁気センサ400は、NVセンタを含むダイヤモンドにより形成されており、その形状は、平坦な微小部分402を有する略三角錐（具体的には三角錐台）である。ダイヤモンド光磁気センサ400は、例えば図3に示したダイヤモンド光磁気センサ100において、頂点Dを含む部分が、所定の平面により切り取られることにより形成され得る。

[0081] 図18を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ400への励起光の照射は、光ファイバ408を用いて微小部分402への照射により行われる。例えば、励起光は、光ファイバ408から微小部分402の面に垂直に照射される。したがって、光ファイバ408から照射された励起光は、微小部分402からダイヤモンド光磁気センサ400に入射する。ダイヤモンド光磁気センサ400の内部に入射した励起光により、NVセンタ104から蛍光が放射される。放射された蛍光は、反射面404により反射されて、出力面410から出力され、光ファイバ102に入射する。光ファイバ102に入射した蛍光は、光ファイバ102により検出器まで伝送される。

[0082] 微小部分402は、反射面404と比べて面積が小さい部分であり、ダイヤモンド光磁気センサ400への光学的な入射条件を満たしていればよく、後述するように平面でなくてもよい。微小部分402は、レーザ光（即ち励起光）が入射できるほどのサブ μm 以上の大きさであることが好ましい。また、微小部分402の位置は、ダイヤモンド光磁気センサ400に入射した励起光によるNVセンタからの放射光（即ち蛍光）が、反射面により反射されて、放射光を受光する光学系に向かって集光できる位置であることが好ましい。なお、集光とは、拡がった角度の光を目的の方向に向かうように集め

る機能を意味する。

[0083] 上記では、励起光を入射するための微小部分402が平坦である場合を説明したが、これに限定されない。図19を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ420は、微小部分422と反射面424とを有する。反射面424は、反射面404と同様に略三角錐である。微小部分422の形状は、平坦ではなく、滑らかな曲面である。したがって、実線の矢印により示すように、微小部分422に入射する励起光は、主にダイヤモンド光磁気センサ420の内部に入射する。破線の矢印により示すように、微小部分422以外の部分（即ち反射面424）に入射する光は、主に反射し、ダイヤモンド光磁気センサ420の内部に入ることができない。このように、微小部分の形状は、平坦でなくてもよく、励起光がダイヤモンド光磁気センサ420の内部に入射し得る形状であればよい。ダイヤモンド光磁気センサ420に入射した励起光により、NVセンタ104から放射された蛍光は、反射面424により反射され、励起光の入射側とは反対側から出力される。

[0084] （第6変形例）

第5変形例においては、NVセンタを含むダイヤモンド磁気センサが、微小部分を有する略三角錐である場合を説明したが、これに限定されない。図20を参照して、第6変形例に係るダイヤモンド光磁気センサ430は、微小部分432と反射面434とを有し、微小部分432及び反射面434は、全体として滑らかな曲面に形成されている。したがって、実線の矢印により示すように、微小部分432に入射する励起光は、主にダイヤモンド光磁気センサ430の内部に入射する。破線の矢印により示すように、微小部分432以外の部分（即ち反射面434）に入射する光は、主に反射し、ダイヤモンド光磁気センサ430の内部に入ることができない。ダイヤモンド光磁気センサ430に入射した励起光により、NVセンタ104から放射された蛍光は、反射面434により反射され、励起光の入射側とは反対側から出力される。

[0085] なお、第5変形例と同様に、微大部分は平坦であってもよい。図21を参

照して、ダイヤモンド光磁気センサ４４０は、微小部分４４２と反射面４４４とを有し、反射面４４４は滑らかな曲面であり、微小部分４４２は平坦面である。励起光及び蛍光の光路は図２０と同様である。

[0086] （第７変形例）

第５及び第６変形例においては、ダイヤモンド磁気センサ全体がダイヤモンドにより形成される場合を説明したが、これに限定されない。図２２を参照して、第７変形例に係るダイヤモンド光磁気センサ４５０は、微小部分４５４及び反射面４５６を有するガラス４５２と、ダイヤモンド１２２とを含む。ダイヤモンド光磁気センサ４５０は、図１２と同様に、ガラス４５２の内部に、ＮＶセンタを含むダイヤモンド１２２が内包されている。ガラス４５２の形状は、図１７及び図１８に示したダイヤモンド光磁気センサ４００と同様の形状（即ち三角錐台）である。したがって、実線の矢印により示すように、微小部分４５４に入射する励起光は、主にガラス４５２の内部に入射し、ダイヤモンド１２２に入射する。破線の矢印により示すように、微小部分４５４以外の部分（即ち反射面４５６）に入射する光は、主に反射し、ガラス４５２の内部に入ることができず、ダイヤモンド１２２に入射されない。ガラス４５２に入射した励起光により、ダイヤモンド１２２のＮＶセンタから放射された蛍光は、反射面４５６により反射され、励起光の入射側とは反対側から出力される。

[0087] ガラスに形成された微小部分は、平坦面でなくてもよい。図２３を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ４６０は、微小部分４６４及び反射面４６６を有するガラス４６２と、ダイヤモンド１２２とを含む。ガラス４６２の内部に、ＮＶセンタを含むダイヤモンド１２２が内包されている。ガラス４６２の形状は、図１９に示したダイヤモンド光磁気センサ４２０と同様の形状である。即ち、微小部分４６４は、平坦ではなく、滑らかな曲面である。励起光及び蛍光の光路は図２２と同様である。

[0088] ダイヤモンド１２２は、上記したように、励起光増大エリア（即ち図１２の一点鎖線内）の内部に少なくとも一部が存在する大きさであればよく、ダ

ダイヤモンド122の形状は任意である。ダイヤモンドの周囲をガラスにより形成することにより、ダイヤモンドの量を少なくでき、ダイヤモンド光磁気センサのコストを低減できる。また、ガラスを切削加工すればよいので、ダイヤモンドを切削加工する場合よりも、ダイヤモンド光磁気センサの製造が容易になる。

[0089] (第8変形例)

ダイヤモンドを内包するガラスの形状は、上記した形状に限定されない。図24を参照して、第8変形例に係るダイヤモンド光磁気センサ470は、微小部分474及び反射面476を有するガラス472と、ダイヤモンド122とを含む。ガラス472は、NVセンタを含むダイヤモンド122を内包している。ガラス472の形状は、図20に示したダイヤモンド光磁気センサ430と同様の形状である。即ち、ガラス472の微小部分474及び反射面476は、全体として滑らかな曲面に形成されている。したがって、実線の矢印により示すように、微小部分474に入射する励起光は、主にガラス472の内部に入射し、ダイヤモンド122に入射する。破線の矢印により示すように、微小部分474以外の部分（即ち反射面476）に入射する光は、主に反射し、ガラス472の内部に入ることができず、ダイヤモンド122に入射されない。ガラス472に入射した励起光により、ダイヤモンド122のNVセンタから放射された蛍光は、反射面476により反射され、励起光の入射側とは反対側から出力される。

[0090] なお、ガラスの微小部分は平坦であってもよい。図25を参照して、ダイヤモンド光磁気センサ480は、微小部分484及び反射面486を有するガラス482と、ダイヤモンド122とを含む。ガラス482は、NVセンタを含むダイヤモンド122を内包している。ガラス482の形状は、図21に示したダイヤモンド光磁気センサ440と同様の形状である。微小部分484は滑らかな曲面であり、ガラス482は平坦面である。励起光及び蛍光の光路は図24と同様である。

[0091] なお、上記したガラスは、光の透過率、加工し易さ、及び取扱い易さの観

点から石英ガラスが好ましい。ガラスは、励起光及び蛍光を90%以上透過でき、屈折率の大きな材料であることがさらに好ましい。ガラスの反射面（例えば図22の反射面456等）においては全反射する臨界角度が大きくなり、集光できる蛍光が多くなるからである。また、ガラスとダイヤモンドとの境界面（例えば図22のガラス452とダイヤモンド122との境界面）においては内部反射が少なくなり、ダイヤモンド内部に光（即ち励起光）が侵入し易くなるからである。

[0092] 上記したダイヤモンド光磁気センサを用いて、センサユニットを構成できる。即ち、センサユニットは、上記したように、NVセンタを含むダイヤモンド光磁気センサと、ダイヤモンド光磁気センサに励起光を照射する照射部と、ダイヤモンド光磁気センサのNVセンタからの放射光を検知する検知部と、励起光及び放射光を伝送する光導波路とを含む。これにより、速い応答性と高い感度のセンサユニットを実現できる。

[0093] 上記では、ダイヤモンド光磁気センサがNVセンタを含む場合を説明したが、これに限定されない。電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンド光磁気センサであればよい。電子スピンを持つカラーセンタは、スピン三重項状態を形成し、励起されることにより発光するセンタであり、NVセンタが代表例である。その他に、シリコンー空孔センタ（即ちSi-Vセンタ）、ゲルマニウムー空孔センタ（即ちGe-Vセンタ）、錫ー空孔センタ（即ちSn-Vセンタ）にも、電子スピンを持ったカラーセンタが存在することが知られている。したがって、これらを含むダイヤモンドを、NVセンタを含むダイヤモンドの代わりに用いて、ダイヤモンド光磁気センサを構成してもよい。

[0094] 上記においては、励起光及び蛍光を光ファイバによりダイヤモンド光磁気センサまで伝送する場合を説明したが、これに限定されない。励起光及び蛍光は、空間伝送されてもよい。例えば、図26を参照して、光源500から出力される励起光を、コリメートレンズ502により平行光にし、ダイクロイックミラー504により反射し、コリメートレンズ506により集光して

ダイヤモンド光磁気センサ100に照射できる。ダイヤモンド光磁気センサ100のNVセンタから放射される蛍光は、コリメートレンズ506により平行光になり、ダイクロイックミラー504を通過し、コリメートレンズ508により集光されて光検出器510により検出される。

実施例 1

- [0095] 以下に、実施例により、本開示の有効性を示す。ダイヤモンド光磁気センサには、図3に示したコーナーキューブにカットした素子と、比較例として平板状の素子とを用いた。
- [0096] タイプIb型のダイヤモンドを用い、これに、電子線の加速エネルギー3 MeV、電子線のドーズ量 3×10^{18} 個/cm²で電子を注入し、その後、800℃で約1時間アニールし、NVセンタを含むダイヤモンドを生成した。これを、斜辺1mmのコーナーキューブにカットして、ダイヤモンド光磁気センサを作製した。また、1辺1mmの立方体にカットして、比較例とするダイヤモンド光磁気センサを作製した。
- [0097] 図27に示した構成の測定装置を用いて、NVセンタを有するダイヤモンド光磁気センサに励起光を照射し、NVセンタから放射される蛍光強度を測定した。図27を参照して、測定装置のうち、ダイヤモンド光磁気センサ210に励起光を照射するための構成（即ち照射系）は、光源200、コリメートレンズ202、ダイクロイックミラー204、球レンズ206及び光ファイバ208を含む。ダイヤモンド光磁気センサ210から放射される蛍光を観測するための構成（即ち観測系）は、光ファイバ208、球レンズ206、ダイクロイックミラー204、LPF（Long Pass Filter）212及び光検出器214を含む。ダイヤモンド光磁気センサ210にマイクロ波を照射するための構成（即ちマイクロ波系）は、同軸ケーブル220、マイクロ波照射部222及び終端抵抗224を含む。
- [0098] 励起光を発生させる光源200には、LD（レーザダイオード）素子（具体的には、Thorlabs社製のL515A1）を用い、5mWの緑色のレーザ光（即ち励起光）を発生させた。光源200から出力される励起光を

、コリメートレンズ202により集光させた後、ダイクロイックミラー204に入射させた。コリメートレンズ202には、Thorlabs社製のLA1116-Aを用い、ダイクロイックミラー204には、駿河精機株式会社製のSO6-RGを用いた。ダイクロイックミラー204に入射した励起光（即ち緑色光）は、ダイクロイックミラー204により反射される。その反射光を球レンズ206により集光し、光ファイバ208（具体的にはコア）に入射させ、光ファイバ208を伝送させた後、ダイヤモンド光磁気センサ210に照射した。球レンズ206には、Opto Sigma社製のMS-08-4.35P1（直径8mm）を用いた。光ファイバ208には、コア直径 ϕ 0.9mmの光デジタルケーブルを用いた。

[0099] ダイヤモンド光磁気センサ210から放射される蛍光のうち光ファイバ208に入射した蛍光を、光ファイバ208を伝搬させた後、球レンズ206により平行光にして、ダイクロイックミラー204に入射させた。ダイクロイックミラー204に入射した蛍光（即ち赤色光）は、ダイクロイックミラー204を透過してLPF212に入射する。LPF212を通過した蛍光を、光検出器214により検出した。LPF212は、所定波長以上の波長の光を通し、所定波長より小さい波長の光をカット（例えば反射）する。LPF212には、Opto Sigma社製のLOPF-25C-593を用いた。光検出器214には、フォトダイオード（具体的には、浜松ホトニクス株式会社製のS6967）を用いた。ダイヤモンドの放射光は赤色光であり、LPF212を通るが、励起光はそれよりも波長が短いので、LPF212を通らない。これにより、光源200から放射された励起光が光検出器214により検知されてノイズとなり、検知感度が低下することを抑制した。

[0100] マイクロ波発生装置（図示せず）により発生させたマイクロ波（1W）を、同軸ケーブル220及びマイクロ波照射部222を用いてダイヤモンド光磁気センサ210まで伝送した。同軸ケーブル220には、特性インピーダンス50 Ω の同軸ケーブルを用いた。図28を参照して、マイクロ波照射部

222は、コプレーナ線路であり、電気絶縁性のフレキシブル基板300の表面に導電体302及び304を相互に離隔させて形成した。導電体302及び304は、銅箔により形成し、領域306において50Ωの終端抵抗224（図27参照）を用いて終端した。ダイヤモンド光磁気センサ210（図27参照）は領域308に配置した。ダイヤモンド光磁気センサ210に照射するマイクロ波の周波数を、2.74GHz～2.94GHzの範囲で変化させて、ダイヤモンド光磁気センサ210に励起光を照射し、発生する蛍光の観測として、光検出器214の出力電圧を測定した。

[0101] 測定結果を図29及び図30に示す。図29は、ダイヤモンド光磁気センサ210としてコーナーキューブのダイヤモンドを用いた結果を示す。図30は、ダイヤモンド光磁気センサ210として平板のダイヤモンドを用いた比較例の結果を示す。縦軸は蛍光強度を表す電圧（V）であり、横軸はマイクロ波の周波数である。黒丸は、測定データをプロットしたものである。

[0102] 図29に示した結果から、蛍光強度は約2440mVであり、スピン検出コントラスト比（即ち、赤色光輝度の低下率であり、グラフの谷の大きさsを蛍光強度で除した値）として約2%が得られた。したがって、それらを乗算した信号強度は、約50mVになる。一方、図30のグラフから、蛍光強度は約520mVであり、コントラスト比として約0.3%が得られた。それらを乗算した信号強度は、約1.7mVになる。したがって、コーナーキューブのダイヤモンド光磁気センサを用いることにより、蛍光強度を約5倍に増大でき、コントラスト比を約6倍に増大できた。したがって、信号強度を約30倍に、著しく増大できた。

実施例 2

[0103] 実施例1と同様に、ダイヤモンド光磁気センサに、図3に示したコーナーキューブにカットした素子を用い、比較例として平板状の素子を用いて、空間伝送により励起光及び蛍光を伝送する実験を行った。

[0104] ダイヤモンド光磁気センサを、実施例1と同様に作製した。即ち、タイプIb型のダイヤモンドを用い、電子線の加速エネルギー3MeV、電子線の

ドーズ量 3×10^{18} 個 / cm^2 で電子を注入し、その後、 800°C で約 1 時間アニールし、NV センタを含むダイヤモンドを生成した。これを、斜辺 1 mm のコーナーキューブにカットし、頂点部分に微小部分（即ち、励起光のダイヤモンドへの入射部）を形成し、ダイヤモンド光磁気センサを作製した。また、1 辺 1 mm の立方体にカットして、比較例とするダイヤモンド光磁気センサを作製した。

[0105] 図 3 1 に示した構成の測定装置を用いて、NV センタを有するダイヤモンド光磁気センサの頂点（即ち微小部分）に励起光を照射し（図 1 8 参照）、NV センタから放射される蛍光強度を測定した。図 3 1 を参照して、測定装置のうち、ダイヤモンド光磁気センサ 2 1 0 に励起光を照射するための構成（即ち照射系）は、光源 2 0 0 及びコリメートレンズ 2 0 2 を含む。ダイヤモンド光磁気センサ 2 1 0 から放射される蛍光を観測するための構成（即ち観測系）は、LPF 2 1 2 及び光検出器 2 1 4 を含む。ダイヤモンド光磁気センサ 2 1 0 にマイクロ波を照射するための構成（即ちマイクロ波系）は、同軸ケーブル 2 2 0、 $\lambda/4$ 変成器 5 2 0 及び $\lambda/4$ オープンスタブ 5 2 2 を含む。

[0106] 光源 2 0 0、コリメートレンズ 2 0 2 及び光検出器 2 1 4 には、実施例 1 と同じものを用いた。LPF 2 1 2 には、実施例 1 と異なり、Thorlabs 社製の FGL 5 9 0 を用いた。同軸ケーブル 2 2 0 には、実施例 1 と同じ特性インピーダンス $50\ \Omega$ の同軸ケーブルを用いた。 $\lambda/4$ 変成器 5 2 0 は、マイクロストリップライン線路により構成し、そのインピーダンスは $20\ \Omega$ であった。 $\lambda/4$ オープンスタブ 5 2 2 は、平行 2 線線路により構成し、そのインピーダンスは $300\ \Omega$ であった。 $\lambda/4$ 変成器 5 2 0 はインピーダンス変換器として機能し、同軸ケーブル 2 2 0 と、共振器である $\lambda/4$ オープンスタブ 5 2 2 との間でインピーダンスを精度よく変換でき、マイクロ波を効率的にダイヤモンド光磁気センサ 2 1 0 に照射できた。

[0107] 励起光として 5 mW の緑光を照射した。励起光のスポットを直径 $20\ \mu\text{m}$ に絞り、パワー密度を $3\ \text{W}/\text{mm}^2$ にした。1 W のマイクロ波を、周波数を 2

、74GHzから2.94GHzの範囲でスイープさせて、ダイヤモンド光磁気センサ210に励起光を照射し、発生する蛍光を測定した。その結果、コーナーキューブにカットしたダイヤモンド及び比較例のダイヤモンドのいずれにおいても、応答速度として30 μ 秒が得られた。蛍光強度に対応する、光検出器214のフォトダイオードにおける光電流は、比較例のダイヤモンドの場合、10 μ Aであったのに対して、コーナーキューブにカットしたダイヤモンドの場合、100 μ Aが得られた。

[0108] 以上、実施の形態を説明することにより本開示を説明したが、上記した実施の形態は例示であって、本開示は上記した実施の形態のみに制限されるわけではない。本開示の範囲は、発明の詳細な説明の記載を参酌した上で、請求の範囲の各請求項によって示され、そこに記載された文言と均等の意味及び範囲内での全ての変更を含む。

符号の説明

[0109] 100、120、130、140、150、160、210、400、420、430、440、450、460、470、480 ダイヤモンド光磁気センサ
 102、208、408 光ファイバ
 104 NVセンタ
 106、404、424、434、444、456、466、476、486 反射面
 108 垂直面
 110、112 集光素子
 122 ダイヤモンド
 124、452、462、472、482 ガラス
 126、132、142、152、162 入射面
 128、134、144、154、164 反射面
 136 焦点
 200、500 光源

202、502、506、508 コリメートレンズ
204、504 ダイクロイックミラー
206 球レンズ
212 L P F
214、510 光検出器
220 同軸ケーブル
222 マイクロ波照射部
224 終端抵抗
300 フレキシブル基板
302、304 導電体
306、308 領域
402、422、432、442、454、464、474、484 微
小部分
410 出力面
520 $\lambda/4$ 変成器
522 $\lambda/4$ オープンスタブ
A、B、C、D 点
a、b、c、d、e、f、g、h、i 長さ
O 中心
r 半径
 α 、 β 、 γ 、 δ 、 θ 角度

請求の範囲

- [請求項1] 電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、
 光学系を介して伝搬され、前記ダイヤモンドの内部に入射する励起光を反射する反射面とを含み、
 前記反射面は、前記励起光により励起された前記カラーセンタから放射される放射光を反射して前記光学系の方向に集光する、ダイヤモンド光磁気センサ。
- [請求項2] 前記励起光は、前記光学系の出力部から前記ダイヤモンドに入射され、
 前記反射面は、前記放射光を、前記光学系の前記出力部に集光する、請求項1に記載のダイヤモンド光磁気センサ。
- [請求項3] 電子スピンを持つカラーセンタを有するダイヤモンドと、
 光学系を介して伝搬される励起光を前記ダイヤモンドの内部に入射できる微小部分と、
 前記微小部分から入射した前記励起光により励起された前記カラーセンタから放射される放射光を反射して、受光素子に導く受光光学系の方向に集光する反射面とを含み、
 前記反射面は、
 前記微小部分よりも大きな面積を持ち、
 同一位置から異なる方向に放射された前記放射光を、複数の光路により前記受光光学系まで導く、ダイヤモンド光磁気センサ。
- [請求項4] 前記励起光は、光ファイバの出力部から前記微小部分を經由し、前記ダイヤモンドに入射され、
 前記放射光は、前記反射面を經由して、前記光ファイバの前記出力部に集光する、請求項3に記載のダイヤモンド光磁気センサ。
- [請求項5] 前記ダイヤモンドを内包し、前記励起光及び前記放射光を透過させる部材をさらに含み、
 前記反射面は、前記部材に形成される、請求項1から請求項4のい

ずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項6] 前記反射面は、前記ダイヤモンドに形成される、請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項7] 前記反射面は、前記ダイヤモンドを内包する部材に形成される、請求項 5 に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項8] 前記反射面は、焦点を結ぶ曲面又は複数の平面を含む、請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項9] 前記ダイヤモンドは、平面と球冠とを有し、
前記反射面は、前記球冠により形成される、請求項 1 から請求項 6 及び請求項 8 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項10] 前記ダイヤモンドは、2つの球冠を有し、
前記反射面は、前記2つの球冠のうちの第1の球冠により形成される、請求項 1 から請求項 6 及び請求項 8 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項11] 前記ダイヤモンドは、多面体に形成され、
前記反射面は、前記多面体の複数の面により形成される、請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項12] 前記反射面は平面を有し、
前記励起光の入射軸に垂直な面と前記平面とが成す、前記励起光の入射側の角度は、 20° 以上 70° 以下である、請求項 1 から請求項 8 及び請求項 11 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項13] 前記垂直な面と前記平面とが成す前記角度は、 30° 以上 50° 以下である、請求項 12 に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項14] 前記ダイヤモンドは、コーナーキューブを有する、請求項 1 から請求項 6 及び請求項 11 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項15] 前記ダイヤモンドを内包する前記部材は、コーナーキューブを有す

る、請求項 7 に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項16]

前記光学系は、光ファイバを含み、

前記ダイヤモンドの大きさは、前記光ファイバのコア径の $1/3$ 以上 3 倍以下である、請求項 1 から請求項 15 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項17]

前記光学系は、光ファイバを含み、

前記ダイヤモンドは、前記光ファイバのコア径を直径とする円に内接する大きさ以上、当該円に外接する大きさ以下である、請求項 1 から請求項 15 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

[請求項18]

前記光学系は、光ファイバ及びレンズを含み、

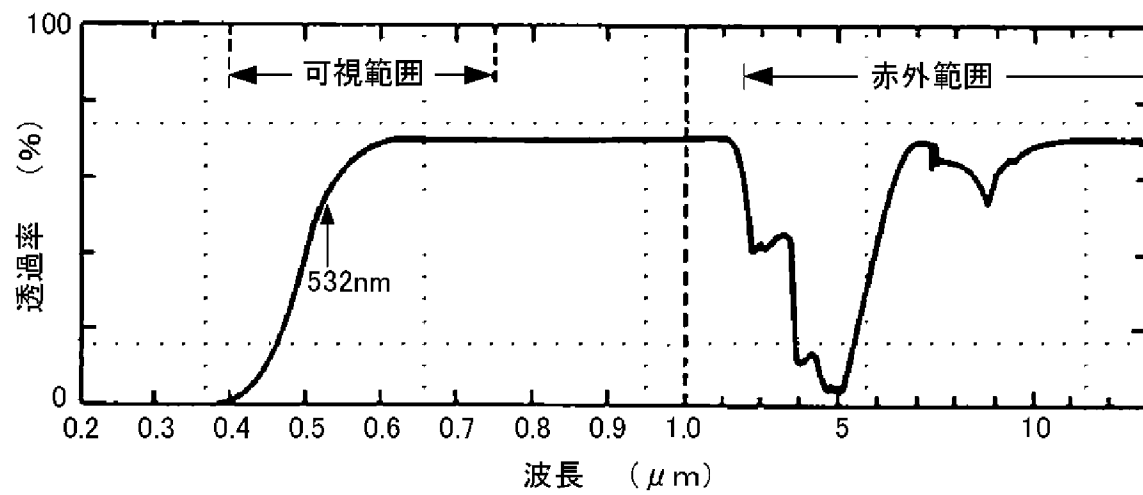
前記光ファイバを介して伝搬された前記励起光は、前記レンズから出力されて前記ダイヤモンドに入射され、

前記反射面は、前記カラーセンタから放射される前記放射光を、前記レンズに集光し、

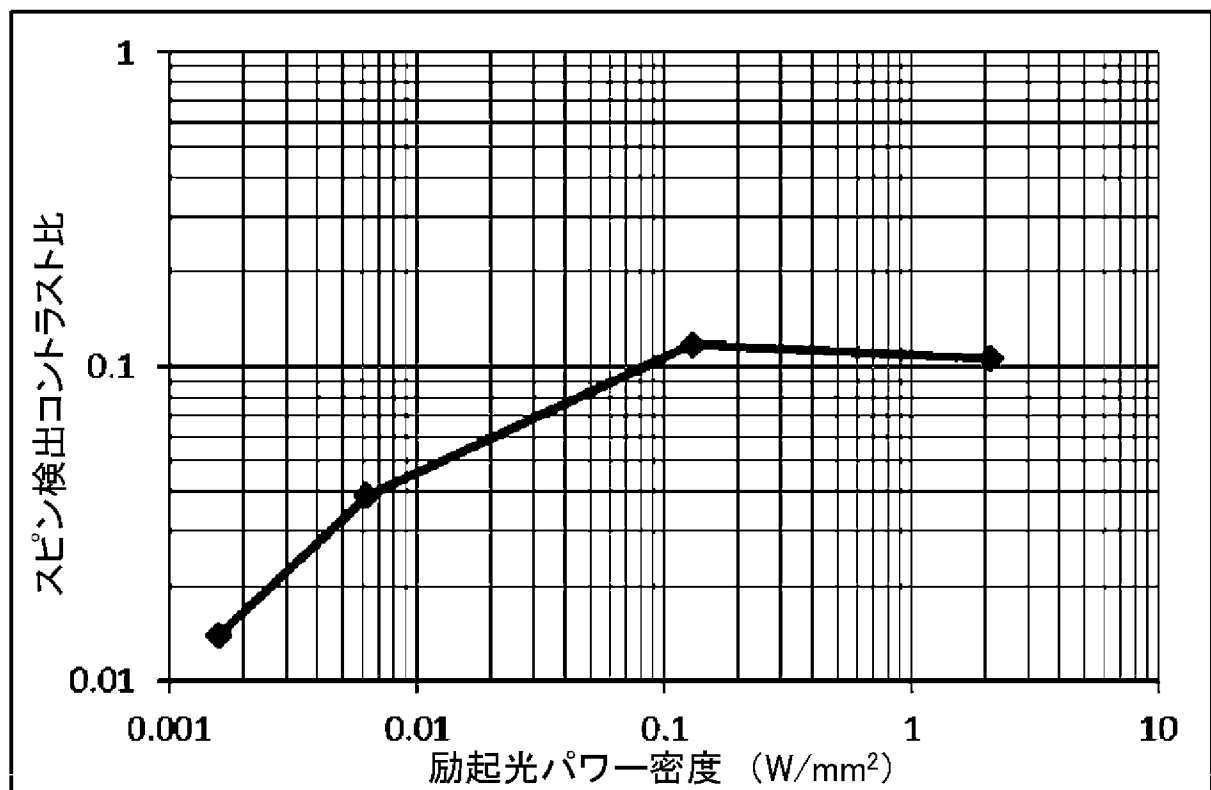
前記レンズの倍率は、前記光ファイバの開口数の逆数であり、

前記ダイヤモンドの大きさは、前記光ファイバのコア径と前記開口数との積の 80% 以上 120% 以下の範囲である、請求項 1 から請求項 15 のいずれか 1 項に記載のダイヤモンド光磁気センサ。

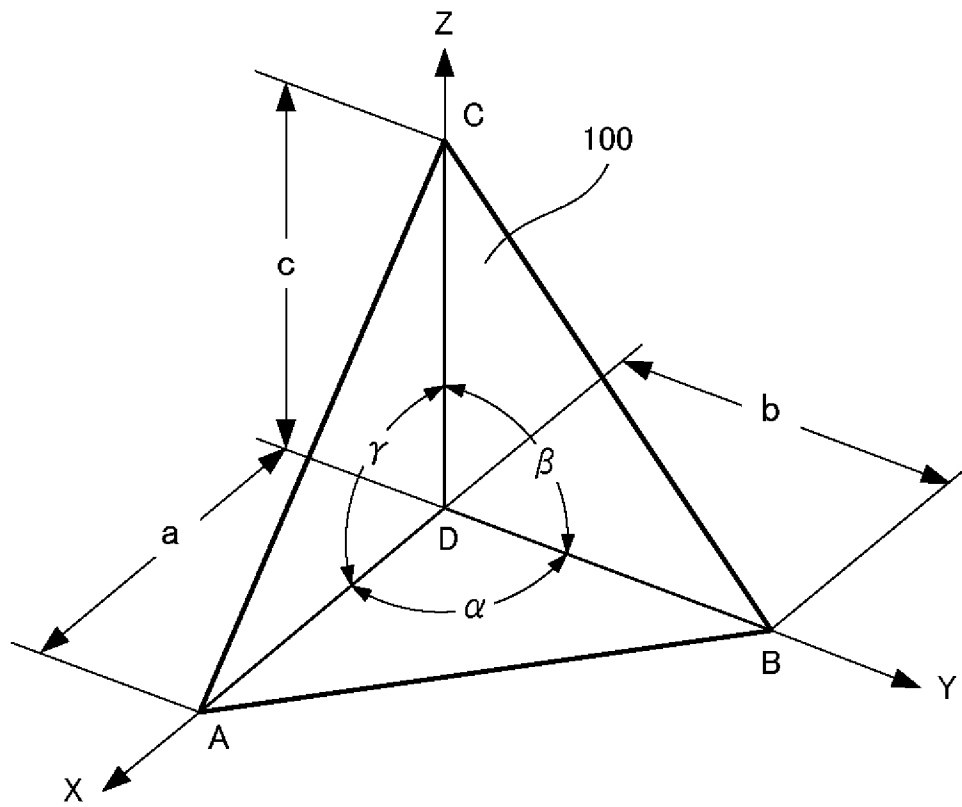
[図1]



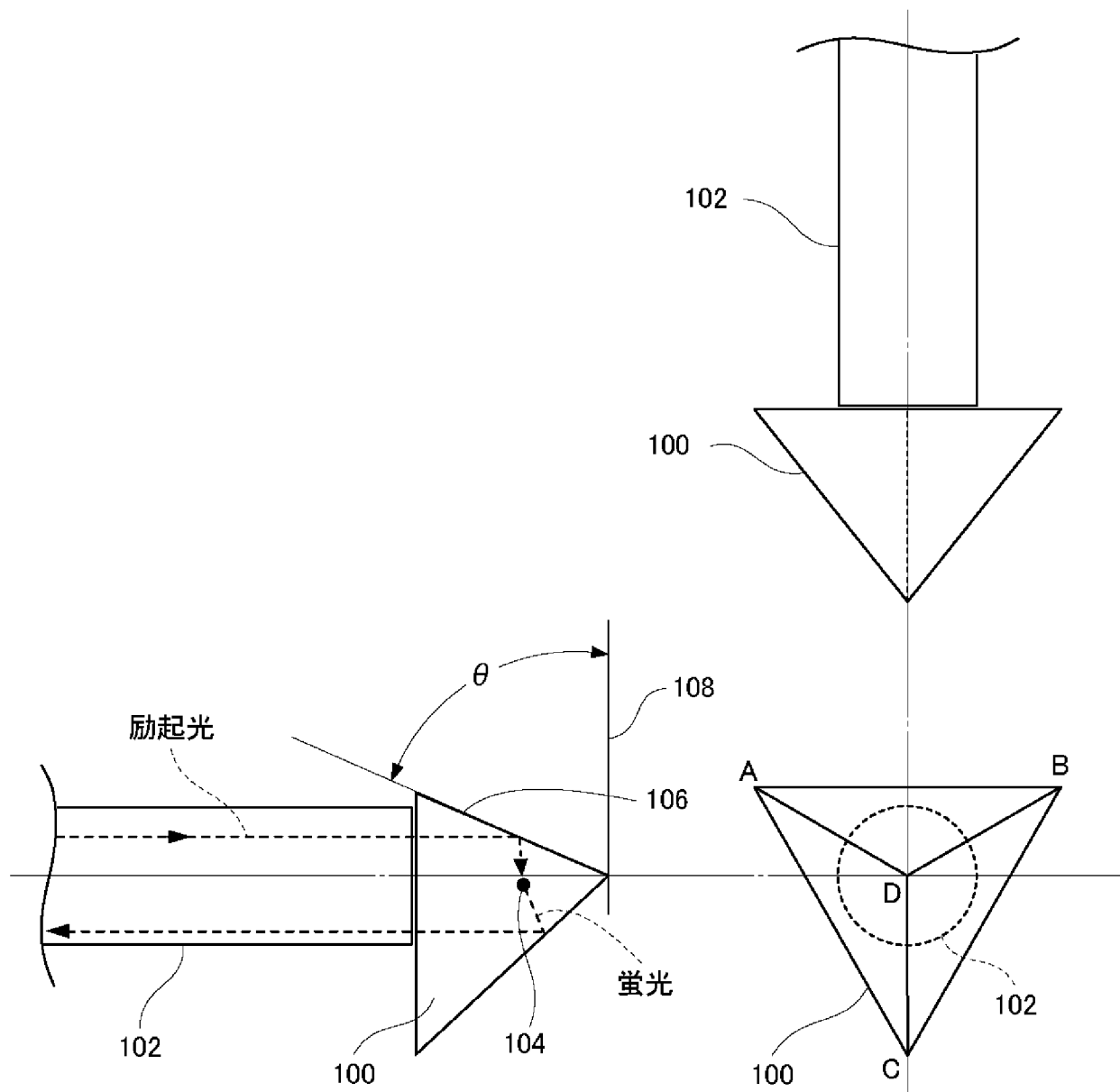
[図2]



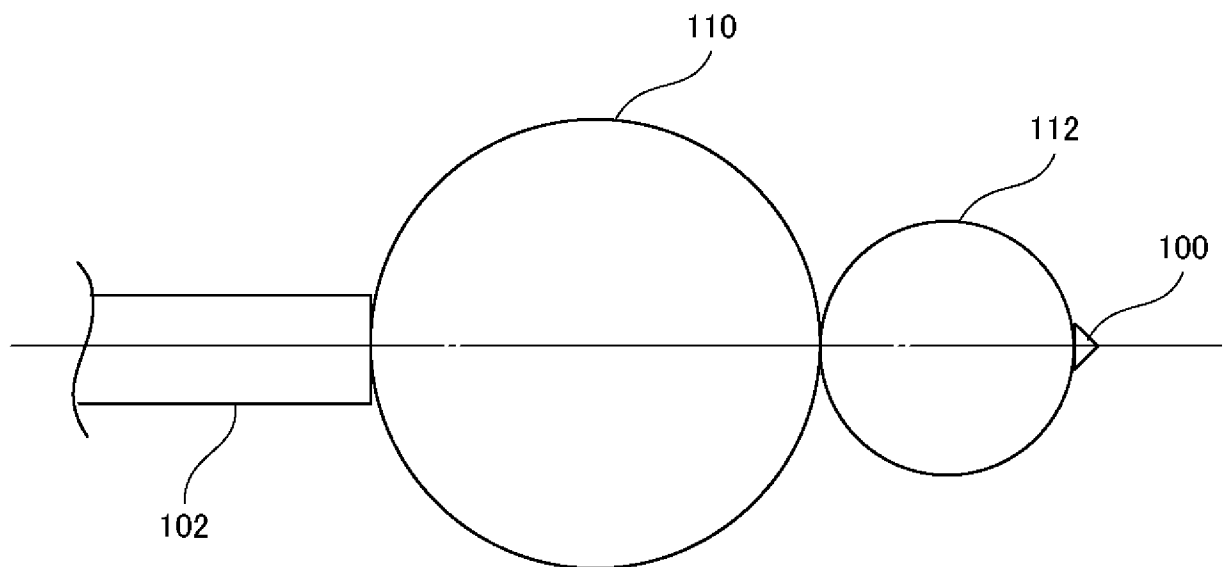
[図3]



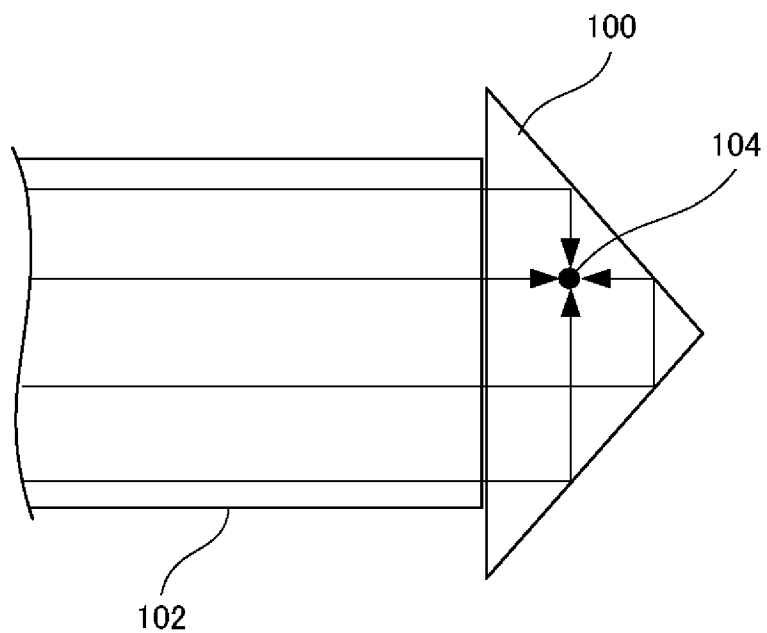
[図4]



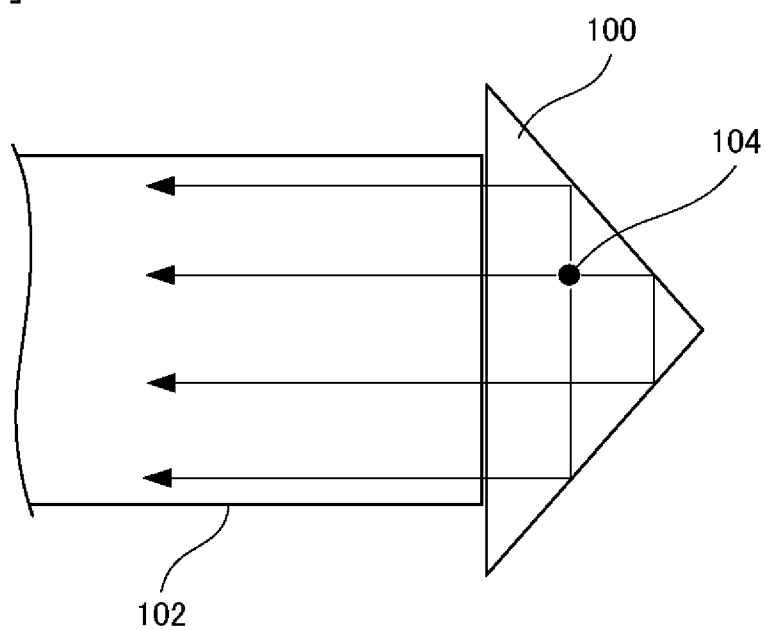
[図5]



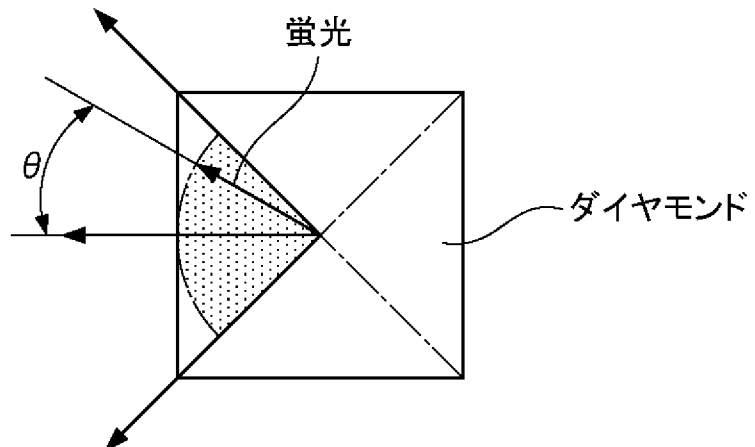
[図6]



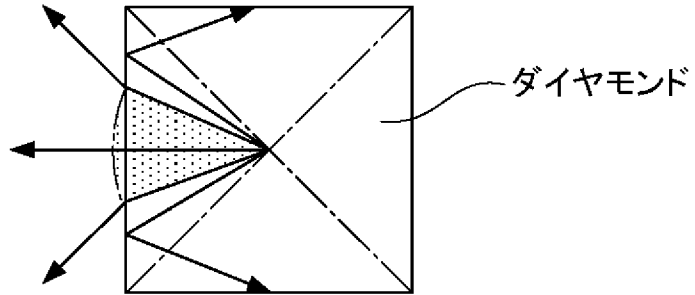
[図7]



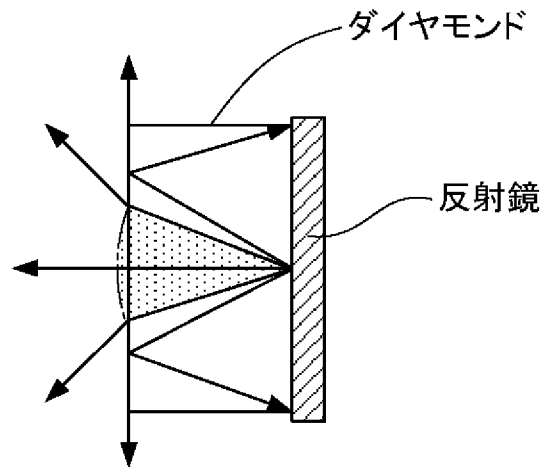
[図8]



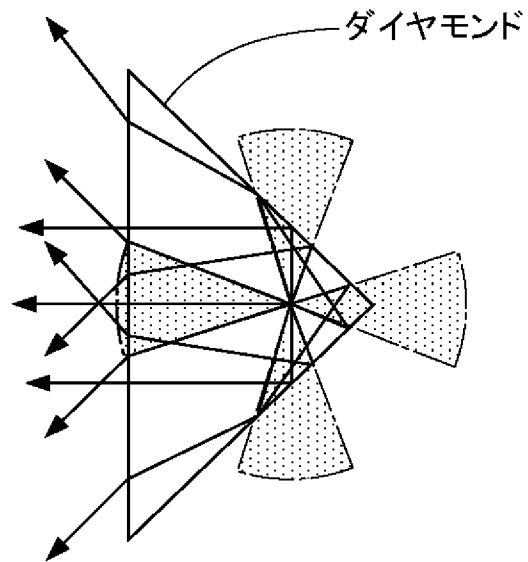
[図9]



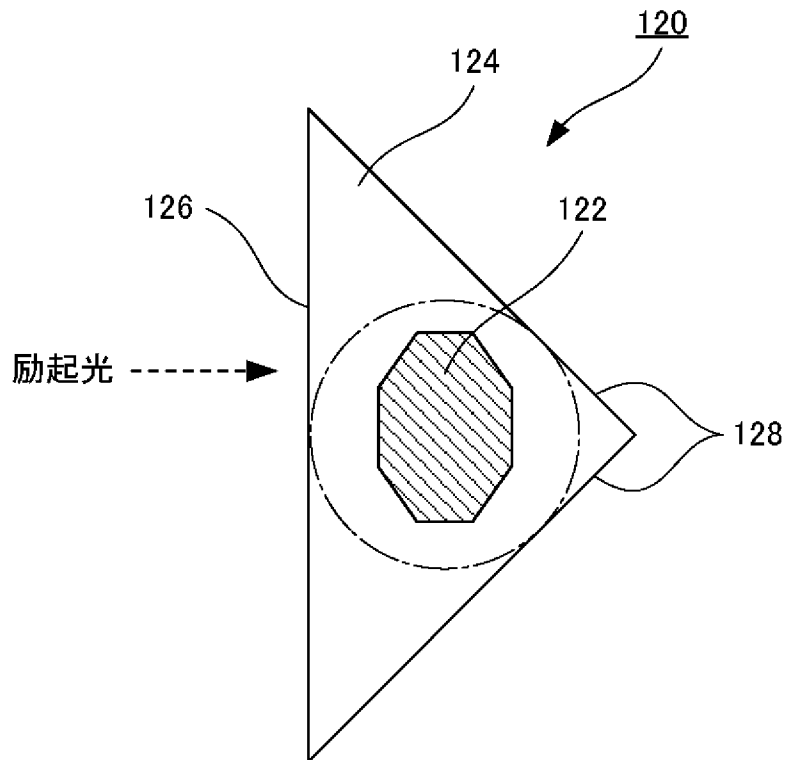
[図10]



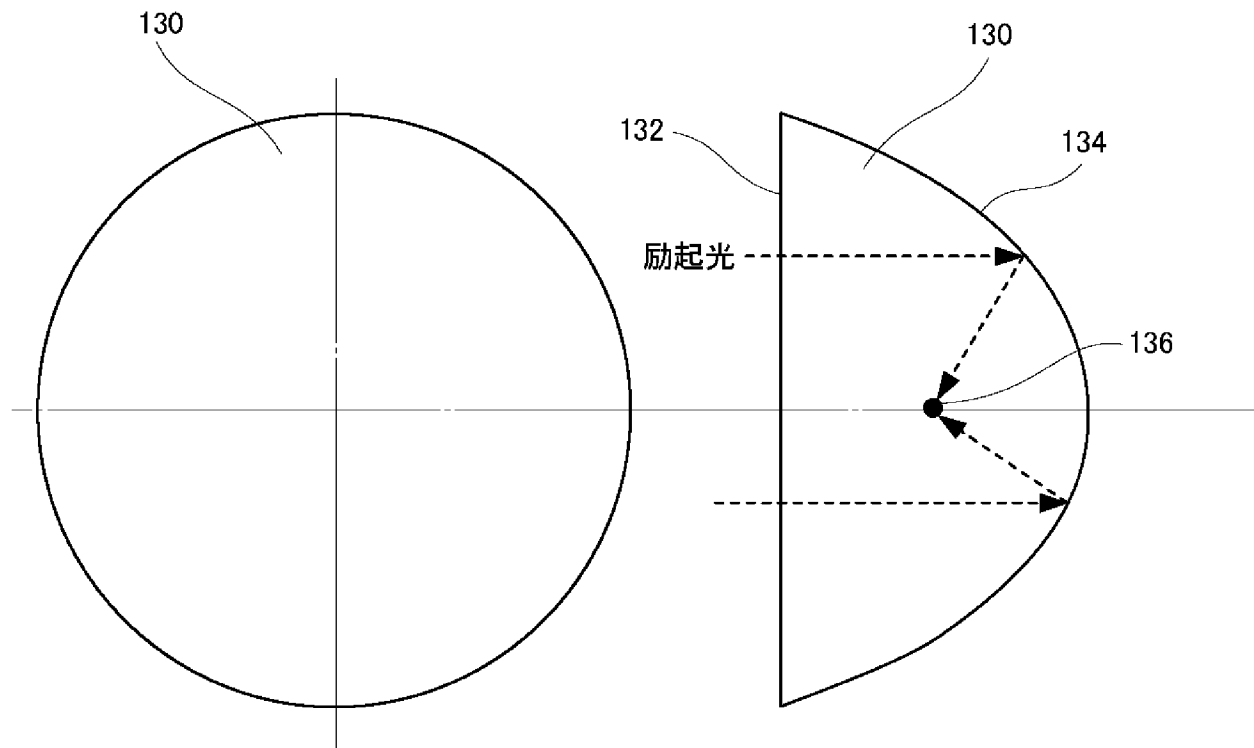
[図11]



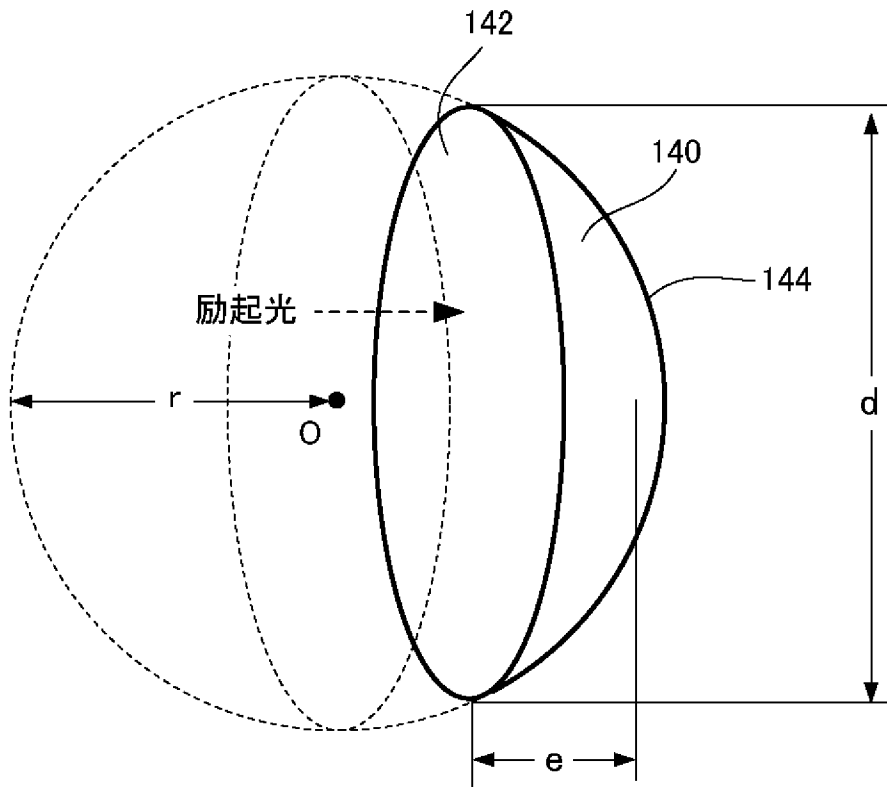
[図12]



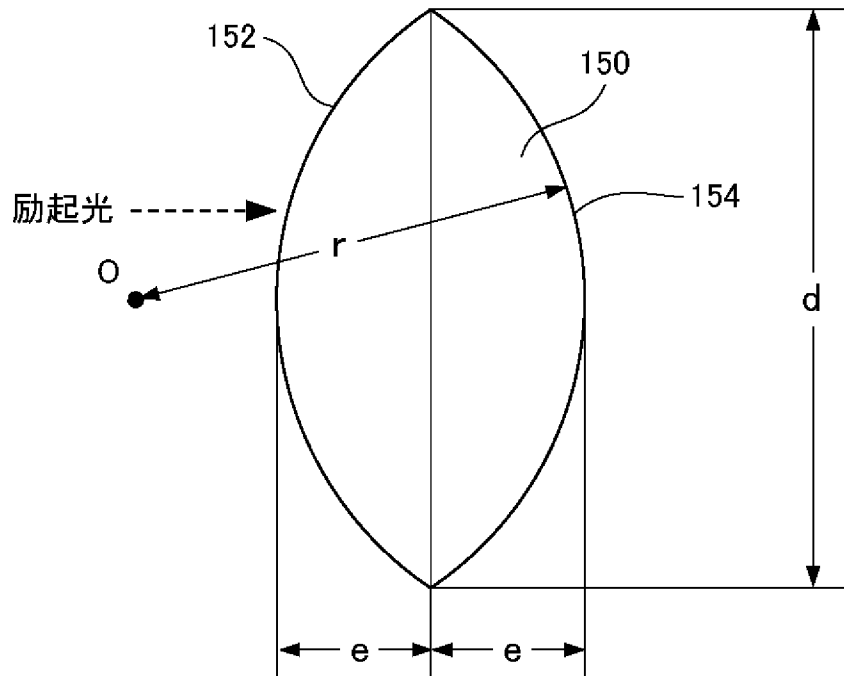
[図13]



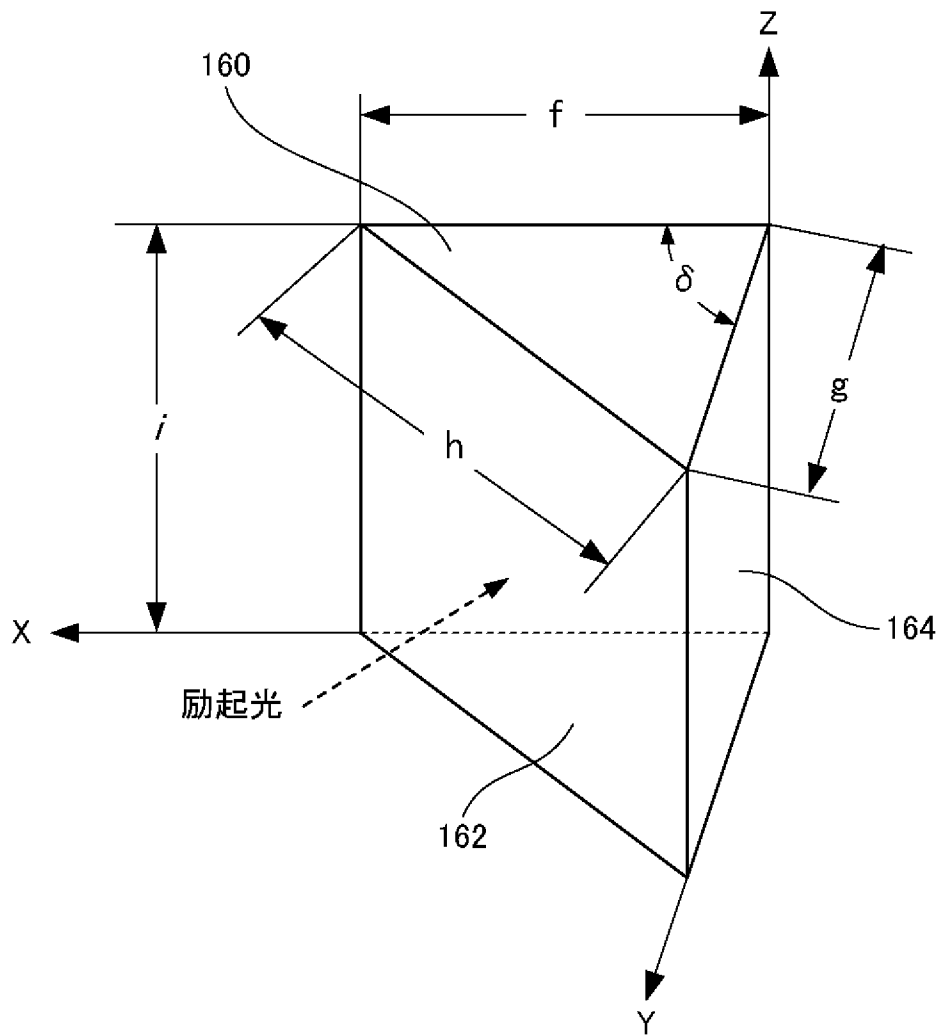
[図14]



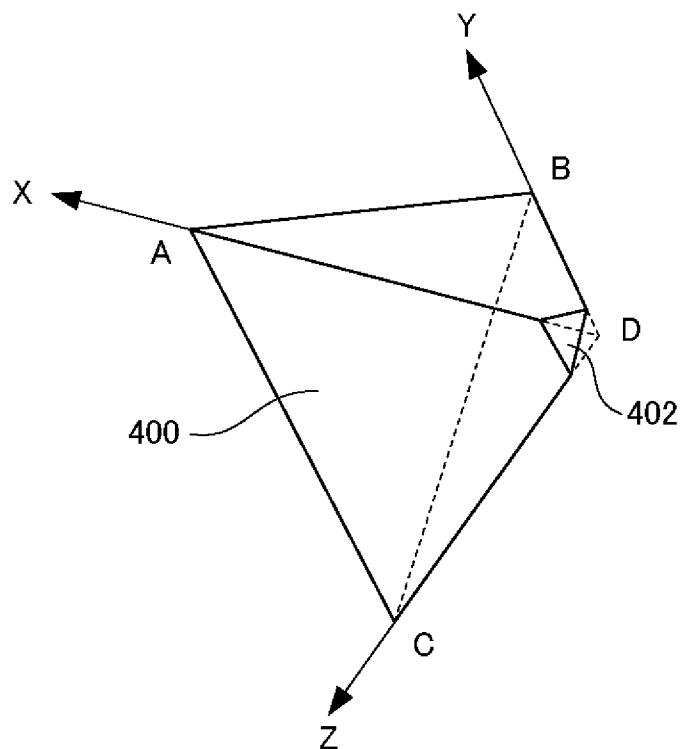
[図15]



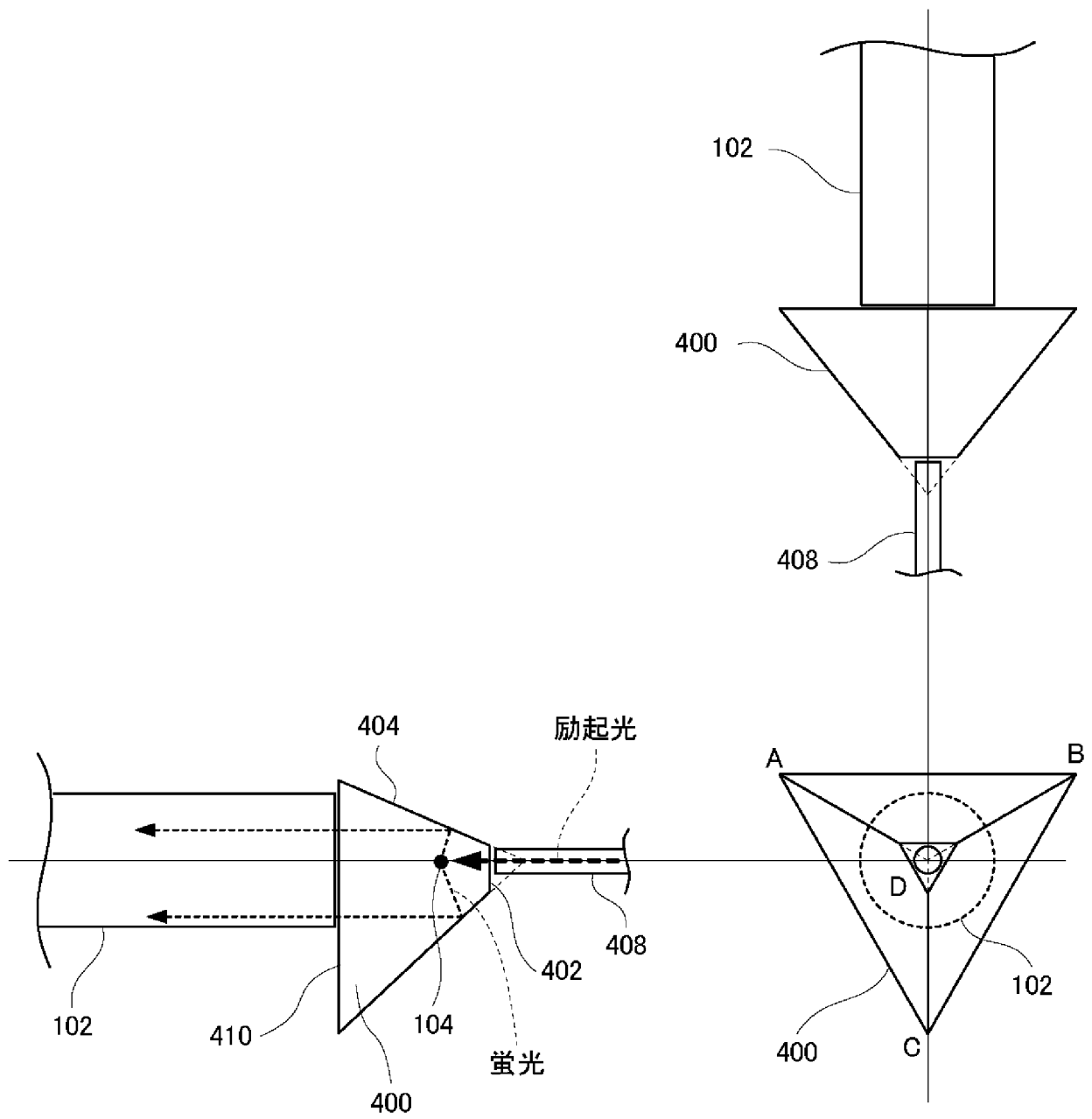
[図16]



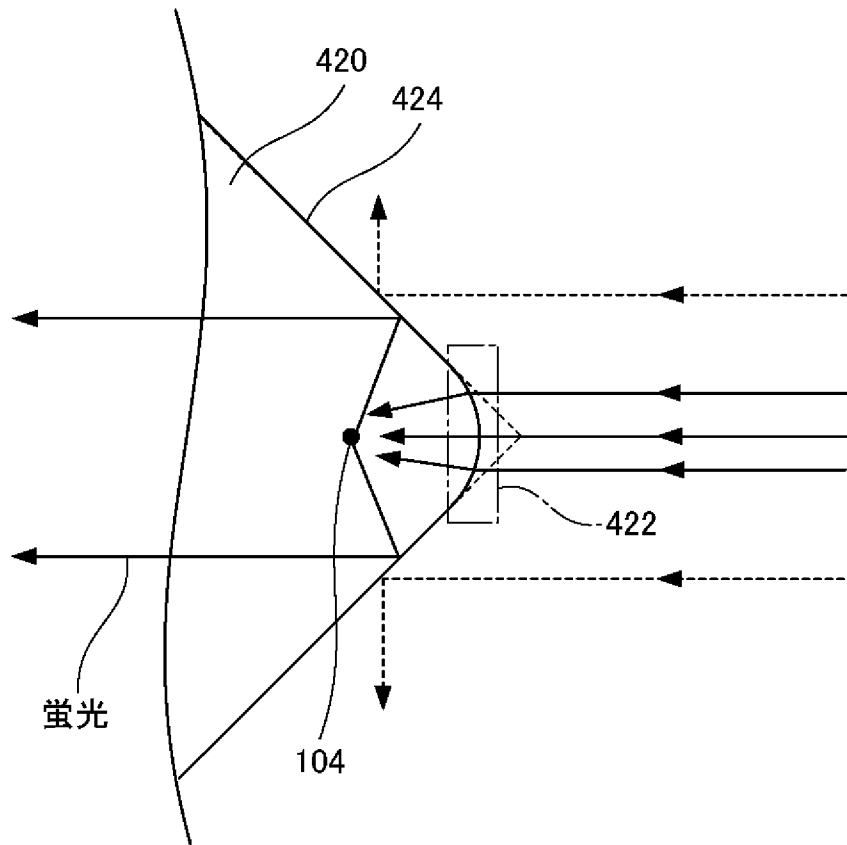
[図17]



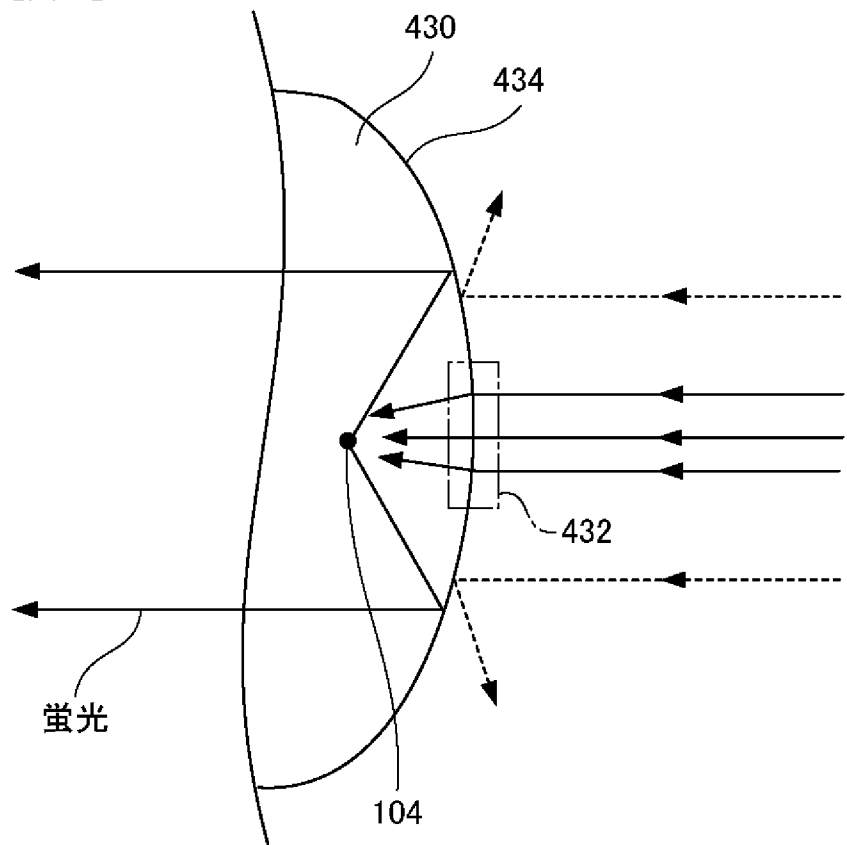
[図18]



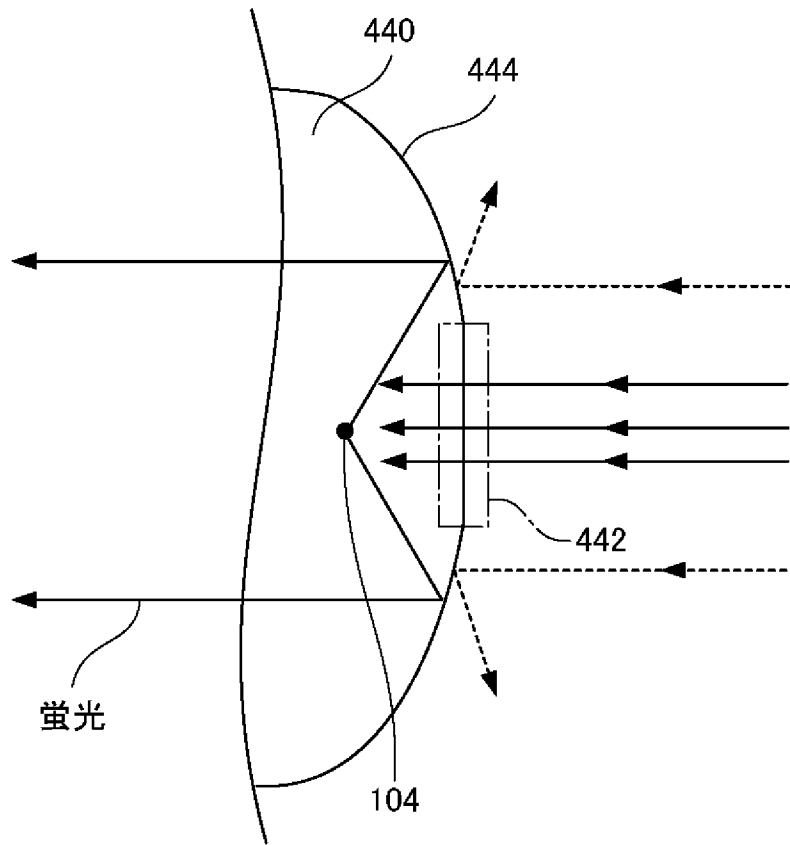
[図19]



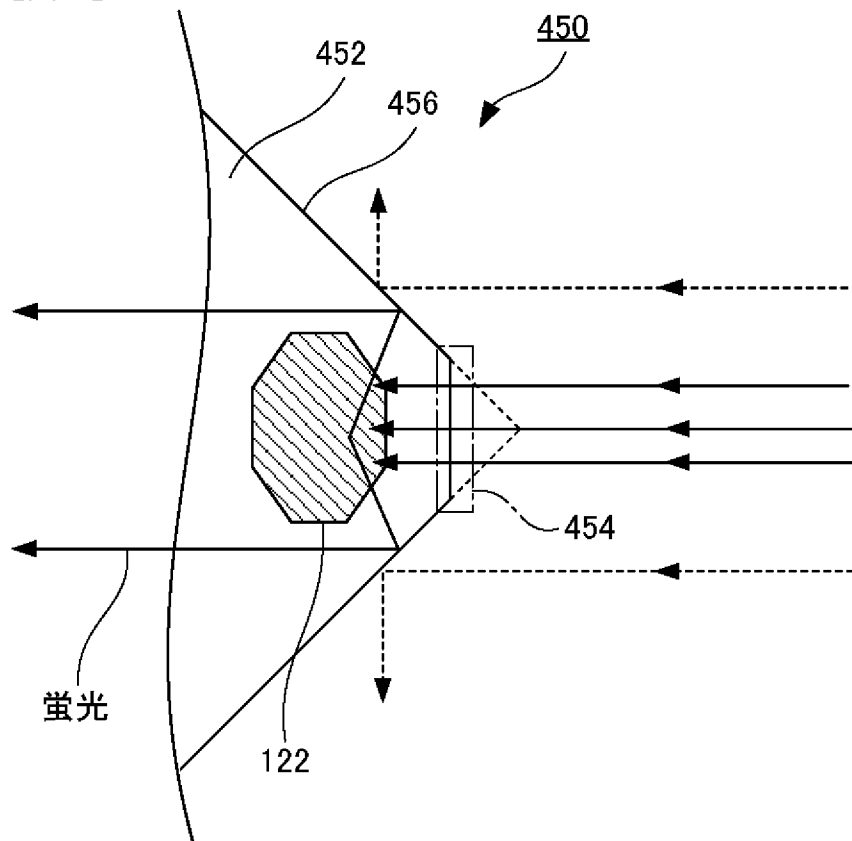
[図20]



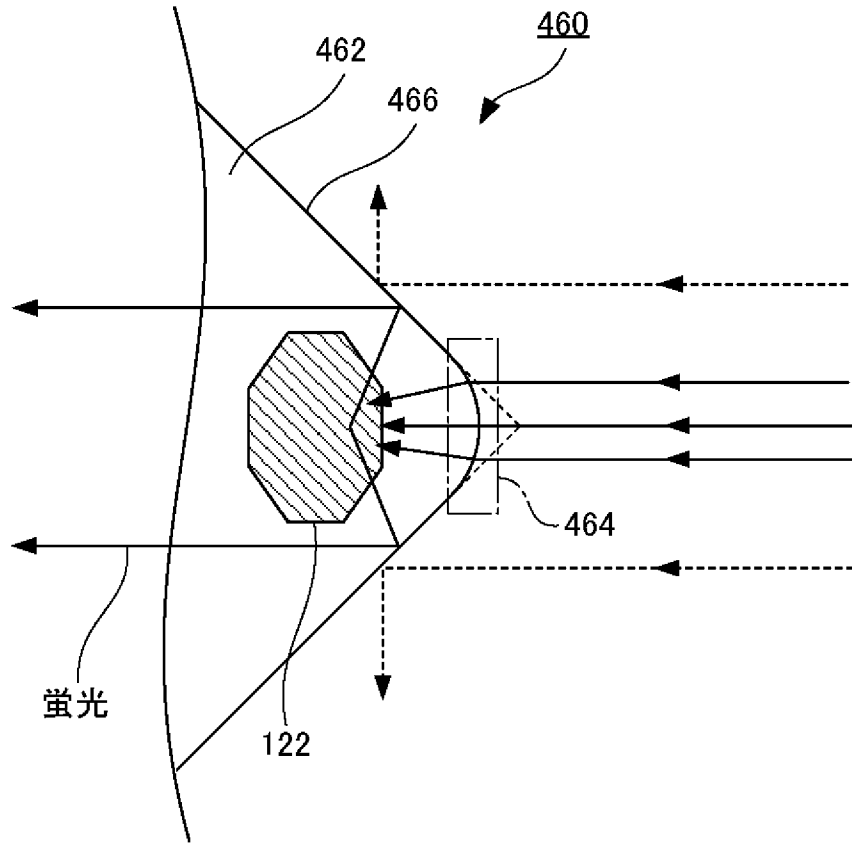
[図21]



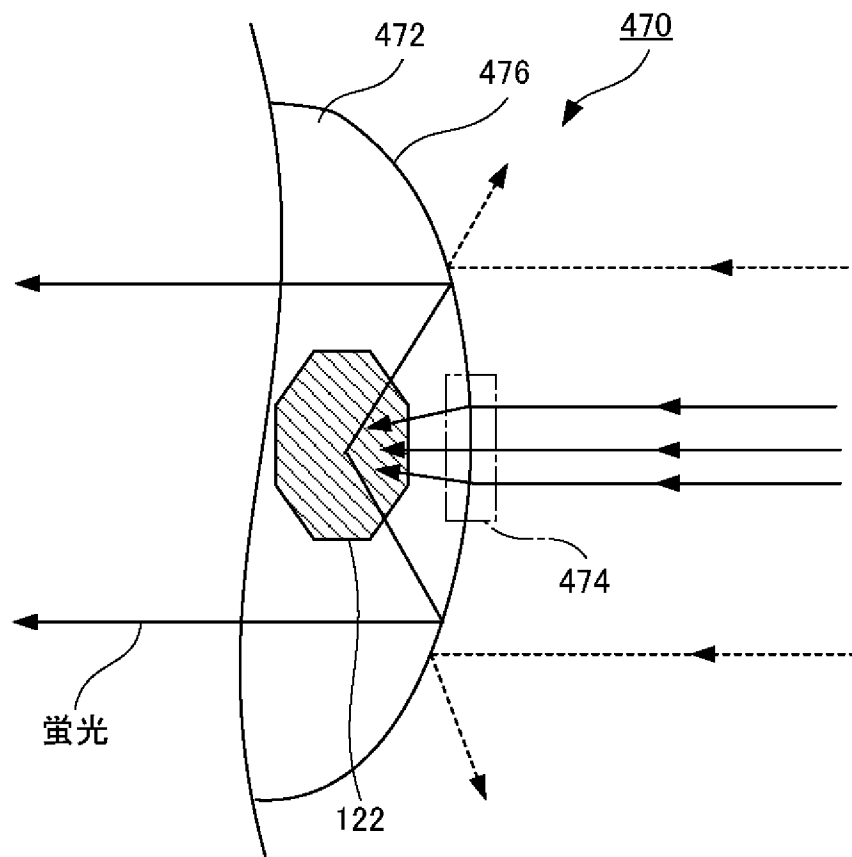
[図22]



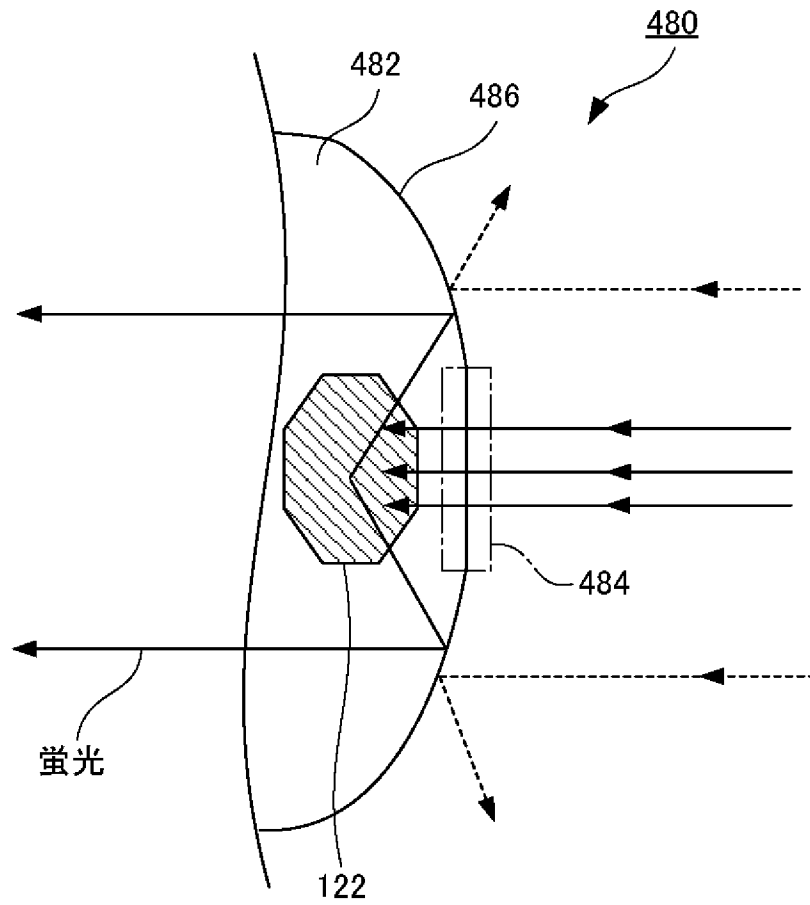
[図23]



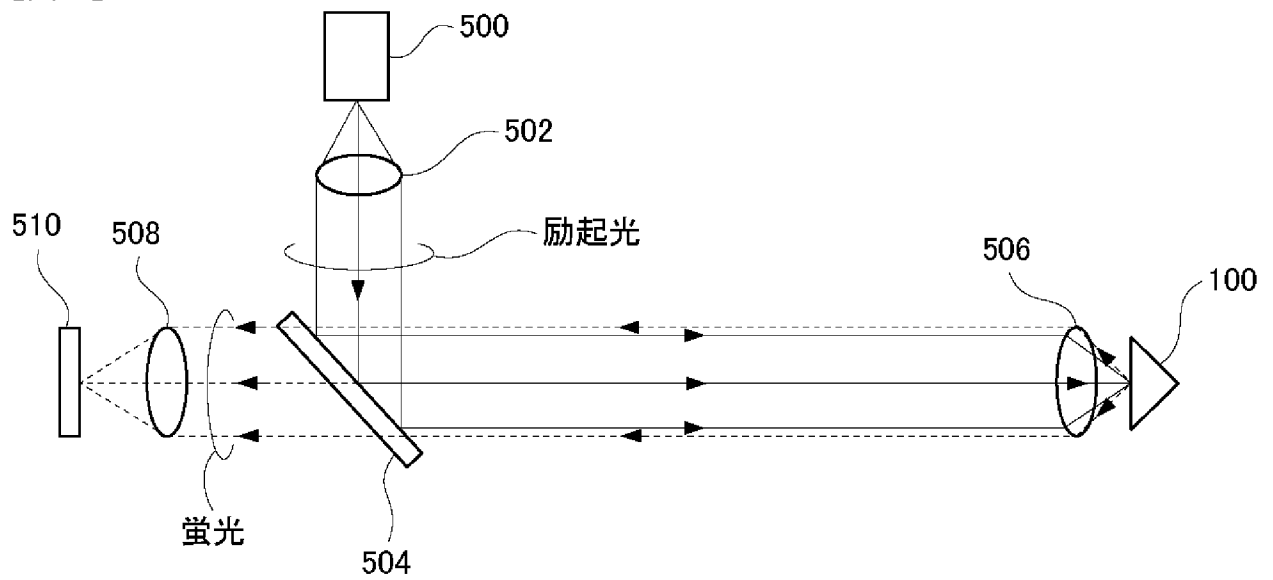
[図24]



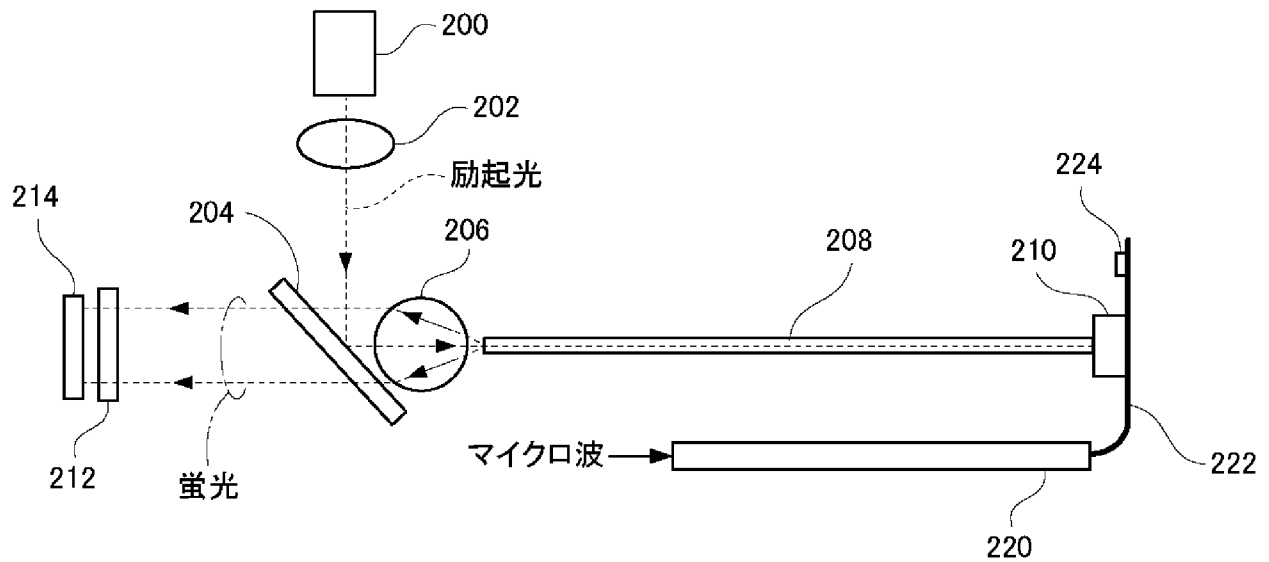
[図25]



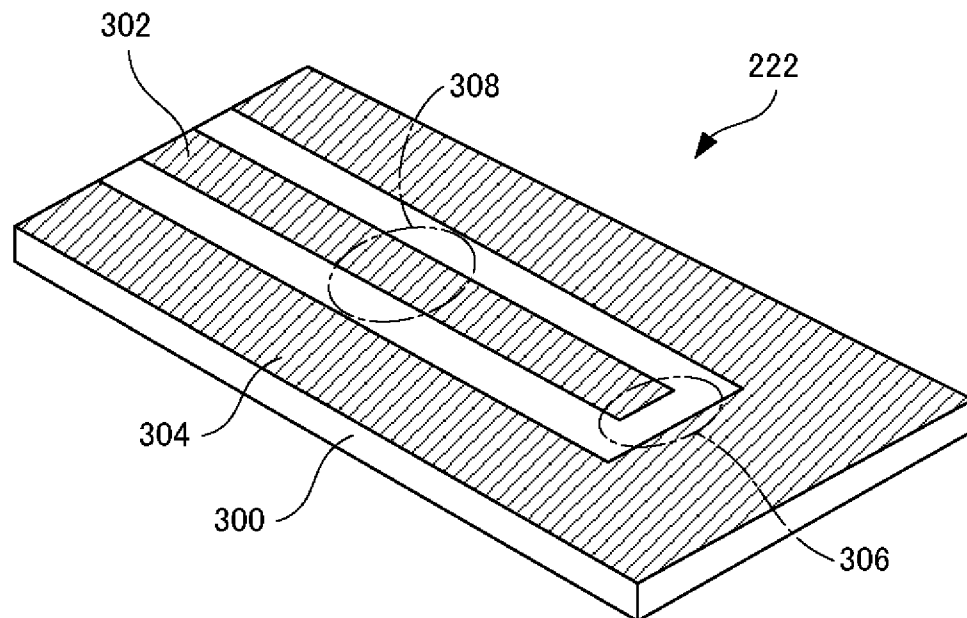
[図26]



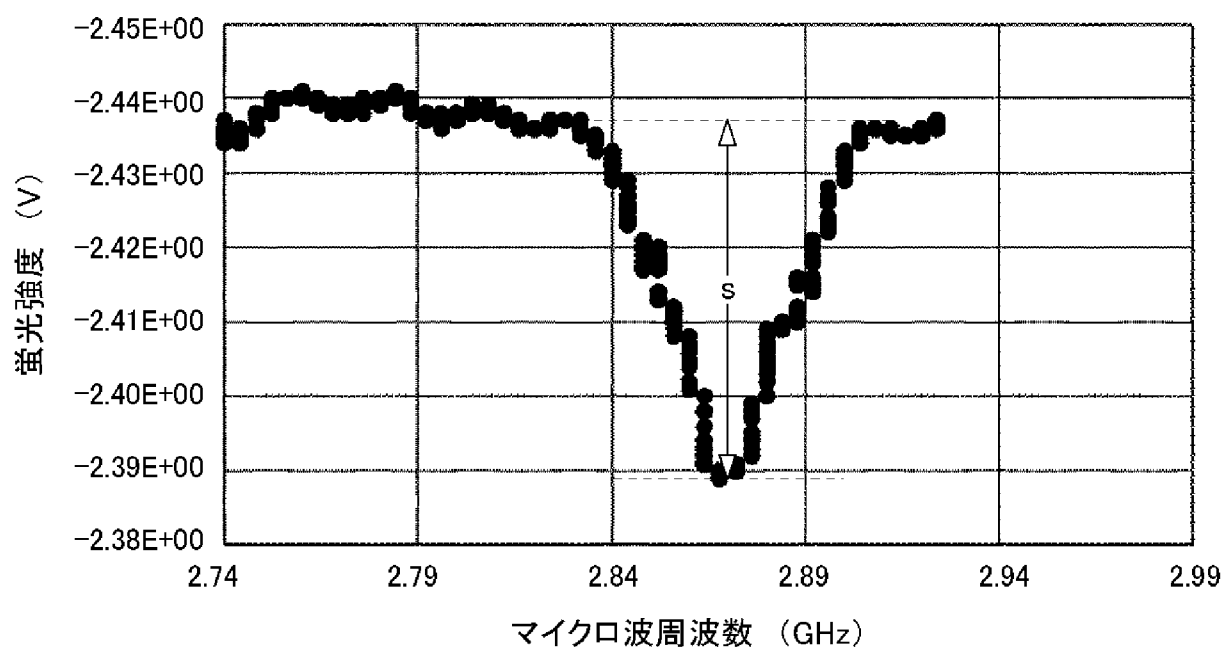
[図27]



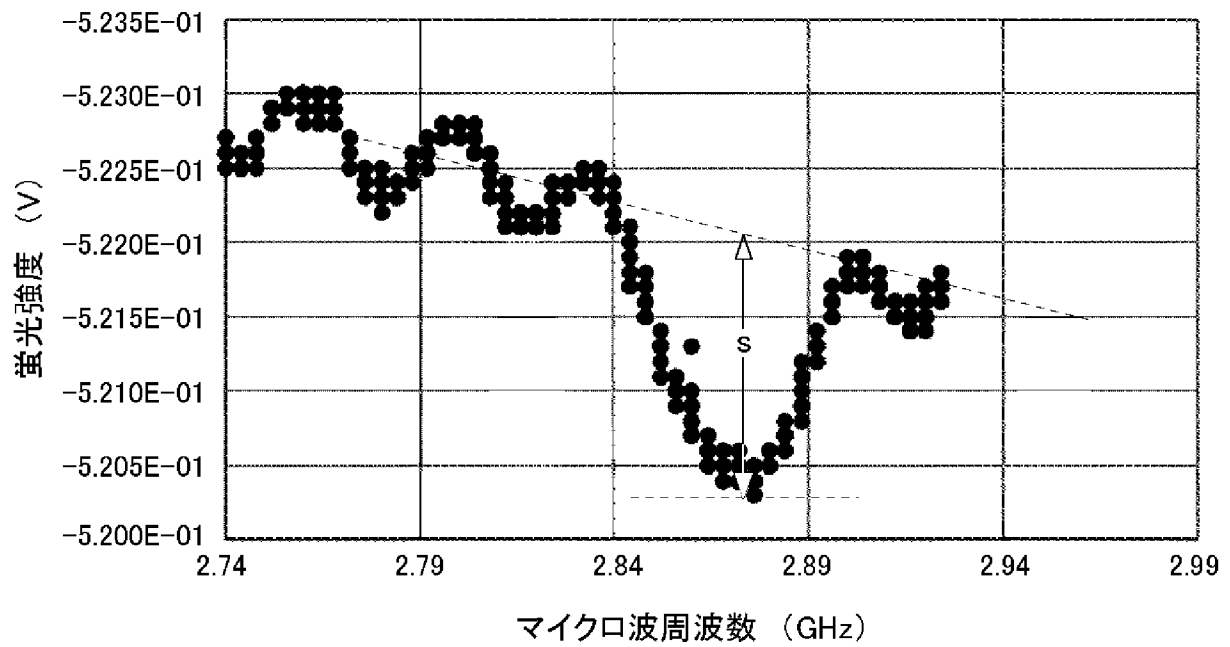
[図28]



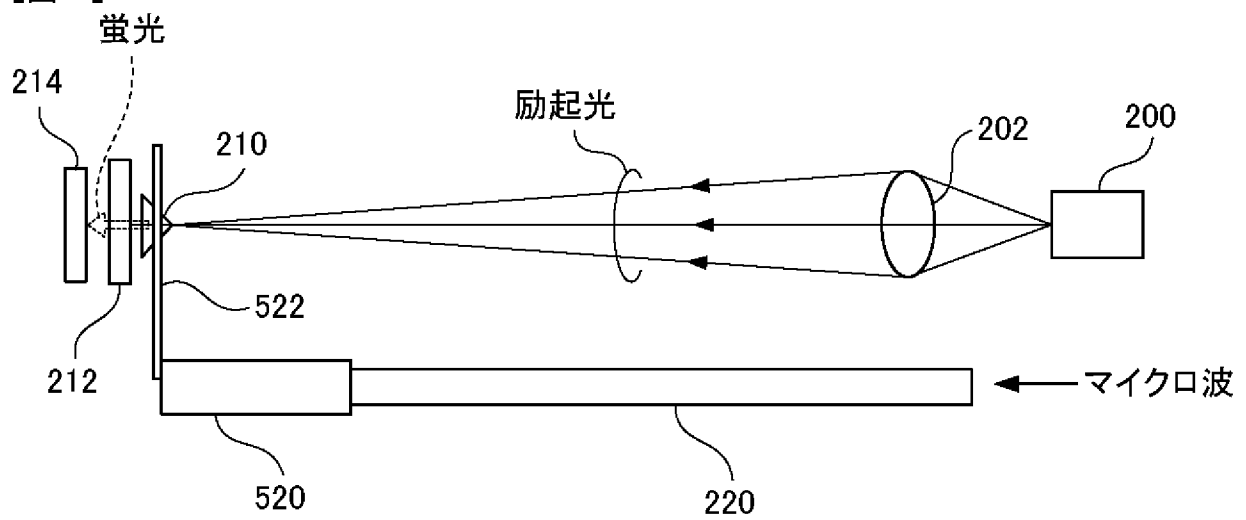
[図29]



[図30]



[図31]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/015393

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G01R 33/20**(2006.01)i

FI: G01R33/20

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)

G01R33/00-33/26; G01N21/62-21/74

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

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	JP 2017-67650 A (JAPAN ADVANCED INST OF SCIENCE & TECH HOKURIKU) 06 April 2017 (2017-04-06) paragraphs [0017]-[0034], [0044]-[0060], fig. 1, 3	1-2, 6, 16-17
X	WO 2020/157497 A1 (THE UNIVERSITY OF WARWICK) 06 August 2020 (2020-08-06) specification, p. 7, line 20 to p. 12, line 32, fig. 2-7	1-2, 6, 8, 11-13
X	DUAN, Dewen. KAVATAMANE, Vinaya Kumar. ARUMUGAM, Sri Ranjini. RAHANE, Ganesh. TZENG, Yankai. CHANG, Huancheng. SUMIYA, Hitoshi. ONODA, Shinobu. ISOYA, Junichi. BALASUBRAMANIAN, Gopalakrishnan. Enhancing fluorescence excitation and collection from the nitrogen-vacancy center in diamond through a micro-concave mirror. Applied Physics Letters 113, 041107 (2018). 27 July 2018, pp. 041107-1 to 041107-5, DOI: 10.1063/1.5037807 in particular, fig. 1, 3, 6	1-2, 8
Y		5, 7

☒ 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

24 May 2022

Date of mailing of the international search report

07 June 2022

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/015393

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2017/0023487 A1 (LOCKHEED MARTIN CORPORATION) 26 January 2017 (2017-01-26)	3, 5, 7-8
Y	paragraphs [0037]-[0061], fig. 1-4	5, 7
X	JP 2017-146158 A (RENESAS ELECTRONICS CORP) 24 August 2017 (2017-08-24)	3, 6, 8, 11-13
	paragraphs [0032]-[0108], [0136]-[0152], fig. 1-7, 11-12	
X	CN 111896511 A (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 06 November 2020 (2020-11-06)	3, 6, 8, 11
	paragraphs [0004], [0049]-[0069], fig. 1	
X	SHARMA, Sarvagya. HOVDE, Chris. BECK, Douglas. Diamond-based field sensor for nEDM experiment. PROCEEDINGS OF SPIE 9755, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIII. 97552U. 13 February 2016, DOI: 10.1117/12.2211910	3-4, 6, 8, 11
	in particular, column "3.2 EIT Experiment", fig. 7-8	
A	US 2015/0192532 A1 (CLEVENSON, Hannah A.) 09 July 2015 (2015-07-09)	1-18
	entire text	
A	DE 102018219750 A1 (ROBERT BOSCH GMBH) 20 May 2020 (2020-05-20)	1-18
	entire text	
A	JP 2020-106352 A (SUMIDA CORPORATION) 09 July 2020 (2020-07-09)	1-18
	entire text	
A	CN 111678896 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 18 September 2020 (2020-09-18)	1-18
	entire text	
A	CN 111679098 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 18 September 2020 (2020-09-18)	1-18
	entire text	
A	JP 2020-176994 A (SUMIDA CORPORATION) 29 October 2020 (2020-10-29)	1-18
	entire text	
P, A	KR 10-2021-0075402 A (KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE) 23 June 2021 (2021-06-23)	1-18
	entire text	
P, A	WO 2021/246064 A1 (SUMIDA CORPORATION) 09 December 2021 (2021-12-09)	1-18
	entire text	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/015393

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2017-67650	A	06 April 2017	(Family: none)	
WO	2020/157497	A1	06 August 2020	GB 2580931	A
				US 2022/0146605	A1
				CN 113678041	A
US	2017/0023487	A1	26 January 2017	WO 2016/118791	A1
JP	2017-146158	A	24 August 2017	US 2017/0234941	A1
				paragraphs [0057]-[0134], [0161]-[0177], fig. 1-7, 11-12	
CN	111896511	A	06 November 2020	(Family: none)	
US	2015/0192532	A1	09 July 2015	WO 2015/105527	A1
DE	102018219750	A1	20 May 2020	(Family: none)	
JP	2020-106352	A	09 July 2020	US 2020/0209493	A1
				EP 3674734	A1
				CN 111381198	A
CN	111678896	A	18 September 2020	(Family: none)	
CN	111679098	A	18 September 2020	(Family: none)	
JP	2020-176994	A	29 October 2020	(Family: none)	
KR	10-2021-0075402	A	23 June 2021	(Family: none)	
WO	2021/246064	A1	09 December 2021	JP 2021-189147	A

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01R 33/20(2006.01)i FI: G01R33/20														
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）） G01R33/00-33/26; G01N21/62-21/74 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2022年</td> </tr> </table> 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）			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2022年	日本国実用新案登録公報	1996-2022年	日本国登録実用新案公報	1994-2022年				
日本国実用新案公報	1922-1996年													
日本国公開実用新案公報	1971-2022年													
日本国実用新案登録公報	1996-2022年													
日本国登録実用新案公報	1994-2022年													
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	JP 2017-67650 A（国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学）06.04.2017（2017-04-06） [0017]～[0034]，[0044]～[0060]，図1，図3	1-2，6，16-17												
X	WO 2020/157497 A1（THE UNIVERSITY OF WARWICK）06.08.2020（2020-08-06） 明細書第7頁第20行～第12頁第32行，図2～7	1-2，6，8，11-13												
X	DUAN, Dewen; KAVATAMANE, Vinaya Kumar; ARUMUGAM, Sri Ranjini; RAHANE, Ganesh; TZENG, Yan-Kai; CHANG, Huan-Cheng; SUMIYA, Hitoshi; ONODA, Shinobu; ISOYA, Junichi; BALASUBRAMANIAN, Gopalakrishnan, "Enhancing fluorescence excitation and collection from the nitrogen-vacancy center in diamond through a micro-concave mirror", Applied Physics Letters 113, 041107 (2018), 2018.07.27, pp. 041107-1～041107-5, DOI: 10.1063/1.5037807 特に、FIGs. 1, 3, 6	1-2, 8												
Y		5, 7												
X	US 2017/0023487 A1（LOCKHEED MARTIN CORPORATION）26.01.2017（2017-01-26） [0037]～[0061]，図1～4	3, 5, 7-8												
Y		5, 7												
☒ 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。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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）</td> <td>"&" 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	"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	"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	"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	"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）	"&" 同一パテントファミリー文献	"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	
* 引用文献のカテゴリー	"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	"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													
"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	"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													
"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）	"&" 同一パテントファミリー文献													
"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														
国際調査を完了した日 24.05.2022		国際調査報告の発送日 07.06.2022												
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 小川 浩史 2S 9114 電話番号 03-3581-1101 内線 3216												

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	JP 2017-146158 A (ルネサスエレクトロニクス株式会社) 24.08.2017 (2017 - 08 - 24) [0032] ~ [0108], [0136] ~ [0152], 図1 ~ 7, 図11 ~ 12	3, 6, 8, 11-13
X	CN 111896511 A (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 06.11.2020 (2020 - 11 - 06) [0004], [0049] ~ [0069], 図1	3, 6, 8, 11
X	SHARMA, Sarvagya; HOVDE, Chris; BECK, Douglas, "Diamond-based field sensor for nEDM experiment", PROCEEDINGS OF SPIE 9755, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIII, 97552U, 2016.02.13, DOI: 10.1117/12.2211910 特に, "3.2 EIT Experiment" の項, Figures 7-8	3-4, 6, 8, 11
A	US 2015/0192532 A1 (CLEVENSON, HANNAH A.) 09.07.2015 (2015 - 07 - 09) 全文	1-18
A	DE 102018219750 A1 (ROBERT BOSCH GMBH) 20.05.2020 (2020 - 05 - 20) 全文	1-18
A	JP 2020-106352 A (スミダコーポレーション株式会社) 09.07.2020 (2020 - 07 - 09) 全文	1-18
A	CN 111678896 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 18.09.2020 (2020 - 09 - 18) 全文	1-18
A	CN 111679098 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 18.09.2020 (2020 - 09 - 18) 全文	1-18
A	JP 2020-176994 A (スミダコーポレーション株式会社) 29.10.2020 (2020 - 10 - 29) 全文	1-18
P, A	KR 10-2021-0075402 A (KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE) 23.06.2021 (2021 - 06 - 23) 全文	1-18
P, A	WO 2021/246064 A1 (スミダコーポレーション株式会社) 09.12.2021 (2021 - 12 - 09) 全文	1-18

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2022/015393

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2017-67650	A	06.04.2017	(ファミリーなし)	
WO	2020/157497	A1	06.08.2020	GB	2580931 A
				US	2022/0146605 A1
				CN	113678041 A
US	2017/0023487	A1	26.01.2017	WO	2016/118791 A1
JP	2017-146158	A	24.08.2017	US	2017/0234941 A1
				[0057]-[0134], [0161]-[0177], FIGs. 1-7, 11-12	
CN	111896511	A	06.11.2020	(ファミリーなし)	
US	2015/0192532	A1	09.07.2015	WO	2015/105527 A1
DE	102018219750	A1	20.05.2020	(ファミリーなし)	
JP	2020-106352	A	09.07.2020	US	2020/0209493 A1
				EP	3674734 A1
				CN	111381198 A
CN	111678896	A	18.09.2020	(ファミリーなし)	
CN	111679098	A	18.09.2020	(ファミリーなし)	
JP	2020-176994	A	29.10.2020	(ファミリーなし)	
KR	10-2021-0075402	A	23.06.2021	(ファミリーなし)	
WO	2021/246064	A1	09.12.2021	JP	2021-189147 A