

(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
2012年7月12日(12.07.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/093654 A1

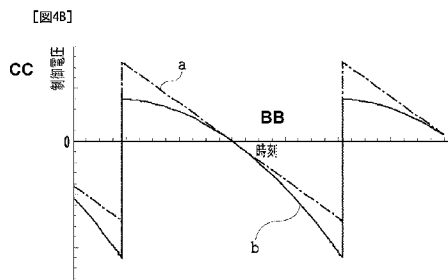
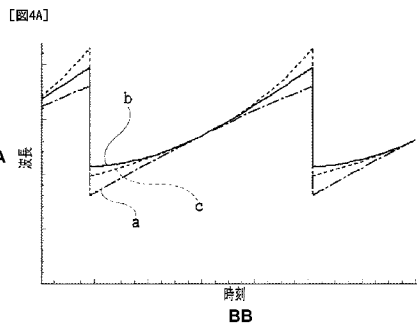
- (51) 国際特許分類:
G01N 21/01 (2006.01) H01S 3/107 (2006.01)
G02F 1/29 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/000017
- (22) 国際出願日: 2012年1月4日(04.01.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-000594 2011年1月5日(05.01.2011) JP
特願 2011-011062 2011年1月21日(21.01.2011) JP
特願 2011-132482 2011年6月14日(14.06.2011) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 日本
電信電話株式会社(NIPPON TELEGRAPH AND
TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 Tokyo
(JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 豊田 誠治
(TOYODA, Seiji) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市

緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内
Tokyo (JP). 長沼 和則(NAGANUMA, Kazunori)
[JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9
-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 岡部
勇一(OKABE, Yuichi) [JP/JP]; 〒1808585 東京都
武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産セン
タ内 Tokyo (JP). 八木 生剛(YAGI, Shogo) [JP/JP];
〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11
N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 加藤 和利
(KATO, Kazutoshi) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野
市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内
Tokyo (JP). 上野 雅浩(UENO, Masahiro) [JP/JP]; 〒
1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N
T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 坂本 尊
(SAKAMOTO, Takashi) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武
蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産セン
タ内 Tokyo (JP). 今井 欽之(IMAI, Tadayuki)
[JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9
-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 宮津
純(MIYAZU, Jun) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野
市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内
Tokyo (JP). 野口 一人(NOGUCHI, Kazuto) [JP/JP];
〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11

[続葉有]

(54) Title: WAVELENGTH SWEEP LIGHT SOURCE

(54) 発明の名称: 波長掃引光源



AA Wavelength
BB Time
CC Control voltage

(57) Abstract: In a wavelength sweep light source using a polygon mirror in a conventional technique, an oscillation wavelength changes approximately linearly in a form of being slightly convex upward with respect to time. On the other hand, in an SS-OCT wavelength sweep light source, the wavelength is desired to change so that a wave number (inverse of wavelength) rectilinearly changes on a time axis. The wavelength sweep light source in the conventional technique cannot attain such a wavelength change and has a problem in that a nonlinear distortion occurs in an OCT image obtained, and a point image cannot be maintained to be sharp. According to the present invention, in the wavelength sweep light source with the use of an electro-optic deflector including a KTN or the like, to a control voltage of the electro-optic deflector, a main saw wave like waveform and a correction including a power component of the saw wave like waveform are added, thereby generating such a wavelength change that the wave number changes rectilinearly with respect to the time axis. The control voltage is controlled so that a change rate of the oscillation wavelength becomes larger as the oscillation wavelength to be swept is swept to the side of a long wavelength. By the control voltage, as the oscillation wavelength is swept to the side of the long wavelength, the oscillation wavelength changes more quickly, and a time change of the oscillation wavelength has a form of being convex downward.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2012/093654 A1



N T T 知的財産センター内 Tokyo (JP). 石橋 茂雄 (ISHIBASHI, Shigeo) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センター内 Tokyo (JP).

- (74) 代理人: 特許業務法人 谷・阿部特許事務所 (TANI & ABE, p.c.); 〒1070052 東京都港区赤坂2丁目6-20 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH,

PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

ポリゴンミラーを用いた従来技術の波長掃引光源では、発振波長は、時間に対してやや上に凸で概ね線形的に変化する。一方、SS-OCTの波長掃引光源では、時間軸上で、波数(波長の逆数)が直線的に変化するよう、波長変化することが求められる。従来技術の波長掃引光源ではこのような波長変化を実現できず、得られるOCTイメージに非線形な歪が生じ、点像をシャープに保つことができない問題があった。本発明は、KTNなどを含む電気光学偏向器を利用した波長掃引光源において、電気光学偏向器の制御電圧に、主たる鋸波状波形と、鋸波状波形のべき乗成分を含む補正を加えることにより、波数が時間軸に対して直線的に変化するような波長変化を生じさせる。制御電圧は、掃引される発振波長が長波長側に掃引されるほど、発振波長の変化率が大きくなるように制御される。この制御電圧により、発振波長が長波長側となるほど、発振波長がより速く変化して、発振波長の時間変化は、下に凸の形状となる。

明 細 書

発明の名称：波長掃引光源

技術分野

[0001] 本発明は、光学機器や電子機器等に使用可能な光源に関する。より詳細には、波長掃引した光を利用したイメージングに使用可能な波長掃引光源に関する。

背景技術

[0002] 光学機器を使ったイメージング技術は、カメラやプリンタ、ファクシミリなどの民生用の電子機器だけでなく、医療分野にも広がっている。生体内部の断層を非侵襲的にイメージングするために、既に、X線を使用したX線撮影や超音波を使用した診断が広く利用されている。X線を使用した方法は、被爆の問題のため使用頻度や使用部位に大幅な制限があり、また、その分解能はフィルムの等倍撮影の分解能に制限される。超音波を使用した方法は、被爆の問題がないためX線のような使用の制限は無いが、分解能は通常1 cm程度に過ぎない。したがって、細胞レベルサイズでのイメージングは不可能である。

[0003] 医療現場では、生体表皮下の断層イメージをミクロンオーダーの分解能で生成することのできる新たな技術が望まれていた。これを実現する技術として、1990年代から開発が進められてきた光コヒーレントトモグラフィー (Optical Coherence Tomography : 以下OCTと呼ぶ) が知られている。

[0004] OCTは、マイケルソン干渉計の原理を利用しており、低コヒーレンスな光を光源として使用して、この低コヒーレンス光を生体へ照射する。参照光と生体からの反射光との干渉光に基づいて、生体表皮下のイメージが得られる。OCTは、網膜の診断のために眼科の必須の診断機器として実用化されている。

[0005] 図13は、OCTの基本原理を説明する図である (非特許文献1)。以下、簡単に基本原理の概要のみを述べる。低コヒーレンス光源1からは、コヒ

ーレンス長 ΔlC を持つ低コヒーレンスな光が、生体4への入射光として供給される。光源1からの出射光6は、ビームスプリッタ2に入射して2等分される。2等分された光の一方の光7は可動ミラー3へ進み、可動ミラー3において反射して、再び参照光8としてビームスプリッタ2へ向かう。2等分された光のもう一方の光9は、生体4の内部の異なる深さの反射面A、BまたはCにおいて反射を受け、それぞれ信号光11a、11b、11cが得られる。各信号光は、ビームスプリッタ2を経て、参照光10と干渉する。この干渉によって、生体中の余分な散乱によって波面が歪んだ反射光は取り除かれ、元の平面波を維持した反射光のみが選択的に検出される。

[0006] ここで、反射面Aで反射する光が干渉を生じるのは可動ミラー3がA'の位置にある場合である。このときビームスプリッタ2の中心と可動ミラー3との距離をLR、ビームスプリッタ2の中心と反射面Aとの距離をLSとすると、次式の関係を満たすときに、参照光と信号光とが干渉して、光検出器5から電気信号が得られる。

$$|LR-LS| < \Delta lC \quad \text{式(1)}$$

[0007] 上式は、反射面Aおよび可動ミラーの位置A'、反射面Bおよび可動ミラーの位置B'、反射面Cおよび可動ミラーの位置C'に、それぞれ一対一に対応して成り立つ。従って、可動ミラー3を連続的に一定速度vで移動させることによって、生体4内の光軸(z軸)方向に沿った生体表皮下の反射光強度分布を、 ΔlC の空間分解能で測定することができる。スキャンミラーなどによって生体への入射光をx方向にスキャンすることによって、x-z面内の生体表皮下の反射光強度分布が得られ、これが最終的なOCTイメージとなる。図13におけるマイケルソン干渉計の構成は、光ファイバカップラーを利用することができるため、臨床現場にも十分利用可能な検査機器が実現されている。

[0008] 図13に示した構成のOCTでは、可動ミラーを移動させてイメージデータを時系列に取得するため、時間領域(Time Domain: TD)OCT(以下TD-OCT)と呼ばれる。TD-OCTでは、質量を持つ可動ミラーを移動

する必要があるため、スキャン速度に限界がある。ところが、検査の状況によって生体自体を完全に固定するのが難しいことが多く、できるだけ短時間でスキャンを行なって必要なイメージデータを得るのが好ましい。また、生体内で血管が存在する深さの部分までスキャンを行うと、血管内を移動する赤血球による散乱のためにイメージ取得に困難が生じる。このため、OCTでは、できるだけ速く深さ方向の情報を取得したい要請があった。

[0009] そこで、干渉信号をフーリエ変換して光軸に沿った反射光強度を求めるフーリエ領域 (Fourier Domain: FD) - OCT (以下FD-OCT) が提案された。FD-OCTでは、図13の光検出器5の前に、生体からの信号光を各波長の光に分解する分光器を配置して、干渉スペクトルを光検出器の検出器要素アレイで検出する。すなわち各波長に対応した、多数の検出器要素素子が配置された並列ディテクタによって、干渉スペクトルを求める。並列ディテクタで検出したスペクトルをフーリエ変換して、光軸に沿った反射光強度部分分布が得られる。しかしながら、FD-OCTにおいては、多数の検出器要素素子を持った並列ディテクタが必要となる。多い場合には1000個を越える検出器要素素子において、同時に、各波長の信号を検出する必要がある。このような並列ディテクタは、1.1 μm 以下の波長帯域でシリコンCCDまたはCMOSによるものが実現されているだけであって、より長い波長においては並列ディテクタの入手が難しい。

[0010] 従って現時点でFD-OCTは、可視光が利用可能な網膜診断などには適用可能であるが、より長波長領域での動作を必要とする皮膚等の組織に対するOCTには適用できない。また、血管の断層イメージングなどに適用するにあたっては、赤血球のヘモグロビンによる散乱のために1.3 μm 程度まで長波長側の光を使用しないと、ヘモグロビンによる吸収が無視できない。一方で、光源の波長が1.5 μm 近傍にまで至ると、今度は水による吸収が顕著となる。1.6 μm を越えると、光検出器の入手に困難が生じる。これらの理由のため、皮膚等に対してOCTを利用するためには、1.3 μm 帯の光源を使用したい要請があった。

[0011] そこで新たに注目されているのが、FD-OCTを変形して、光源の周波数の掃引を行う掃引光源（Swept Source：SS）-OCT（以下SS-OCT）である。SS-OCTでは、FD-OCTのようにコヒーレンス光源からの光を生体に照射して得られた信号光を分光器によって分光して、一度に多数に波長の信号を生成するのではなく、光源波長を規則正しく掃引する。光源からの光の波長掃引を行うことによって、1つの検出器を使用して、時分割で各波長の信号を検出できる。すなわち、FD-OCTでは分光器によって空間的な位置によって波長分割していたのに対して、SS-OCTでは時間によって波長分割を行って、検出器を1つで済ませることができる。多数の検出器要素素子を持った並列ディテクタが不要となり、検出器の選択の制限が無くなるため、1.3 μm 帯域の光源も使用できる。

[0012] 図14は、SS-OCTの原理を説明するための模式的に示した図である（非特許文献1）。SS-OCTでは、生体24に対して、光周波数（波長）掃引光源21から、時間に対して直線的にその光周波数を掃引した光信号26を供給する。光周波数掃引光源21は、例えば、波長可変レーザが使用される。図14に示したSS-OCTにおいては、ミラー23はその位置を固定されている。ビームスプリッタ22の中心とミラー23の距離をLR、ビームスプリッタ22の中心と生体表面31との距離をLSとすると、 $LR=LS$ となるように各要素が配置されている。

[0013] このとき、参照光28と、生体内の反射面32および反射面33からのそれぞれの反射光29b、29cとの光周波数の差は、時間に関係なく一定となる。これらの光周波数の差を f_2 および f_3 とすれば、参照光28と反射光29b、29cとの干渉によって、反射面32および反射面33に対応したビート周波数 f_2 、 f_3 が混在した信号光が得られる。

この信号光をフーリエ変換すると、ビート周波数 f_2 、 f_3 における反射光強度が得られる。光源21からの光周波数が直線的に掃引されれば、ビート周波数 f_2 、 f_3 と、深さ d_2 、深さ d_3 は正比例する。生体内では、各所から反射光が生じるため、干渉光をフーリエ変換することによって、光軸（z軸）

方向に沿った、反射光強度の分布を得ることができる。x軸方向にもビームスキャンを行えば、x-z面内でのOCTイメージが得られる。

- [0014] SS-OCTでは、光検出器25は、異なるビート周波数の干渉光が混在した信号光を単一の検出素子で検出すれば良いので、従来のFD-OCTのように並列ディテクタが不要となる。皮膚等の診断に好適な1.3 μ m帯域の掃引光源を使用することが可能となる。SS-OCTは、光ファイバケーブルを使用した安定な構成、可動ミラーが不要なことによる高速イメージ取得、および多様な光検出器の利用容易性から、眼科診療以外の領域においてもさらに実用化が進められている。

先行技術文献

特許文献

- [0015] 特許文献1：国際公開公報WO2006/137408 明細書

非特許文献

- [0016] 非特許文献1：春名正光 「光コヒーレンストモグラフィーの進展」、応用物理第77巻 第9号、p1085-1092、2008年

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0017] 上述のSS-OCTにおいては掃引、光波長掃引光源が重要な構成要素の一つとなる。従来技術における光波長掃引光源としては、例えば、ポリゴンミラーを用いたものが用いられていた。
- [0018] 図15は、従来技術のポリゴンミラーを用いた波長掃引光源の構成を示した図である。この波長掃引光源100は、ポリゴンミラー120と、リトロ構成で配置された回折格子106および利得媒質101などからなるレーザ発振器とから構成される。レーザ発振器は、利得媒質101の両端に集光レンズ102、111を備え、出力結合鏡112から出力光113が得られる。利得媒質101からの入射光はポリゴンミラー120の反射面Aにおいて反射して、次の回折格子方程式の条件を満たす入射角 θ (110)で回折

格子 106 に入射する。

$$2 \Lambda \sin \theta = m \lambda \quad \text{式 (2)}$$

上式で、 Λ は回折格子のピッチであり、 λ は発振波長、 m は回折次数である。

[0019] 発振光は、回折格子 106 において入射角と同じ出射角 θ で反射して、回折格子 106 と出力結合鏡 112 との間の光路を往復する。ポリゴンミラー 120 は、一定速度で方向 121 の向きに回転するため、ポリゴンミラー 120 の反射面 A における発振光の入射・反射角が回転と共に周期的に変化する。従って、回折格子 106 への入射角 θ によって、回転とともに、式 (2) によって決まる発振波長 λ が変化する。ポリゴンミラー 120 は、一定回転速度で回転するため、回折格子 106 への入射 (反射) 角 θ は、等速に変化する。従って、波長掃引光源 100 の発振波長 λ は時間に対して概ね直線的に変化する。

[0020] 図 16 は、ポリゴンミラーを用いた従来技術の波長掃引光源によって得られる発振波長の時間変化を示した図である。実線 40 で示したように発振波長は、横軸の時間 t に対してやや上に凸であって概ね線形的 (直線的) に変化している。しかしながら、SS-OCT に対して求められる波長の時間変化のプロファイルは、ポリゴンミラーを用いた波長掃引光源によって得られるような、発振波長が線形に変化するような時間変化とは異なるものであった。

[0021] ここで、再び図 13 で説明した OCT の基本原理を参照する。OCT においては、生体内部を光軸 (z 軸) 方向に直線性良く線形的にスキャンするためには、参照光 7、8 の遅延時間が線形的に変化する必要がある。言い換えると、可動ミラー 3 の位置が、可動範囲の全域において A' から C' に向かって等速に移動することによって、生体内も等速にスキャンされる。このような動作が、OCT イメージの線形性の観点から、最も理想的となる。ミラーが等速に移動しないと、結果として得られる OCT イメージは、光軸 (z 軸) 方向について非線形で歪曲したものとなる。

[0022] さらに、上記の可動ミラーの等速移動の理想動作を、図14のSS-OCTの構成へ適合する場合を考える。ミラーの位置をフーリエ変換すると、位置の逆数となる。位置の逆数は、すなわち波数に相当する。したがって、時間とともに、波数（波長の逆数）が直線的に変化するように、波長が変化するような波長掃引光源が理想的となる。そうでないと、生体内の一つの反射面に対応するビート周波数が単一でなくなり、その結果、OCTイメージの尖鋭度が損なわれる。

[0023] 図16には、波数が時間に対して直線的に変化する場合の波長変化を、破線41によって、望ましい波長変化として同時に示してある。ポリゴンミラーを用いた従来技術の波長掃引光源の場合の波高変化と見比べて、下に凸に湾曲し、発振波長が長波長側（図16の縦軸の上方側）となるほど変化率が増えるような波長変化プロファイルが適切である。

[0024] しかしながら、ポリゴンミラーを用いている場合、ポリゴンミラーは大きな慣性モーメントを持っているため、一定回転速度以外の方法で回転速度を制御することは極めて困難である。また、図16に示したポリゴンミラーを使用した従来技術による、上に凸であって概ね直線状の波長変化は、式(2)の回折格子方程式の \sin 項に由来する形状であって、通常の手段を用いてもこの湾曲の向きを変えることは出来ない。

[0025] 上述のように、従来技術の波長掃引光源では、SS-OCTに適合した波長変化を実現することができず、尖鋭なOCTイメージが得られない問題があった。

課題を解決するための手段

[0026] 本発明は、上述のような問題に鑑みてなされたもので、OCTイメージの深さ方向の線形性のひずみを排除し、尖鋭なOCTイメージを得ることが可能であって、SS-OCTに適用可能な波長掃引光源を提供することを目的とする。

[0027] 請求項1に係る発明は、時間的に出力波長が周期的に変化する光源において、電気光学偏向器を含む発振器部と、主たる鋸歯状波形に加え、該鋸歯状

波形のべき乗成分が重畳された、前記電気光学偏向器へ印加する制御電圧を生成する制御電圧生成部とを備えたことを特徴とする波長掃引光源である。

[0028] 電気光学偏向器としては、タンタル酸ニオブ酸カリウム($\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$) : KTN)や、さらにリチウムをドーピングした ($\text{K}_{1-y}\text{Li}_y\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$)) を利用するのが好ましい。

[0029] 請求項2に係る発明は、請求項1の波長掃引光源であって、前記発振器部は、利得媒質と、前記利得媒質の一端からの光が入射する回折格子とを含み、前記利得媒質と前記回折格子とが光学的に接続された共振器から構成され、前記電気光学偏向器は、前記利得媒質と前記回折格子との間であって、前記共振器により形成される光路上に配置され、前記回折格子への前記電気光学偏向器側からの光入射角を θ 、前記電気光学偏向器の制御電圧対角度感度を γ [rad/V]とすると、前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、式

[0030] [数1]

$$\gamma \frac{3 + \cos 2\theta}{2 \sin 2\theta}$$

[0031] で表される係数を有する二乗成分が重畳されることを特徴とする。

[0032] 制御電圧生成部は、アナログ電子回路によって構成可能であり、鋸波状波形発生、乗算器、加算器を組み合わせる構成できる。KTNなどの電気光学偏向器を利用する場合には、制御電圧の生成のために高電圧増幅器が含まれるのが好ましい。このとき、制御電圧対角度感度 γ [rad/V]には、高電圧増幅器のゲインAが含まれるものとする。制御電圧生成部として、任意波形発生器も利用できる。

[0033] 請求項3に係る発明は、請求項2の波長掃引光源であって、前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、前記二乗成分に加えて、式

[0034] [数2]

$$\gamma^2 \frac{17 + 6 \cos 2\theta + \cos 4\theta}{6 \sin^2 2\theta}$$

[0035] で表される係数を有する三乗成分がさらに重畳されることを特徴とする。

[0036] 請求項4に係る発明は、請求項1の波長掃引光源であって、前記発振器部

は、利得媒質と、前記利得媒質の一端からの光が入射する回折格子と、前記回折格子への前記入射光の回折光が直入射する端面鏡とを含み、前記回折格子を介して、前記利得媒質と前記端面鏡とが光学的に接続された共振器から構成され、前記電気光学偏向器は、前記利得媒質と前記回折格子との間であって、前記共振器により形成される光路上に配置され、前記回折格子への前記電気光学偏向器側からの光入射角を θ 、前記回折格子への前記端面鏡側からの光入射角を ϕ 、前記電気光学偏向器の制御電圧対角度感度を γ [rad/V]とすると、前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、式

[数3]

$$\gamma \frac{3 + \cos 2\theta + 2 \sin \phi \sin \theta}{2(\sin 2\theta + 2 \sin \phi \cos \theta)}$$

で表される係数を有する二乗成分が重畳されることを特徴とする。

[0037] 請求項5に係る発明は、請求項4の波長掃引光源であって、前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、前記二乗成分に加えて、式

[数4]

$$\gamma^2 \frac{21 - 4 \cos 2\phi + 26 \sin \phi \sin \theta + 2(2 + \cos 2\phi) \cos 2\theta + 2 \sin \phi \sin 3\theta + \cos 4\theta}{6(\sin 2\theta + 2 \sin \phi \cos \theta)^2}$$

で表される係数を有する三乗成分がさらに重畳されることを特徴とする。

発明の効果

[0038] 以上説明したように、本発明は、SS-OCTに適合した波長変化を実現する波長掃引光源を提供することができる。時間軸上の波長変化が、波数について直線的に変化するプロファイルを持つ波長掃引を実現することで、OCTイメージの線形性を大幅に改善し尖鋭なOCTイメージを得ることができる。

図面の簡単な説明

[0039] [図1]本発明の波長掃引光源の第1の構成を示す図である。

[図2]本発明の波長掃引光源の第2の構成を示す図である。

[図3]本発明の波長掃引光源に使用される偏向器の構成および動作を説明する

図である。

[図4A]本発明の第1の構成の波長掃引光源に使用される波長の時間変化の第1の例を示す図である。

[図4B]本発明の第1の構成の波長掃引光源に使用される制御電圧の時間変化の第1の例を示す図である。

[図5A]本発明の第1の構成の波長掃引光源に使用される波長の時間変化の第2の例を示す図である。

[図5B]本発明の第1の構成の波長掃引光源に使用される制御電圧の時間変化の第2の例を示す図である。

[図6A]本発明の第2の構成の波長掃引光源に使用される波長の時間変化の例を示す図である。

[図6B]本発明の第2の構成の波長掃引光源に使用される制御電圧の時間変化の例を示す図である。

[図7]第1の構成による実施例1の波長掃引光源において、二乗成分のみを含む補正の場合の波長誤差を示す図である。

[図8]第1の構成による実施例1の波長掃引光源において、三乗成分まで含めた補正の場合の波長誤差を示す図である。

[図9]第2の構成による実施例2の波長掃引光源における波長誤差を示す図である。

[図10]実施例2の波長掃引光源を用いたOCTにより得られる点像を示す図である。

[図11]第2の構成による実施例3の波長掃引光源における波長誤差を示す図である。

[図12]実施例3の波長掃引光源を用いたOCTにより得られる点像を示す図である。

[図13]OCTの基本原理を説明する図である。

[図14]SS-OCTの原理を模式的に示した図である。

[図15]従来技術のポリゴンミラーを用いた波長掃引光源の構成を示した図で

ある。

[図16]従来技術のポリゴンミラーを用いた波長掃引光源によって得られる発振波長の時間変化を示した図である。

[図17]波数の時間依存性を示す図である。

[図18]図17の場合において、10次高調波までの重畳波形を示す図である。

[図19]第3実施形態の波長掃引光源の構成を示す図である。

[図20]エタロンフィルタの共振特性を示す図である。

[図21]波長掃引光源の出力光を示す図である。

[図22]波長掃引光源の出力光の周波数特性を示す図である。

[図23]図19の共振器内にエタロンフィルタを配置しない場合において、波長掃引光源の出力光の周波数特性を示す図である。

[図24]第3実施形態において、実際に挿入されたエタロンフィルタの入力波長と透過率との関係の一例を示す図である。

[図25A]第3実施形態において、エタロンフィルタの挿入前に測定された各波長掃引特性の一例を示す図である。

[図25B]第3実施形態において、エタロンフィルタの挿入時に測定された各波長掃引特性の一例を示す図である。

[図26]エタロンフィルタ挿入時に測定された波長掃引特性を波長に対して拡大した例を示す図である。

[図27A]エタロンフィルタを使用しないときの波長の様子を示す図である。

[図27B]エタロンフィルタを使用したときの波長の様子を示す図である。

[図28]エタロンフィルタの入力波長と透過率との関係の一例を示す図である。

[図29A]エタロンフィルタの挿入前の波長掃引光源の各波長掃引特性の一例を示す図である。

[図29B]エタロンフィルタを挿入したときの波長掃引特性を示す図である。

[図30]図29Bに示した波長掃引特性のうち1319.9nm~1320.1

5 nmの拡大例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0040] 本発明は、KTNなどを含む電気光学偏向器を利用した波長掃引光源において、電気光学偏向器に印加する制御電圧の波形を適切に成形することによって、波数が時間に対して直線的に変化するような波長変化を生じさせることを特徴とする。以下、最初に実施形態の波長掃引光源の構成について詳細に説明する。次に、電気光学偏向器の構成および動作について説明する。最後に、波数が時間に対して直線的に変化するような波長変化を与える、本発明の実施形態特有の制御電圧の制御方法について説明する。

[0041] <第1実施形態>

図1は、本発明の波長掃引光源の第1の構成を示す図である。波長掃引光源200は、発振器部201および制御電圧生成部202から構成される。発振器部201は、リトロー構成のレーザ発振器であり、利得媒質101は、第1の集光レンズ111および第2の集光レンズ102の間に配置される。回折格子109は、利得媒質101に対して、入射光と回折光が同一方向に入出力するリトロー配置となるような位置に配置される。利得媒質101および回折格子109が光学的に接続され、光共振器が構成される。集光レンズ102と回折格子109との間であって、共振器により形成される光路上には、電気光学偏向器103が配置される。第1の集光レンズ111は、出力結合鏡112に相對し、このようにして出力結合鏡112と回折格子109とを両端とする光共振器が構成される。出力結合鏡112からは、この光共振器によるレーザ作用による出力光113が得られる。

[0042] 発振波長の掃引は、制御電圧生成部202から電気光学偏向器103に結線された制御電圧104を通じ、回折格子109への入射光束を偏向することにより行われる。すなわち、電気光学偏向器103による偏向によって、回折格子109への入射角を変化させる。本発明の構成においては、電気光学偏向器103に印可する電圧を変えることによって、可動部の介在なしに高速に波長を掃引することができる。電気光学偏向器の具体構成については

、後に詳細に説明する。

[0043] 制御電圧生成部202は、電気光学偏向器に対する本発明に特有の制御電圧104を生成する。制御電圧生成部202では、鋸波状波形発生器115からの鋸波状波形出力が、第1の乗算器116の2つの入力に接続される。第1の乗算器116の出力は、第2の乗算器118の一方の入力および第1の加算器117に入力される。鋸波状波形発生器115からの鋸波状波形出力は、第2の乗算器118のもう一方の入力にも接続される。第2の乗算器118の出力は、第2の加算器119へ入力される。鋸波状波形発生器115と、第1の加算器117と、第2の加算器119とは縦続従属されている。

[0044] 図1に示した制御電圧生成部202の構成から明らかなように、第1の加算器117の出力には、鋸波状波形の二乗成分が得られ、第2の加算器119の出力には、鋸波状波形の三乗成分が得られる。第2の加算器119の出力は、電圧利得Aを持つ高電圧増幅器120へ入力され、必要な電圧レベルまで増幅された後、制御電圧104が得られる。後述するように、電気光学偏向器103は、タンタル酸ニオブ酸カリウム(KTN)などの電気光学結晶を利用するのが望ましいので、数100V程度の電圧レベルが必要となる。第1の乗算器116および第2の乗算器118は、図1に明示的に示してはいないが、それぞれゲインを設定可能であって、オフとすることもできる。

[0045] 第1の乗算器116および第2の乗算器118の各ゲインを適切に設定することによって、第2の加算器119の出力には、主たる鋸波状波形に、鋸波状波形の二乗成分と鋸波状波形の三乗成分とがそれぞれ所望の係数を以って重畳された波形が得られる。

[0046] 本発明の課題において説明したように、SS-OCTに利用されていた従来技術の波長可変光源では、発振波長は、図16に示したように横軸の時間 t に対してやや上に凸であって概ね線形的(直線的)に変化している。これは、図1の制御電圧生成部202において、第1の乗算器116および第2

の乗算器 118 の各ゲインを 0 として、発振器部 201 を制御する場合に相当する。すなわち、制御電圧 104 として、鋸波状波形のみが電気光学偏向器 103 に印加される状態に対応する。後述するように本発明では、制御電圧を補正して、鋸波状波形に加えて、鋸波状波形の二乗成分および鋸波状波形の三乗成分を重畳した波形によって、電気光学偏向器 103 を制御する。制御電圧のこの補正の詳細については、後述する。

[0047] <第 2 実施形態>

図 2 は、本発明の波長掃引光源の第 2 の構成を示す図である。波長掃引光源 300 は、発振器部 301 および制御電圧生成部 302 から構成される。発振器部 301 は、リトマン構成のレーザ発振器であり、リトロー構成である第 1 の構成の発振器部 201 と構成は異なるが、制御電圧生成部 302 は第 1 の構成の制御電圧生成部 202 と同一である。従って、次に発振器部 301 の構成のみ説明する。

[0048] 図 2 において、利得媒質 101 は、第 1 の集光レンズ 111 および第 2 の集光レンズ 102 の間に配置される。利得媒質 101 は、第 2 の集光レンズ 102 を経て、電気光学偏向器 103、回折格子 106 および直入射する端面鏡 110 から構成される波長フィルタに結合されている。また、回折格子 106 を介して、利得媒質 101 と端面鏡 110 とが光学的に接続され、共振器が構成される。さらに、第 1 の集光レンズ 111 は、出力結合鏡 112 に相対し、全体で、出力結合鏡 112 と端面鏡 110 を両端とする光共振器が構成される。出力結合鏡 112 からは、この光共振器によるレーザ作用による出力光 113 が得られる。電気光学偏向器 103 は、利得媒質 101 と回折格子 106 との間であって、共振器により形成される光路上に配置されている。

[0049] 本発明の波長掃引光源においては、回折格子 106 への集光レンズ 102 に面する側からの入射角 θ と、端面鏡 110 に面する側からの入射角 ϕ との間に特段の制限は無い。しかし、より強いフィルタ効果を得る観点からは、上述の波長フィルタにおいて、回折格子 106 への集光レンズ 102 に面す

る側からの入射角 θ は、端面鏡110に面する側からの入射角 ϕ と比較して、絶対値が大きく設定されるのが好ましい。その結果、回折格子106への回折格子入射光束107に比して、回折格子出射光束108が伸張され、太く広がり角の小さい光束として端面鏡110で反射される。したがって、波長フィルタの選択波長幅を狭窄化することができる。発振波長の掃引は、電気光学偏向器103に結線された制御電圧源104を通じ、回折格子入射光束107を偏向することにより行われる。

[0050] すなわち、電気光学偏向器103による偏向によって、回折格子106への入射角 θ を変化させる。本発明の波長掃引光源においては、電気光学偏向器103に印加する電圧104を変えることによって、可動部の介在なしに高速に波長を掃引することができる。次に、本発明の波長可変光源に使用するのに好適な電気光学偏向器について説明する。

[0051] 最近、特定の電気光学効果結晶において、新たな現象が見出された。この電気光学効果結晶では、電圧印加による電界に伴って、結晶に電荷の注入が行なわれる。その結果、結晶内に、その注入電荷の形成する空間電荷分布、または、注入電荷がさらに電気光学結晶中に捕捉されて生成されるトラップ電荷分布が生じる。そして、この電荷分布による非一様な電界分布が屈折率の勾配を惹起し、この勾配に直交する光線の進路を屈曲させる現象が生じる。

[0052] この現象の発生には、屈折率変化が電界の二乗に比例して生じる2次の電気光学効果が必要である。さらに、この効果を示す結晶が、大きい誘電率および小さい易動度を有して初めて、現実的な値の印加電圧や電流に伴って、この偏向現象が発現する。この種の結晶の代表的な例として、タンタル酸ニオブ酸カリウム($\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$):KTN)や、さらにリチウムをドーピングした($\text{K}_{1-y}\text{Li}_y\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$))が知られている。

[0053] このような結晶においては、結晶内のすべての部分が偏向作用を担う。光線の伝搬経路上の各部分での作用が累積された偏向を受けて、光線は結晶か

ら出射する。即ち、得られる偏向量は結晶内の光の伝搬長に比例する。この点において、従来用いられていたプリズム型の光偏向器と比べて、その動作機序を全く異にしている。その特有の偏向機序の結果、偏向動作が高速であって、かつ、偏向角範囲が大きく取れるという特徴を有する。このような電気光学偏向器は、特許文献1に詳細が開示されている。

[0054] 図3は、本発明の波長掃引光源に使用される偏向器の構成および動作を説明する図である。図3は、偏向器の偏向面内を見た、基本的な構成および動作を説明している。電気光学結晶301の対向面には、それぞれ電極302および接地電極303が形成される。入射光305は、これら2つの電極の間を通る中心光軸308に沿って伝搬する。ここで、制御電圧源304によって電極302に電圧を印加すると、結晶内の光線は負極（正電圧印加時を示す図3では、接地電極303）側に屈曲した偏向光路307を辿り、偏向した出射光306として結晶301から出射する。

[0055] 偏光光路307を出射端面Aの「結晶側（内部）」において観察すると、あたかも結晶中心に位置する偏光中心310から、光線が発しているように見える。すなわち、偏向作用によって光線が、この偏光中心310の周りに回転するように見える。これを結晶の「外部」の出射光306について観察すると、今度は、あたかも偏向作用によって射出中心309の周りに回転するように見える。このような射出中心309は、出射端面Aにおける屈折作用によって出射端面側に近づき、結晶長をLとすると、出射端面Aから $L/(2n)$ の場所に位置する。ここでnは結晶の屈折率である。

[0056] 電気光学偏向器において得られる上述の偏向量は結晶長に比例する。しかしながら、結晶を長くしようとすると、結晶の均一性の確保がより困難となる。また、結晶を長くすると、静電容量が大きくなるため制御電圧源304に要求される皮相電力が増加する。この結果、電気光学偏向器の高速駆動に障害を来す。このような種類の電気光学偏向器では、実際に必要な長さの結晶を用いる代わりに、内部反射による光路の折り返しを利用することによって、結晶長を増したのと等価な効果を得ることもできる。

- [0057] 次に、本発明の波長掃引光源の動作について、制御電圧生成部 202、302 から電気光学偏向器 103 に与えられる制御電圧 104 を詳細に説明する。ここで、 δ を、電気光学偏向器によって受ける回折格子への入射角変化量とする。
- [0058] 一般に、KTN などを利用した電気光学偏向器では、電気光学偏向器内の光路が、図 1 または図 2 の y 軸の下方側に偏向して δ が負となる時、制御電圧は正の電圧となる。簡単のため、制御電圧 104 と δ の関係は、概ね線形であると考えられる。すなわち、制御電圧 104 と δ とは正比例の関係にあるものとする。
- [0059] 図 1 または図 2 に示した構成の場合では、 δ が正の値となるに従って δ の変化率が大きくなるような制御電圧 104 を KTN に印加することによって、発振波長の時間変化が下に凸となるような波長掃引プロファイルを得ることができる。言い換えると、制御電圧は、発振波長が長波長側に掃引されるほど、発振波長の変化率が大きくなるように制御されれば良い。このように制御電圧が補正されれば、発振波長が長波長側となるほど、発振波長がより速く変化して、発振波長の時間変化は、下に凸の形状となる。このとき、本発明の波長掃引光源では、時間軸上で波数が線形的に変化するように掃引波長が制御される。したがって、本発明を SS-OCT に適用すれば、対象物の生体の深さ方向について線形性が良く、尖鋭な OCT イメージが得られる。
- [0060] 本発明では、電気光学偏向器への制御電圧として、従来技術で使用されていた鋸波状波形の制御信号ではなく、主たる鋸波状波形に加えて、鋸波状波形のべき乗成分を所定の係数（振幅比）で重畳させる。これによって、SS-OCT へ適用するのに好適な、波長掃引光源の制御電圧プロファイルを実現する。鋸波状波形のべき乗成分を所定の係数（振幅比）で重畳させる補正を行う結果、発振波長の時間変化は、下に凸の形状となる。このとき、本発明の波長掃引光源において、波長の時間変化は、波数に対して線形的に変化するように制御される。

[0061] 図4 Aは本発明の第1の構成の波長掃引光源に使用する波長の時間変化の第1の例を示す図、図4 Bは本発明の第1の構成の波長掃引光源に使用する制御電圧の時間変化の第1の例を示す図である。図4および図4 Bでは、主たる鋸波状波形に、鋸波状波形の二乗成分のみを重畳した場合の制御電圧波形を示している。図4 Aは波長の時間変化を示し、図4 Bは制御電圧発生部により与えられる制御電圧の時間変化を示す。aの破線の波形は、従来技術による鋸波状波形のみの場合（ランプ波形）を示している。bの実線の波形は、本例の二乗成分のみを重畳した場合を示している。cの点線の波形は、望ましい波長変化を示したものである。

[0062] 本例では、二乗成分を以下の振幅比で重畳する。図1において、回折格子109への電気光学偏向器103からの光入射角を θ とする。高電圧増幅器120の電圧ゲインをAとしたので、電気光学偏向器103の単体での制御電圧対偏向角度感度をA倍したものを、 γ (rad/V)とする。ここで γ は、偏向角を偏向器への印加電圧で割った値に相当する。以下、制御電圧を $V(t) = V_0 \times t + V_1 \times t^2 + V_2 \times t^3$ とした時の二乗成分および三乗成分の係数の決定法について述べる。ここで、 V_0 は時間の1次の係数、 t は時間、 V_1 は時間の2次の係数、 V_2 は時間の3次の係数を示している。図4 Bの制御電圧波形bは、第1の乗算器116のゲインを調整して、鋸波状波形の二乗成分の係数が次式となるようにしたものである。

[0063] [数5]

$$\gamma \frac{3 + \cos 2\theta}{2 \sin 2\theta} \quad \text{式(4)}$$

[0064] 上式は、式(2)に δ を頭に含めて $2 \Lambda \sin(\theta + \delta) = m \lambda$ と書き、時間 t の関数 $\delta(t)$ の零点の周りで、波数 $1/\lambda$ の t についての2階微分が零となる条件を求めることによって求められる。

[0065] 二乗成分を所定の振幅比で重畳することにより、bの実線で示した波長の時間変化は下に凸となり、cの点線で示した望ましい波長変化に大分近づくことが分かる。しかしながら、短波長側で変化率が過剰である一方、長波長

側では変化率が不足しており、さらなる改善が望まれる。

[0066] 図5 Aは本発明の第1の構成の波長掃引光源に多用する波長の時間変化の第2の例を示す図、図5 Bは本発明の第1の構成の波長掃引光源に多用する制御電圧の時間変化の第2の例を示す図である。図5 Aおよび図5 Bでは、主たる鋸波状波形に、鋸波状波形の二乗成分および鋸波状波形の三乗成分を重畳した場合の制御電圧波形を示している。図5 Aは波長の時間変化を示し、図5 Bは制御電圧発生部により与えられる制御電圧の時間変化を示す。aの破線の波形は、従来技術による鋸波状波形のみの場合（ランプ波形）を示している。bの実線の波形は、本例の二乗成分および三乗成分を重畳した場合を示している。cの点線の波形は、望ましい波長変化を示したものである。

[0067] 本例では、式（4）で表される係数の二乗成分に加えて、以下の振幅比で三乗成分を重畳する。図1において、回折格子109への電気光学偏向器103からの光入射角を θ とする。高電圧増幅器120の電圧ゲインをAとしたので、電気光学偏向器103の単体での制御電圧対偏向角度感度をA倍したものを、 γ （rad/V）とする。図5 Bの制御電圧波形bは、第1の乗算器116のゲインを式（4）で表される係数となるように調整し、かつ、第2の乗算器118のゲインを調整して、鋸波状波形の三乗成分の係数が次式で表されるようにしたものである。

[0068] [数6]

$$\gamma^2 \frac{17 + 6 \cos 2\theta + \cos 4\theta}{6 \sin^2 2\theta} \quad \text{式 (5)}$$

[0069] 上式は、上述した式（4）の導出と同じ手順で、さらに、波数 $1/\lambda$ の t についての3階微分が零となる条件を求めることによって求められる。

[0070] 図6 Aは本発明の第2の構成の波長掃引光源に使用する波長の時間変化の例を示す図、図6 Bは本発明の第2の構成の波長掃引光源に使用する制御電圧の時間変化の例を示す図である。図6 Aおよび図6 Bでは、主たる鋸波状波形に、鋸波状波形の二乗成分のみを重畳した場合の制御電圧波形を示して

いる。図6 Aは波長の時間変化を示し、図6 Bは制御電圧発生部により与えられる制御電圧の時間変化を示す。aの破線の波形は、従来技術による鋸波状波形のみの場合（ランプ波形）を示している。bの実線の波形は、本例の鋸波状波形の二乗成分を重畳した場合を示している。本例では、望ましい波長変化は、bの本発明による波形と図上に区別して描くのが困難な程一致するので示していない。

[0071] 本例の具体的な構成を述べれば、回折格子は3001/mmの線刻密度を持ち、入射角 $\theta = 72.2^\circ$ 、入射角 $\phi = -33.8^\circ$ 動作中心波長は1.35 μm である。また、電気光学偏向器は、KTNを使用しており、制御電圧対角度感度 γ は、0.17mrad/Vである。

[0072] 本例では、二乗成分を以下の振幅比で重畳する。図2において、回折格子106への電気光学偏向器103からの光入射角を θ 、回折格子106への端面鏡110からの光入射角を ϕ とする。高電圧増幅器120の電圧ゲインをAとしたので、電気光学偏向器103の単体での制御電圧対偏向角度感度をA倍したものを、 γ (rad/V)とする。図6 Bの制御電圧波形bは、第1の乗算器116のゲインを調整して、鋸波状波形の二乗成分の係数が次式で表されるようにしたものである。

[0073] [数7]

$$\gamma \frac{3 + \cos 2\theta + 2 \sin \phi \sin \theta}{2(\sin 2\theta + 2 \sin \phi \cos \theta)} \quad \text{式 (6)}$$

[0074] 上式は、この第2の構成についての回折格子方程式の $\Lambda (\sin (\theta + \delta) + \sin \phi) = m\lambda$ について、時間 t の関数 $\delta (t)$ の零点の周りで、波数 $1/\lambda$ の t についての2階微分が零となる条件を求めることによって求められる。

[0075] 図6 Aおよび図6 Bから明らかのように、本発明の第2の構成（リトマン構成）の波長掃引光源では、主たる鋸波状波形に、式(6)で表される係数を持った鋸波状波形の二乗成分のみを重畳することによって、概ね、望ましい波形に一致する制御電圧が得られる。

[0076] しかしながら、さらなる改善のために、第1の構成と同じように、式(6)で表される係数の二乗成分に加えて、次式で表される係数の三乗成分をさらに重畳するのが好ましい。すなわち、第1の乗算器116のゲインを式(6)で表される係数となるように調整し、かつ、第2の乗算器118のゲインを調整して、鋸波状波形の三乗成分の係数が次式で表されるようにすれば良い。

[0077] [数8]

$$\gamma^2 \frac{21 - 4 \cos 2\phi + 26 \sin \phi \sin \theta + 2(2 + \cos 2\phi) \cos 2\theta + 2 \sin \phi \sin 3\theta + \cos 4\theta}{6(\sin 2\theta + 2 \sin \phi \cos \theta)^2} \quad \text{式(7)}$$

[0078] 上式は、上述した式(6)の導出と同じ手順で、さらに、波数 $1/\lambda$ の t についての3階微分が零となる条件を求めることによって求められる。式(4)～式(7)からわかるように、本発明により電気光学偏向器の制御電圧を補正する方法は、重畳すべき鋸波状波形のべき乗成分(二乗成分、三乗成分)が、発振器部201、301における回折格子106、109周辺の配置構成(θ 、 ϕ)によってのみ決定される。したがって、波長掃引を実行するための主たる鋸波状波形の振幅や周期には依存せずに、制御電圧波形の補正を行なうことができる。この結果、鋸波状波形の振幅を変えることによって、波長掃引範囲を自由に変えることができる。乗算器116、118のゲインを調整して、二乗成分および三乗成分の係数を設定するだけで、望ましい制御電圧波形を生成することができる。この結果、発振波長が長波長側となるほど、発振波長がより速く変化して、発振波長の時間変化は、下に凸の形状となる。すなわち、発振波長の時間変化が、波数に対して線形的に変化するように制御が行なわれるので、SS-OCTに適用する場合に、対象物の生体の深さ方向について、線形性が良く尖鋭なOCTイメージが得られる。

[0079] 以下、より具体的な実施例について述べる。

<実施例1>

[0080] 図7は、第1の構成の波長掃引光源による実施例1で、制御電圧に二乗成

分のみの補正を施した場合の波長誤差を示す図である。本実施例は、図1に示した第1の構成によるもので、回折格子は $3001/\text{mm}$ の線刻密度を持ち、入射角 $\theta = 35.0^\circ$ 、動作中心波長は $1.35\ \mu\text{m}$ である。べき乗成分は、二乗成分のみを式(4)で示す係数を持つように第1の乗算器116のゲインを調整した。aの破線は、従来技術による鋸波状波形の制御電圧で掃引した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。bの実線は、二乗成分のみを重畳して補正した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。本実施例によれば、波長 $1.35\ \mu\text{m}$ を中心として、幅 $100\ \text{nm}$ の範囲においてほぼ理想的な波長変化が得られている。

[0081] 図8は、第1の構成の波長掃引光源による実施例1において、三乗成分まで含めた補正を行った場合の波長誤差を示す図である。図7に示した二乗成分に追加して、さらに三乗成分を重畳するため、式(5)で示す係数を持つように第2の乗算器118のゲインを調整した。aの破線は、従来技術による鋸波状波形の制御電圧で掃引した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。bの実線は、二乗成分および三乗成分を重畳して補正した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。本実施例によれば、波長 $1.35\ \mu\text{m}$ を中心として、図7よりもさらに広い範囲の幅 $200\ \text{nm}$ の範囲においてほぼ理想的な波長変化が得られている。本実施例では、従来技術のポリゴンミラーを用いた場合や、単純な鋸波状波形のみを含む制御電圧を電気光学偏向器に印加した場合の波長掃引光源と比べて、顕著に波長誤差を改善している。

<実施例2>

[0082] 図9は、第2の構成の波長掃引光源による実施例2の波長誤差を示す図である。本実施例は、図2に示した第2の構成によるもので、回折格子は $3001/\text{mm}$ の線刻密度を持ち、入射角 θ は 72.2° 、入射角 ϕ は -33.8° 、動作中心波長は $1.32\ \mu\text{m}$ である。べき乗成分は、二乗成分が式(6)で表される係数を持つように第1の乗算器116を、三乗成分が式(7)で表される係数を持つように第2の乗算器118のゲインを、それぞれ調

整した。

[0083] aの破線は、従来技術による鋸波状波形の制御電圧で掃引した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。bの実線は、二乗成分のみを重畳して補正した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。cの実線は、二乗成分に加えて三乗成分も重畳して補正した場合の波長変化の誤差を示した。三乗成分まで含めて補正を行うほうが、広い範囲で理想により近い波長変化が実現されている。

[0084] 図10は、実施例2の波長掃引光源を用いたOCTにより得られる点像を示す図である。図10における点像(PSF: Point Spread Function)は、実施例2の波長掃引光源を用いたSS-OCTにおいて、対象物の一定深さに単一の反射面があるときに得られるOCTイメージを示している。この点像は、実施例2の構成によって生成した制御電圧によって生じる波長の時間変化を示す波長掃引光源によるSS-OCTの干渉波形を計算し、その干渉波形を離散フーリエ変換することによって得られる。より具体的には、反射面深さを空気中で1.5mm(光路長差3.0mm)とし、100nmの波長掃引中に、1000点の干渉データを等時間間隔で採取した。この場合、電気光学偏向器に印加する制御電圧の1スキャンの間に1000点の干渉データを取得することに相当する。離散フーリエ変換することによって、対象物内の深さ方向について、500点から構成されるOCTイメージが得られる。

[0085] 図10では、縦軸に、計算されたフーリエ振幅をdB換算して表示している。a~dの4種類の波形のプロットは、判別し易いように、縦軸方向に20dBずつずらして表示してある。aの点線は、従来技術の鋸波状波形のみが含まれる制御電圧で掃引した場合の点像を示している。bの実線は、二乗成分のみを重畳して補正した制御電圧で掃引した場合の点像を示しており、図9のbの波長誤差の場合に対応する。cの実線は、二乗成分および三乗成分を重畳して補正した制御電圧で掃引した場合の点像を示しており、図9のcの波長誤差の場合に対応する。dの破線は、理想的な望ましい波長変化の

制御電圧で掃引した場合の点像を示している。

[0086] 図10の各点像からわかるように、点像が深さ方向に広がっている従来技術の場合と比べて、実施例2の制御電圧を電気光学偏向器に印加した場合には、点像はシャープとなっている。特に、三乗成分まで含めたcの場合には、理想的な状態にかなり近づいている。

<実施例3>

[0087] 図11は、第2の構成の波長掃引光源による実施例3の波長誤差を示す図である。本実施例は、図2に示した第2の構成によるもので、回折格子は6001/mmの線刻密度を持ち、入射角 θ は52.31°、入射角 ϕ は0.04°、動作中心波長は1.32 μ mである。実施例2と比べると、入射角 θ がより小さく、回折格子の刻線密度は2倍となっている点で相違している。実施例2と同様に各べき乗成分は、二乗成分が式(6)で表される係数を持つように第1の乗算器116のゲインを調整し、三乗成分が式(7)で表される係数を持つように第2の乗算器118のゲインを調整した。

[0088] aの破線は、従来技術による鋸波状波形の制御電圧で掃引した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。bの実線は、二乗成分のみを重畳して補正した場合の波長変化の、望ましい波長変化からの誤差を示した。cの実線は、二乗成分に加えて三乗成分も重畳して補正した場合の波長変化の誤差を示した。実施例2の波長誤差を示した図9の各曲線と対比すれば、実施例3では大幅に波長誤差が低減されていることがわかる。これは、下で述べるように、図2に示した発振器部301において、発振器内で必要なフィルタ効果を得るための入射角 θ が小さくできるためと考えられる。

[0089] ここで再び図2を参照すると、第2の構成の波長掃引光源において、発振波長 λ は、次式によって決定される。

$$\Lambda (\sin (\theta + \delta) + \sin \phi) = m \lambda \quad \text{式 (8)}$$

ここで、 Λ は回折格子のピッチであり、 λ は発振波長、 m は回折次数である。 θ および ϕ は、図2に示したように回折格子への入射角および出射角である。 δ は、電気光学偏向器によって受ける回折格子への入射角変化量である

。式（２）とともに従来技術について説明したように、波長 λ の変化形状は、式（８）左辺の θ を含む \sin 項の影響を受ける。実施例３では入射角 θ が小さくできた。上述の実施例３における波長誤差の低減は、 \sin 項に由来する上に凸の望ましくない変化形状（曲率）が、元々、 θ が小さいほど少ないためと考えられる。

[0090] 図１２は、実施例３の波長掃引光源を用いたＯＣＴにより得られる点像を示す図である。図１０と同様に、縦軸に計算されたフーリエ振幅を dB 換算して表示している。 $a\sim d$ の４種類の波形のプロットは、判別し易いように、縦軸に 20dB ずつずらして表示してある。 a の点線は、従来技術の鋸波状波形の制御電圧で掃引した場合の点像を示している。 b の実線は、二乗成分のみを重畳して補正した制御電圧で掃引した場合の点像を示しており、図１１の b の波長誤差の場合に対応する。 c の実線は、二乗成分および三乗成分を重畳して補正した制御電圧で掃引した場合の点像を示しており、図１１の c の波長誤差の場合に対応する。 d の破線は、理想的な望ましい波長変化の制御電圧で掃引した場合の点像を示している。

[0091] 図１０に示した実施例２の場合と比較して、二乗成分のみを重畳した波形 b 、および、三乗成分まで含めて重畳した波形 c のいずれの場合も、よりシャープな点像が得られている。特に、三乗成分までを含めた制御電圧を電気光学偏向器に印加した場合は、点像は極めてシャープとなり、理想的なＯＣＴイメージが得られる状態に非常に近づいている。

[0092] 上述のように、波長掃引光源の電気光学偏向器への制御電圧に対して、発振波長の時間変化が、波数に対して線形的に変化するように補正を施すことで、ＯＣＴで得られる点像をシャープに保つことができる。上記の制御電圧の補正は、主たる鋸波状波形に、鋸波状波形のべき乗成分を重畳することで容易に生成可能である。具体的には、主たる鋸波状波形に鋸波状波形の二乗成分のみを、または、二乗成分および三乗成分を重畳すれば十分である。上記のように補正された制御電圧を利用すると、波長掃引光源では、発振波長が長波長側となるほど、発振波長がより速く変化して、発振波長の時間変化

は、下に凸の形状となる。本発明の波長掃引光電では、時間軸上で波数に対して線形的に変化するように、掃引波長の制御が行なわれことになる。

[0093] 以上述べた本発明の波長掃引光源の構成では、制御電圧生成部202、302に示したように、鋸波状波形のべき乗成分を生成して制御電圧を補正するために、乗算器および加算器などのアナログ電子回路を用いている。しかし、べき乗成分の生成・加算はこの方法に限定されず、例えば、数値的に計算したデータに基づいて、任意波形発生器によって制御電圧を生成することもできる。

[0094] 本発明による電気光学偏向器の制御電圧の補正方法は、重畳されるべき乗成分の係数（比率）が、回折格子周りの配置のみに依存し、鋸波状波形の振幅や周期には依らない。従って、鋸波状波形の振幅を変えて波長掃引範囲を自由に換えられるという特徴がある。

[0095] また、発振器部201、301の構成も様々な変形が可能であって、図1および図2の構成に限定されない。すなわち、制御電圧に対して波長掃引光源100の発振波長 λ が時間に対して概ね直線的に変化する場合に、波数が時間に対して直線的に変化するような波長変化を与えるように制御電圧を補正している点に本願発明の特徴があることに留意すべきである。

[0096] 以上詳細に述べたように、本発明により、SS-OCTに適合した波長変化を実現することができる波長掃引光源を提供することができる。波長変化が、波数について直線的に変化するプロファイルを持つ波長掃引電圧を利用することで、OCTイメージの線形性を大幅に改善し尖鋭なOCTイメージを得ることができる。

<実施例4>

[0097] 次に、レーザ発振の波数（ k ）について、数9の式のように、KTN偏向器からの出射光の偏向角（ θ ）の関数を用いて表す。

[0098] [数9]

$$k = k_0 + k_1\theta + k_2\theta^2 + k_3\theta^3$$

[0099] θ はKTN偏向器への印加電圧（ V ）の関数であり、理想的には θ と V は比例す

る。しかし、KTN偏向器の不完全性や補償レンズの収差などの影響により、比例関係からのずれが生じるため、 θ は、数2のように、電圧の高次項を摂動として考慮した方が現実に近い。

[0100] [数10]

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 V + \theta_2 V^2 + \theta_3 V^3$$

[0101] ここで、数10を数9の式に代入すると、 V の二次まででも、数11の式のように、急速に複雑化することに着目しておく。

[0102] [数11]

$$k = k_0 + k_1 \theta_0 + k_2 \theta_0^2 + k_3 \theta_0^3 + (k_1 \theta_1 + 2k_2 \theta_0 \theta_1 + 3k_3 \theta_0^2 \theta_1) V \\ + (k_2 \theta_1^2 + 3k_3 \theta_0 \theta_1^2 + k_1 \theta_2 + 2k_2 \theta_0 \theta_2 + 3k_3 \theta_0^2 \theta_2) V^2 + O(V^3)$$

[0103] ここで、KTN偏向器は、電氣的にみると数nFの静電容量を持つコンデンサと等価である。KTN偏向器を数百kHzの周波数で数百ボルトの電圧で駆動させる場合、出力インピーダンスを小さくして任意波形を発生させる電源よりも、コンデンサ、抵抗およびコイルで構成される共振回路によって駆動させるほうが、電源の消費電力やサイズの観点から有利となる。ただし、上述した共振回路だけでKTN偏向器を駆動させると、正弦波しか発生させることできないため、共振周波数を基本波として、その高調波を、振幅および／または位相を調整しながらDC電圧と共に重畳させることが現実的な手法となる。

波長掃引を角周波数 ω で時間的に周期的に行う場合、DCオフセット電圧に、基本波と高調波とを重畳すると、電圧のパターンは、数12の式で表される。

[0104] [数12]

$$V = V_{DC} + V_{prim} \cos \omega t + \sum_{m=2}^{\infty} V_m \cos(m\omega t + \phi_m)$$

[0105] [数13]

$$V_{DC}$$

[0106] [数14]

$$V_{prim} \cos \omega t$$

[0107] ここで、数10および数12を数9の式に代入すると、印加電圧の各周波数成分および位相をパラメータとして、時間の関数として波数が与えられる。しかし、波数を時間の関数として表すと、各周波数成分に $\{k_i\}$, $\{\theta_i\}$, $\{V_i\}$ の成分を含む複雑な関数になってしまう。

[0108] さらに、共振周波数の高調波重畳回路の出力インピーダンスが十分に小さい場合、各高調波の位相遅れまたは振幅が、負荷や電圧の値に依存してしまう。この場合、別個独立して決められた $\{k_i\}$, $\{\theta_i\}$, $\{V_i\}$ を用いて、波数の時間依存性を決定するよりも、波数の時間依存性の実測値をもとにフィードバック制御を行い、所定の値を有する時間依存性に近づけていく方法が有効である。この方法は、波数 (k) を印加電圧の各周波数成分 $\{f_m\}$ と位相ずれ $\{\Phi_m\}$ の関数として、数15に示される係数 $\{f_m\}$, $\{\Phi_m\}$ を決定することに相当する。

[0109] [数15]

$$k(t) = f_0 + \sum_{m=1}^M f_m \cos(m\omega t + \Phi_m)$$

[0110] なお、数15の式中、 M は、高調波をどの程度まで印加するかを表す上限値である。ここでは、 $M=10$ とする。

[0111] 静電容量が2nFのKTN偏向器を用いて、中心波長が1320nm近辺、波長掃引幅が100nmとして、200kHzで繰り返し波長掃引を行う場合を例にとって説明する。ここでは、図17に示したように、掃引中に、短波長 $(\lambda=1270\text{nm}, k=4.947 \times 10^6 \text{ m}^{-1})$ から長波長 $(\lambda=1370\text{nm}, k=4.586 \times 10^6 \text{ m}^{-1})$ にかけて、波数が時間的に一定速度で変化するように調整するものとする。5 μs の掃引周期(200kHzに相当する)のうち、80%の時間である4 μs を短波長から長波長へ掃引するのに用いる。残りの1 μs で長波長から短波長に移るが、その時間依存性は問わない。

[0112] 図18は、 $M=10$ の時、すなわち10次高調波までの重畳において、図17の波形の一周期分のみを再現した図である。図18の波形では、11次以上の高調波がないので、若干の鈍りが生じている。波数を時間的に一定速度で変化

させるとしても、M=10の場合には、図18で示した波形程度の変化が限度である。

[0113] 次に、グレーティングの刻線数が600本/mm、KTN偏向器への印加電圧が0Vの時のグレーティングの法線への入射角が60°となるよう光学系を調整する場合について説明する。この場合、KTN偏向器への印加電圧±400Vを与えると、波長掃引幅は100nmを超える。この電圧を基準とする。すなわち、 $1 \leq m \leq 10$ に対して、数16の式の右辺の値から、

[数16]

$$\frac{800}{(4.947 - 4.586) \times 10^6} = 0.00221607$$

求める波数変化に対して、0.002216を乗じた値を電圧として印加する。

[0114] ここで、目的波形である図18の波形のフーリエ変換を求めると、数17の式のように表すことができる。

[0115] [数17]

$$\tilde{k}_m = \int_0^{5.16} k_{T \text{ arg et}}(t) \exp(im\omega t) dt$$

[0116] なお、図18の波形は、数18で表してある。

[0117] [数18]

$$k_{T \text{ arg et}}(t)$$

[0118] 数17から、印加電圧の基本波および高調波の各々について、振幅、位相の初期値は数19を用いる。

[0119] [数19]

$$f_m = 0.00221607 |\tilde{k}_m|$$

$$\Phi_m = \arg(\tilde{k}_m)$$

[0120] 上記の電圧パターンにより出力光の波数に変化する。このときの波数変化を次の文献に開示された方法（すなわち、電圧波形を等波数間隔になるようにサンプリングする方法）を用いて測定する（ステップ1）。波数変化は、

数 20 で表してある。

[0121] [数20]

$$k_{Meas}(t)$$

[0122] (文献) Yoshiaki Yasuno, Violeta Dimitrova Madjarova, Shuichi Makita, Masahiro Akiba, Atsushi Morosawa, Changho Chong, Toru Sakai, Kin-Pui Chan, Masahide Itoh and Toyohiko Yatagai, “Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for in vivo investigation of human anterior eye segments,” Optics Express, 10652, Vol.13, No.26, 2003

[0123] 次に、数 17 の式に準拠して、数 20 で表される波数変化のフーリエ変換 (K_m) を計算する (ステップ 2)。

[0124] 次に、数 21 で表した Δ_m を計算する (ステップ 3)。

[0125] [数21]

$$\Delta_m = k_m - K_m$$

[0126] 次に、数 22 で得られる左辺の値を新たに k_m として与えられる印加電圧の基本波および高調波の初期値を得る。

[0127] [数22]

$$k_m' = k_m + \Delta_m$$

[0128] 新たに与えられた k_m について、ステップ 1 ~ 3 を繰り返すことにより、波数の時間依存性を求める。そうすると、波数の時間依存性は図 18 に示された波形に近づく。

[0129] <実施例 5>

次に、波長掃引光源の一実施形態 (第 3 実施形態) として、共振器にエタロンフィルタを挿入した波長掃引光源について説明する。

[0130] 図 19 は、本実施形態に係る波長掃引光源 1b の構成を示す図である。この波長掃引光源 1b は、共振器 300 と、共振器 300 から入射される光を平行光にして出射する第 1 の集光レンズ 111 と、第 1 の集光レンズ 111 から入射する光のみを出力光 s1 として透過させる光アイソレータ 112 と

を含む。そして、共振器300は、電気光学偏向器301と、この電気光学偏向器301に接続された制御電圧源302とを含む構成となっている。電気光学偏向器301は、前述したように、例えばタンタル酸ニオブ酸カリウム ($\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$) : KTN) 結晶や、($\text{K}_{1-y}\text{Li}_y\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$) : KLTN) 結晶等を用いた偏向器である。KTN結晶やKLTN結晶は、誘電率が大きく、高い電気光学効果をもつため、印加電圧により屈折率を変化させることができる。なお、図19では、一例として、共振器300はリットマン配置によって構成される場合について示してある。

- [0131] 共振器300の内部には、利得媒質を励起させるためのレーザ媒質を有するLD (Laser Diode) 101が設けられている。図19において、共振器100の外部側に位置するLDの第1端面101Aには、部分反射コーティング(HR)が施され、共振器100の内部側に位置するLDの第2端面101Bには、無反射コーティング(AR)が施されている。
- [0132] 共振器300は、第2の集光レンズ102と、エタロンフィルタ103(第2共振器)と、回折格子104と、ミラー105(反射鏡)とを備えている。
- [0133] LDの第2端面101Bを透過する光を入射する第2の集光レンズ102は、光を平行光にして出射するようになっている。
- [0134] エタロンフィルタ103は、共振器100内で発振される光から、特定の周波数域(波長域)の光のみを透過するように構成されている。この実施形態では、一例として、エタロンフィルタ103は、直方体のガラスで構成され、光を透過するコーティング両端面には、30%程度の反射膜が施されている。エタロンフィルタ103の光出力特性については、後に説明する。
- [0135] 回折格子104は、入射される光の波長を選択するようになっている。図19において、例えば鋸歯状溝を有する回折格子104は、所望の波長を有する入射光を回折する。
- [0136] 制御電圧源302から電圧が電気光学偏向器301に印加されると、電気

光学偏向器 301 の屈折率が変化し、電気光学偏向器 301 を透過する光の経路も変わる。

[0137] 図 19 は、共振器長およびエタロンフィルタ長を示す図である。図 19 に示すように、共振器 100 の共振器長は、第 1 端面 101 A とミラー 105 との間の距離 d である。

[0138] 一方、エタロンフィルタ 103 のエタロンフィルタ長は、コーティング両端面の間の距離 d_1 である。この実施形態の説明では、一例として、距離 d を 10 cm とし、距離 d_1 を 5 mm とする。つまり、 $d_1 < d$ が成り立つ。

[0139] 図 20 は、エタロンフィルタの共振特性を示す図である。この出力特性は、図 20 のエタロンフィルタ長 d_1 において、エタロンフィルタ 103 を透過する光の周波数を横軸、透過する光の強度を縦軸に表した特性を示している。

[0140] 図 20 に示すようにエタロンフィルタを透過する光は、エタロンフィルタ中での光速度を c とすると、 $c / (2 d_1)$ の周波数間隔で透過する。すなわち、エタロンフィルタ 103 の出力特性は、図 20 に示すように、特定の周波数のみを透過する、くし型特性となる。例えば、 $d_1 = 5 \text{ mm}$ の場合において、 $c / (2 d_1)$ の周波数間隔は、20 GHz になる。

[0141] 図 21 は、波長掃引光源の出力光を示す図である。図 21 において、(a) は、共振器の発振モードを示す図、(b) は、エタロンフィルタの発振モードを示す図、(c) は、波長掃引光源 1 の出力光 s_1 を示す図である。各図では、周波数を横軸、光強度を縦軸にしている。

[0142] 図 21 (a) に示す共振器の発振モード (第 1 発振モード) では、図 19 の共振器長 d において、共振器中の光速度を c とすると、 $c / (2 d)$ の周波数間隔で光 (図を簡単にするために直線で示す。) が発振されている。

[0143] 一方、図 21 (b) に示すエタロンフィルタの発振モード (第 2 発振モード) では、 $c / (2 d_1)$ の周波数間隔で光が発振されるため、その周波数間隔は、図 21 (a) の周波数間隔よりも長くなる。

- [0144] このように周波数間隔の異なる光が発振されると、波長掃引光源の出力光 s_1 （図を簡単にするために直線で示す。）は、図 2 1（c）に示すように、共振器の発振モードとエタロンフィルタの発振モードとが一致する周波数（例えば、 f_a ）で発振される。したがって、この波長掃引光源 1 では、エタロンフィルタの発振モードの周波数間隔で光を断続的に出力させることができる。
- [0145] また、本実施形態に係る波長掃引光源では、図 2 1（b）におけるエタロンフィルタ 1 0 3 の発振モードが成長し続けるために、図 2 1（a）における共振器の発振モードの周波数は、エタロンフィルタ 1 0 3 の発振モードの中心周波数のほうへ引き込まれる。これにより、図 2 1（c）における出力光 s_1 のパワーが安定する。
- [0146] 図 2 2 は、波長掃引光源の出力光 s_1 の周波数特性を示す図である。この周波数特性は、図 1 9（エタロンフィルタ 1 0 3 があるときに、エタロンフィルタ長が d_1 の場合）において、エタロンフィルタ 1 0 3 の発振モードの中心周波数を $f_a, f_b, f_c, f_d, f_e, \dots, f_h$ とした場合に、波長掃引光源 1 の出力光 s_1 の出力時間 t を横軸、各出力光の発振周波数を縦軸にした特性を示している。また、図 2 2 に示す周波数特性では、エタロンフィルタ 1 0 3 の出力特性（光強度を横軸、発振周波数を縦軸）5 0 1 を破線で表している。
- [0147] なお、図 2 2 では、波長掃引光源の出力光 s_1 の周波数特性の一部を示しているが、この実施形態の説明では、一例として、2 4 0 T H z（波長は 1 2 5 0 n m）から 2 2 2 T H z（波長は 1 3 5 0 n m）までの周波数幅とする。
- [0148] このように波長掃引光源 1 の出力光 s_1 は、 $c / (2 d_1)$ の間隔をもつ周波数で断続的に発振される。そのために、各出力光の周波数帯域幅が狭くなる。
- [0149] したがって、波長掃引光源 1 の出力光 s_1 が所定の時間にわたって測定される場合でも、測定開始時の波長（周波数）と測定終了時の波長（周波数）

を変化しにくくすることが可能となり、発振波長の変化に起因する測定誤差が生じにくくなる。また、光強度が最大となる周波数、すなわち所望の周波数（例えば、 $c / (2d)$ の間隔をもつ f_a , f_b 等）をもつ出力光を断続的に観測することができるため、観測データが光周波数に対してほぼ線形に得られる。

[0150] 一方、共振器 300 内にエタロンフィルタ 103 を配置しない場合には、波長掃引光源の出力光の周波数特性は、共振器の発振モードの周波数間隔が変更されないため、図 23 に示すように、連続的な特性となる。したがって、エタロンフィルタ 103 を配置しない場合の波長掃引光源の出力光は、図 23 の出力光 s1 の場合と比べて周波数帯域幅(周波数スペクトル幅)が広がるため、発振波長（周波数）の測定開始値および測定終了値の変化に起因する測定誤差が生じやすくなる。また、所望の周波数のみをもつ出力光を断続的に観測しにくくなる。

[0151] <実施例 6>

第 3 実施形態の波長掃引光源では、1つのエタロンフィルタを備える場合について説明したが、共振器の内部または外部に複数のエタロンフィルタを備えるようにしてもよい。

[0152] この場合、各エタロンフィルタの共振周波数が一致する周波数もやはり一定の周波数間隔になるので、発振する周波数は一定の周波数間隔で所望の周波数をもつ光を出力させることができる。

[0153] あるいは、第 3 実施形態の共振器の内部、および、外部に複数のエタロンフィルタを分散して設けるようにすることもできる。

[0154] <実施例 7>

以上では、第 3 実施形態を参照して、一定の周波数間隔で所望の周波数をもつ光が断続的に出力される場合について説明した。しかしながら、各実施形態の波長掃引光源においては、波長掃引時のコヒーレンス長に関し、波長掃引前のものと比較して劣化しないという側面も備えることを確認することができた。つまり、発振スペクトルの線幅が波長掃引前と波長掃引中で比較

して変化しないことを確認できた。

[0155] 以下、第3実施形態の波長掃引光源1bを例にとって、かかる側面について、図19、24ないし図26を参照して説明する。

[0156] 本実施例の波長掃引光源は、全体の構成は図19に示したものと同様である。すなわち、この実施例の波長掃引光源1bは、共振器300、各集光レンズ102、111、エタロンフィルタ103、回折格子104、ミラー105、光アイソレータ112および電気光学偏向器301を備える。この実施例では、LD101には、例えば半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)を用いた。

[0157] 本実施例のエタロンフィルタ103は、厚みが2.0mmおよび屈折率が1.5となるガラスを有する。ガラスは、光の入射面および出射面の反射率がともに30%となるようにした。

[0158] 図24は、エタロンフィルタ103の入力波長と透過率との関係の一例を示す図である。なお、横軸は波長、縦軸は透過率を示している。

[0159] 図24に示すように、エタロンフィルタ103では、波長に対して、透過率が周期的に変化するようになっている。この場合、各周期における透過スペクトルの半値幅は常に一定になるように構成されている。

[0160] 本実施例の回折格子104では、グレーティングピッチを例えば600本/mmとした。

[0161] 電気光学偏向器301は、例えば高速偏向動作が可能なKTN光スキャナを用いた。KTN光スキャナは、回折格子104に入射する角度を変化させ、発振波長を可変させる。この実施例では、KTN光スキャナのチップ形状として、例えば、4(l)×3(w)×1(t)mm³の平板構造のものを用いた。そして、このKTN結晶の4(l)×3(w)mm²の面上(表裏2面)にTi/Pt/Au電極を形成し、厚み方向に電界を印加させるようにした。さらに、KTNの晶系が立方晶となる領域は、ペルチェ温度コントローラを用いてKTNの動作温度を制御することで、誘電率が約20000となるようにした。また、本実施例では、このKTNに対して、周波数 $f = 200\text{kHz}$ 、電位 V

$p p = 600 V$ となる正弦波電圧を印加した。これにより、本実施例の波長掃引光源 1 b は、 $200 kHz$ という高周波数で、かつ広帯域で波長掃引を行うことが可能になった。

[0162] 次に、本実施例の波長掃引光源 1 b を動作させ、光スペアナで測定することで、波長掃引特性を観測した。以下、この観測結果について説明する。

[0163] 図 25 A はエタロンフィルタ 103 を挿入する前の波長掃引特性を示す図、図 25 B はエタロンフィルタ 103 を挿入したときの波長掃引特性を示す図である。各図では、波長を横軸、光強度を縦軸に示している。なお、図 25 A および図 25 B では、波長掃引特性が、 $1320 nm \sim 1350 nm$ の波長との関係で示されているが、観測時には、 $100 nm$ 以上の波長幅にわたって波長掃引特性を確認した。

[0164] エタロンフィルタ 103 を挿入する前の波長掃引特性は、図 25 A に示すように、光強度が常に $-25 dB \sim -22 dB$ 程度となった。これは、波長掃引の際に発振スペクトルの線幅が太く、個々のピークが観測できなかったからである。KTN 光スキャナでは、波長が連続的に掃引されるが、光スペアナでは、波長の取り込み時間が掃引時間より非常に長くなる。そのため、図 25 A に示した光強度は、KTN 光スキャナによって掃引された光スペクトルの重ね合わせ、すなわち積分スペクトルを時間平均したものとなる。

[0165] なお、一般的には、波長掃引時において、KTN 光スキャナの個体差や変動、共振器 300 の変動などが生じた場合、発振時の各線幅がその影響を受けるため、波長掃引前よりも可干渉性が低下するおそれがある。図 25 A に示した波長掃引特性では、波長掃引を高速で行ったので、発振時の波形を観測することはできなかった。しかしながら、公知のマッハツェンダ干渉法によって、コヒーレンス長を測定したところ、波長掃引時のコヒーレンス長が、波長掃引前よりも劣化することが確認できた。

[0166] 一方、エタロンフィルタ 103 を挿入したときの波長掃引特性は、図 25 B に示すように、発振スペクトルが、一定の波長間隔で、かつ、一定の線幅を有する断続的なものとなった。図 25 B の例では、光強度は概ね、 $-33 dB$

B~-20 dB強となった。

[0167] 図26は、図25Bに示した波長掃引特性の拡大例を示す図である。図26では、図25Bの波長掃引特性に示された1320 nm~1323 nmの波長の中で光強度が最大の光強度を強度比=100%となるように設定した。

[0168] この場合、強度比が100%となる発振スペクトルでは、図26に示すように、半値幅が0.1 nmとなった。また、この図26の例では、発振スペクトルの線幅は、すべて常に0.1 nm以下となった。これは、波長掃引前の発振スペクトルの線幅とほぼ同じ結果となった。つまり、エタロンフィルタ103が挿入された場合には、波長掃引時にKTN光スキャナの変動、共振器300の変動などが生じてても、エタロンフィルタ103の透過特性によって、それらの影響が小さくなり、波長掃引時も常に良好なコヒーレンス長を保持することが可能となることが確認できた。

[0169] このように波長掃引光源1bにエタロンフィルタ103を挿入することによって、波長掃引時に、その全帯域にわたり良好なコヒーレンス長をもつ発振特性を得ることができることが分かった。したがって、各実施形態における各波長掃引光源も、透過スペクトルの半値幅が常に一定になるように構成されたエタロンフィルタ103を備えるようにすれば、常に良好なコヒーレンス長をもつ発振特性を得ることができると考えられる。つまり、各実施形態の波長掃引光源は、一定の周波数間隔で、かつ一定のスペクトル半値幅で所望の周波数をもつ光を断続的に出力する。

[0170] このことは、波長掃引時に生じる各光学部品（SOA、回折格子、偏向器、集光レンズ等）の環境変化、例えば経時変化や温度変化等によって、波長掃引光源の出力光のコヒーレンス長、すなわち可干渉性が劣化しないことを意味する。つまり波長掃引前と掃引中とで可干渉性が劣化しないことを意味する。このため、例えば各実施形態の波長掃引光源を用いてオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ（OCT）法で対象物を測定する場合において、測定可能な深さが制限されるという不都合もない。

- [0171] 以上をまとめると、第2共振器であるエタロンフィルタ103は、発振周波数間隔のみならず、発振スペクトル半値幅も制御することになる。波長掃引時に光の可干渉性を劣化させるような事象が発生したとしても、第2共振器により規定された一定間隔の発振波長(発振周波数)では光の可干渉性が保障され、掃引全帯域にわたって高い可干渉性を保つことができる。
- [0172] 以上、本発明の各実施形態および実施例(以下、「各実施形態等」という。)を詳述してきたが、具体的な構成は各実施形態等に限られるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲の設計変更なども含まれる。
- [0173] 各実施形態等の波長掃引光源において、エタロンフィルタを設ける位置は、図19に図示された位置に限られない。例えば、図19に示したものにおいて、エタロンフィルタは、回折格子104とミラー105との間に設けるようにしてもよいし、LD101と集光レンズ111との間に設けるようにしてもよい。あるいは、図19に示したものにおいて、エタロンフィルタは、電気光学偏向器301と回折格子104との間に設けるようにしてもよい。
- [0174] また、KTN光スキャナのチップ形状・印加波形、エタロンフィルタの諸特性(厚さ、反射率など)、回折格子104のグレーティングピッチ、動作周波数などのパラメータについても様々な変更が可能である。
- [0175] また、図19の共振器は、例えばリットマン配置の構成を例示しているが、回折格子がミラーの機能を兼ね備えるリトロ配置で構成することによっても実施することができる。
- [0176] 図19に示したものにおいて、電気光学偏向器301は、電気光学効果を有するKTNスキャナを例にとって説明しているが、他の材料を用いた電気光学型偏向器を適用するようにしてもよい。あるいは、図19に示したものにおいて、ガルバノミラー、MEMS型ミラーなどの偏向器を用いて実施することもできる。さらに、エタロンフィルタを複数にしても実施することができる。
- [0177] 上述した波長掃引光源では、エタロンフィルタを用いる場合について説明

したが、これに限られない。共振器の発振モードの周波数間隔を変更して断続的な出力光が得られるのであれば、例えばマイケルソン干渉計等を用いてもよい。

[0178] 第3実施形態の波長掃引光源1bでは、エタロンフィルタ103を共振器300の内部に設ける場合について説明したが、共振器300の外部（例えば、光アイソレータ112の出力側の位置）に設定する構成にしてもよい。

[0179] <実施例8>

[0180] 本実施例の波長掃引光源は、全体の構成は図19に示したものと同様である。すなわち、この実施例の波長掃引光源1bは、共振器300、各集光レンズ102、111、エタロンフィルタ103、回折格子104、ミラー105、光アイソレータ112および電気光学偏向器301を備える。この実施例では、LD101には、例えば半導体光増幅器（SOA：Semiconductor Optical Amplifier）を用いた。

[0181] 共振器の構成部品の位置ずれなどにより、最適な共振状態からずれた状態を考える。

[0182] 最適な状態からずれることにより、回折格子104の波長選択によるフィルタ特性が劣化し、切り出される波長の線幅は広くなる。この状態で発振させると、広い線幅となるため、可干渉性の低い光しか得られない（図27A参照）。

[0183] 一方、上記状態でエタロンフィルタ103が挿入されている場合、共振器300全体のフィルタ特性は、回折格子104の波長選択によるフィルタ特性と、エタロンフィルタ103のフィルタ特性との重ね合わせであり、広がっている回折格子104のフィルタ特性の一部をエタロンフィルタが抑制する形状となる。これにより、エタロンフィルタ無しの状態に比べ、狭い線幅の発振となり、可干渉性の高い光を得ることができる（図27B参照）。

[0184] シリコンエタロンフィルタは、ガラスエタロンフィルタに比べ、次の3点について有効である。

[0185] 本実施例のエタロンフィルタ103は、材質をシリコン（屈折率3.5）、厚

み3mm、両面の反射率を31%としたものを用いた（シリコンエタロンフィルタ）。

[0186] エタロン効果を得るには、多重反射による干渉現象が発現する程度の垂直度で、共振器内にエタロンフィルタが挿入される必要がある。シリコンはガラスに比べて屈折率が高く、ガラスの屈折率が1.5に対して、シリコンの屈折率は3.5である。このため、シリコンの場合、前述の垂直度が悪かったとしても多重反射による干渉現象が生じやすい。言い換えれば、シリコンエタロンフィルタは、光学系に挿入する際の垂直度の変化、及び、ずれに対して頑強性が比較的高いといえる。従って、シリコンエタロンフィルタは、光学アライメントの容易さに関して、ガラスエタロンよりも有効である。

[0187] また、発振モードの周波数間隔を狭くする、すなわち、より密に発振モードを立てるためには、エタロンフィルタ内の光路長を長くする必要がある。シリコンはガラスの屈折率の2.3倍であるため、ガラスと比較して約半分以下の薄さで同様の光路長を実現することができる。このため、共振器内におけるエタロンの占める体積を削減でき、共振器の小型化に有効である。

[0188] さらに、シリコンは屈折率が高いためフレネル損失が高く、反射率が高い。ガラスのように高反射率を実現するためには基板に反射膜を蒸着する必要なく、シリコン基板を切断しただけに必要な反射率をもつエタロンを得ることができ、経済的に有効である。

[0189] 図28は、エタロンフィルタ103の入力波長と透過率との関係の一例を示す図である。なお、横軸は波長、縦軸は透過率を示している。

[0190] 図28に示すように、エタロンフィルタ103では、波長に対して、透過率が周期的に変化するようになっている。この場合、各周期における透過スペクトルの半値幅は常に一定になるように構成されている。

[0191] 本実施例の回折格子104では、グレーティングピッチを例えば950本/mmとした。

[0192] 電気光学偏向器301は、例えば高速偏向動作が可能なKTN光スキャナを用いた。KTN光スキャナは、回折格子104に入射する角度を変化させ

、発振波長を可変させる。この実施例では、K T N光スキャナのチップ形状として、例えば、4 (l) X 3 (w) X 1. 5 (t) m m³の平板構造のものを用いた。そして、このK T N結晶の4 (l) X 3 (w) m m²の面上（表裏2面）にTi/Pt/Au電極を形成し、厚み方向に電界を印加させるようにした。さらに、K T Nの晶系が立方晶となる領域は、ペルチェ温度コントローラを用いてK T Nの動作温度を制御することで、誘電率が約2 0 0 0 0となるようにした。また、本実施例では、このK T Nに対して、周波数 $f = 2 0 0 \text{ k H z}$ 、電位 $V_{p p} = 8 0 0 \text{ V}$ となる正弦波電圧を印加した。これにより、本実施例の波長掃引光源 1 bは、2 0 0 k H zという高周波数で、かつ広帯域で波長掃引を行うことが可能になった。

[0193] 次に、本実施例の波長掃引光源 1 bを動作させ、光スペアナで測定することで、波長掃引特性を観測した。以下、この観測結果について説明する。

[0194] 図 2 9 Aはエタロンフィルタ 1 0 3の挿入前の波長掃引光源 1 bの各波長掃引特性の一例を示す図、図 2 9 Bはエタロンフィルタ 1 0 3を挿入したときの波長掃引特性を示す図である。各図では、波長を横軸、光強度を縦軸に示している。なお、図 2 9 Aおよび図 2 9 Bでは、波長掃引特性が、1 3 1 5 n m ~ 1 3 2 0 n mの波長との関係で示されている。

[0195] エタロンフィルタ 1 0 3を挿入する前の波長掃引特性は、図 2 9 Aに示すように、光強度が常に-3 0 d B ~ -2 5 d B程度となった。これは、波長掃引の際に発振スペクトルの線幅が太く、個々のピークが観測できなかったからである。K T N光スキャナでは、波長が連続的に掃引されるが、光スペアナでは、波長の取り込み時間が掃引時間より非常に長くなる。そのため、図 2 9 Aに示した光強度は、K T N光スキャナによって掃引された光スペクトルの重ね合わせ、すなわち積分スペクトルを時間平均したものとなる。

[0196] なお、一般的には、波長掃引時において、K T N光スキャナの個体差や変動、共振器 3 0 0の変動などが生じた場合、発振時の各線幅がその影響を受けるため、波長掃引前よりも可干渉性が低下するおそれがある。図 2 9 Aに示した波長掃引特性では、波長掃引を高速で行ったので、発振時の波形を観

測することはできなかった。しかしながら、公知のマッハツェンダ干渉法によって、コヒーレンス長を測定したところ、波長掃引時のコヒーレンス長が、波長掃引前よりも劣化することが確認できた。

[0197] 一方、エタロンフィルタ 103 を挿入したときの波長掃引特性は、図 29 B に示すように、発振スペクトルが、一定の波長間隔で、かつ、一定の線幅を有する断続的なものとなった。

[0198] 図 30 は、図 29 B に示した波長掃引特性のうち 1319.9 nm ~ 1320.15 nm の拡大例を示す図である。図 30 では、図 29 B の波長掃引特性に示された 1319.9 nm ~ 1320.15 nm の波長の中で光強度が最大の光強度を強度比 = 100% となるように設定した。なお、スペクトルの強度比の揺らぎは、分解能近くでの測定であることに起因している。

[0199] この場合、強度比が 100% となる発振スペクトルでは、図 28 に示すように、半値幅が 0.025 nm 程度となった。また、この図 28 の例では、発振スペクトルの線幅は、すべて常に 0.025 nm 以下となった。これは、波長掃引前の発振スペクトルの線幅とほぼ同じ結果となった。つまり、エタロンフィルタ 103 が挿入された場合には、波長掃引時に KTN 光スキャナの変動、共振器 300 の変動などが生じてても、エタロンフィルタ 103 の透過特性によって、それらの影響が小さくなり、波長掃引時も常に良好なコヒーレンス長を保持することが可能となることが確認できた。

[0200] このように波長掃引光源 1b にエタロンフィルタ 103 を挿入することによって、波長掃引時に、その全帯域にわたり良好なコヒーレンス長をもつ発振特性を得ることができることが分かった。したがって、各実施形態における各波長掃引光源も、透過スペクトルの半値幅が常に一定になるように構成されたエタロンフィルタ 103 を備えるようにすれば、常に良好なコヒーレンス長をもつ発振特性を得ることができると考えられる。つまり、各実施形態の波長掃引光源は、一定の周波数間隔で、かつ一定のスペクトル半値幅で所望の周波数をもつ光を断続的に出力する。

[0201] このことは、波長掃引時に生じる各光学部品（SOA、回折格子、偏向器

、集光レンズ等)の環境変化、例えば経時変化や温度変化等によって、波長掃引光源の出力光のコヒーレンス長、すなわち可干渉性が劣化しないことを意味する。このため、例えば各実施形態の波長掃引光源を用いてオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ(OCT)法で対象物を測定する場合において、有利である。

[0202] なお、エタロンフィルタを挿入した波長掃引光源を利用してOCT測定を実施する場合、測定に利用できるコヒーレンス長は挿入されているエタロンフィルタの光路長に関係した長さで限定される。

[0203] OCT測定で求められるコヒーレント長を l_c 、エタロンフィルタの厚さを d 、屈折率を n とすると、数23の関係が成り立つ。

[0204] [数23]

$$d > \frac{l_c}{n}$$

産業上の利用可能性

[0205] 本発明は、光信号処理装置に使用できる。特に、光コヒーレントトモグラフィに利用できる。

符号の説明

- [0206]
- 1 光源
 - 2、22 ビームスプリッタ
 - 3、23、110 ミラー
 - 4、24 生体
 - 5、25 光検出器
 - 21、100、200、300 波長掃引光源
 - 31、32、33 反射面
 - 101 利得媒質
 - 102、111 集光レンズ

- 1 0 3 電気光学偏向器
- 1 0 4 制御電圧
- 1 0 6、1 9 回折格子
- 1 1 2 出力結合鏡
- 1 1 5 鋸波状波形発生器
- 1 1 6、1 1 8 乗算器
- 1 1 7、1 1 9 加算器
- 1 2 0 ポリゴンミラー
- 2 0 1、3 0 1 発振器部
- 2 0 2、3 0 2 制御電圧生成器
- 3 0 0 共振器
- 1 0 1 L D
- 1 0 2 第2の集光レンズ
- 1 0 3 エタロンフィルタ
- 1 0 4 回折格子
- 1 0 5 ミラー
- 1 1 1 第1の集光レンズ
- 1 1 2 光アイソレータ
- 3 0 1 電気光学偏向器
- 3 0 2 制御電圧源
- S 1 出力光

請求の範囲

[請求項1] 時間的に出力波長が周期的に変化する波長掃引光源において、
電気光学偏向器を含む発振器部と、
主たる鋸歯状波形に加え、該鋸歯状波形のべき乗成分が重畳された、
前記電気光学偏向器へ印加する制御電圧を生成する制御電圧生成部
と

を備えたことを特徴とする波長掃引光源。

[請求項2] 前記発振器部は、利得媒質と、前記利得媒質の一端からの光が入射する回折格子とを含み、前記利得媒質と前記回折格子とが光学的に接続された共振器から構成され、

前記電気光学偏向器は、前記利得媒質と前記回折格子との間であって、前記共振器により形成される光路上に配置され、

前記回折格子への前記電気光学偏向器側からの光入射角を θ 、前記電気光学偏向器の制御電圧対角度感度を γ [rad/V]とするとき

、
前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、式

[数1]

$$\gamma \frac{3 + \cos 2\theta}{2 \sin 2\theta}$$

で表される係数を有する二乗成分が重畳されることを特徴とする請求項1に記載の波長掃引光源。

[請求項3] 前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、
前記二乗成分に加えて、式

[数2]

$$\gamma^2 \frac{17 + 6 \cos 2\theta + \cos 4\theta}{6 \sin^2 2\theta}$$

で表される係数を有する三乗成分がさらに重畳されることを特徴とする請求項2に記載の波長掃引光源。

[請求項4] 前記発振器部は、利得媒質と、前記利得媒質の一端からの光が入射

する回折格子と、前記回折格子への前記入射光の回折光が直入射する端面鏡とを含み、前記回折格子を介して、前記利得媒質と前記端面鏡とが光学的に接続された共振器から構成され、

前記電気光学偏向器は、前記利得媒質と前記回折格子との間であって、前記共振器により形成される光路上に配置され、

前記回折格子への前記電気光学偏向器側からの光入射角を θ 、前記回折格子への前記端面鏡側からの光入射角を ϕ 、前記電気光学偏向器の制御電圧対角度感度を γ [rad/V]とすると、
前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、式

[数3]

$$\gamma \frac{3 + \cos 2\theta + 2 \sin \phi \sin \theta}{2(\sin 2\theta + 2 \sin \phi \cos \theta)}$$

で表される係数を有する二乗成分が重畳されることを特徴とする請求項1に記載の波長掃引光源。

[請求項5] 前記鋸歯状波形の前記べき乗成分として、
前記二乗成分に加えて、式

[数4]

$$\gamma^2 \frac{21 - 4 \cos 2\phi + 26 \sin \phi \sin \theta + 2(2 + \cos 2\phi) \cos 2\theta + 2 \sin \phi \sin 3\theta + \cos 4\theta}{6(\sin 2\theta + 2 \sin \phi \cos \theta)^2}$$

で表される係数を有する三乗成分がさらに重畳されることを特徴とする請求項4に記載の波長掃引光源。

[請求項6] 前記共振器は、第1発振モードの周波数間隔で光を発振するように構成されており、

前記共振器の内部には、当該共振器の第1共振器長より短い第2共振器長に対応した第2発振モードの周波数間隔で光を発振する第2共振器を有し、

前記共振器は、前記第1発振モードの周波数と前記第2発振モードの周波数とが一致する周波数で発振された光を出力することを特徴とする請求項1ないし5のいずれか1項に記載の波長掃引光源。

[請求項7] 前記共振器は、第1発振モードの周波数で光を発振するように構成されており、

前記共振器の外部には、当該共振器の第1共振器長より短い第2共振器長に対応した第2発振モードの周波数間隔で光を発振する第2共振器を有し、

前記第2共振器は、前記第1発振モードの周波数と前記第2発振モードの周波数とが一致する周波数で発振された光を出力することを特徴とする請求項1ないし5のいずれか1項に記載の波長掃引光源。

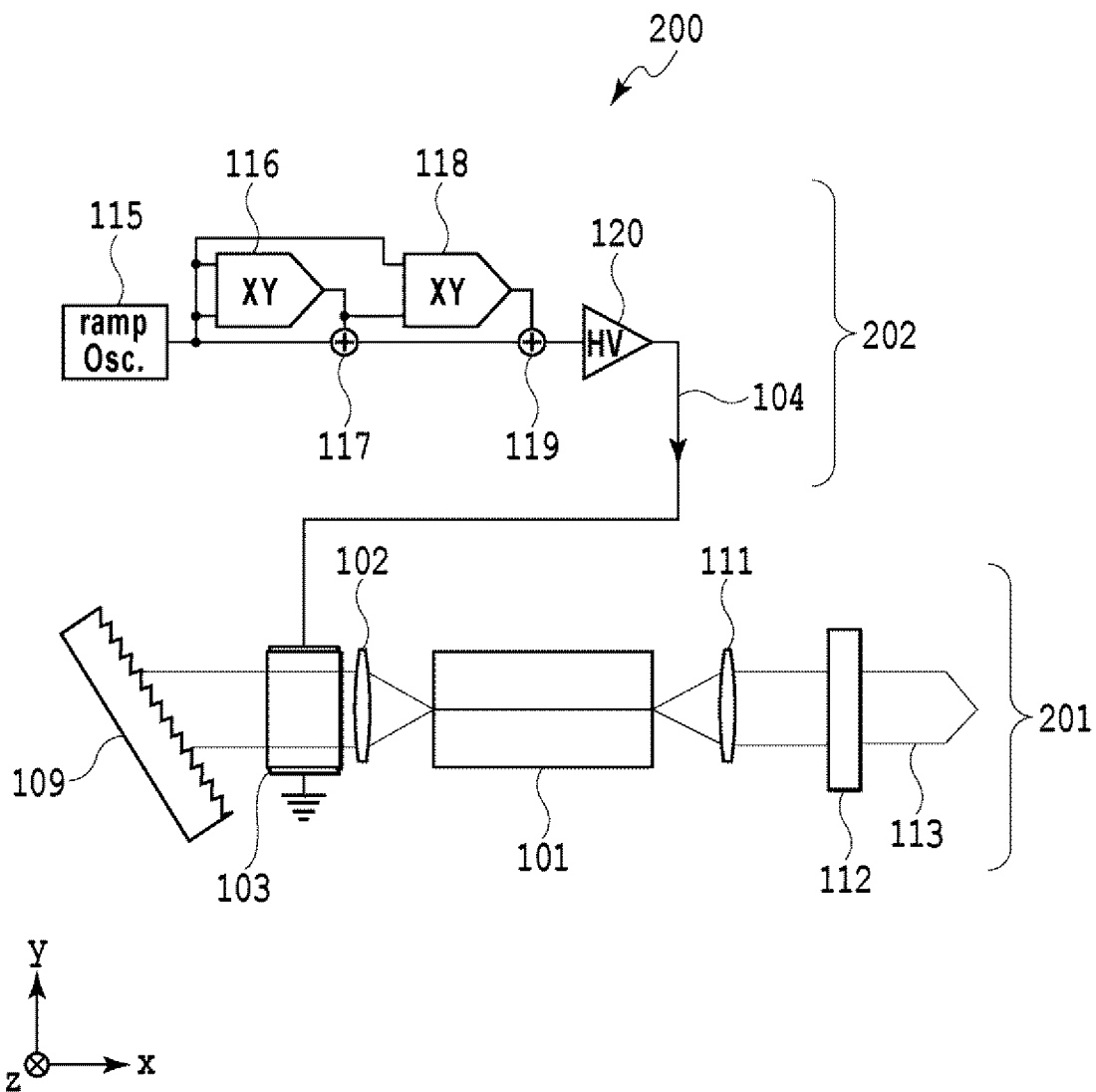
[請求項8] 前記共振器は、第1発振モードの周波数で光を発振するように構成されており、

前記共振器の内部または／および外部には、当該共振器の第1共振器長より短い1つもしくは複数の第2共振器長に対応した第2発振モードの周波数間隔でそれぞれ光を発振する複数の第2共振器を有し、

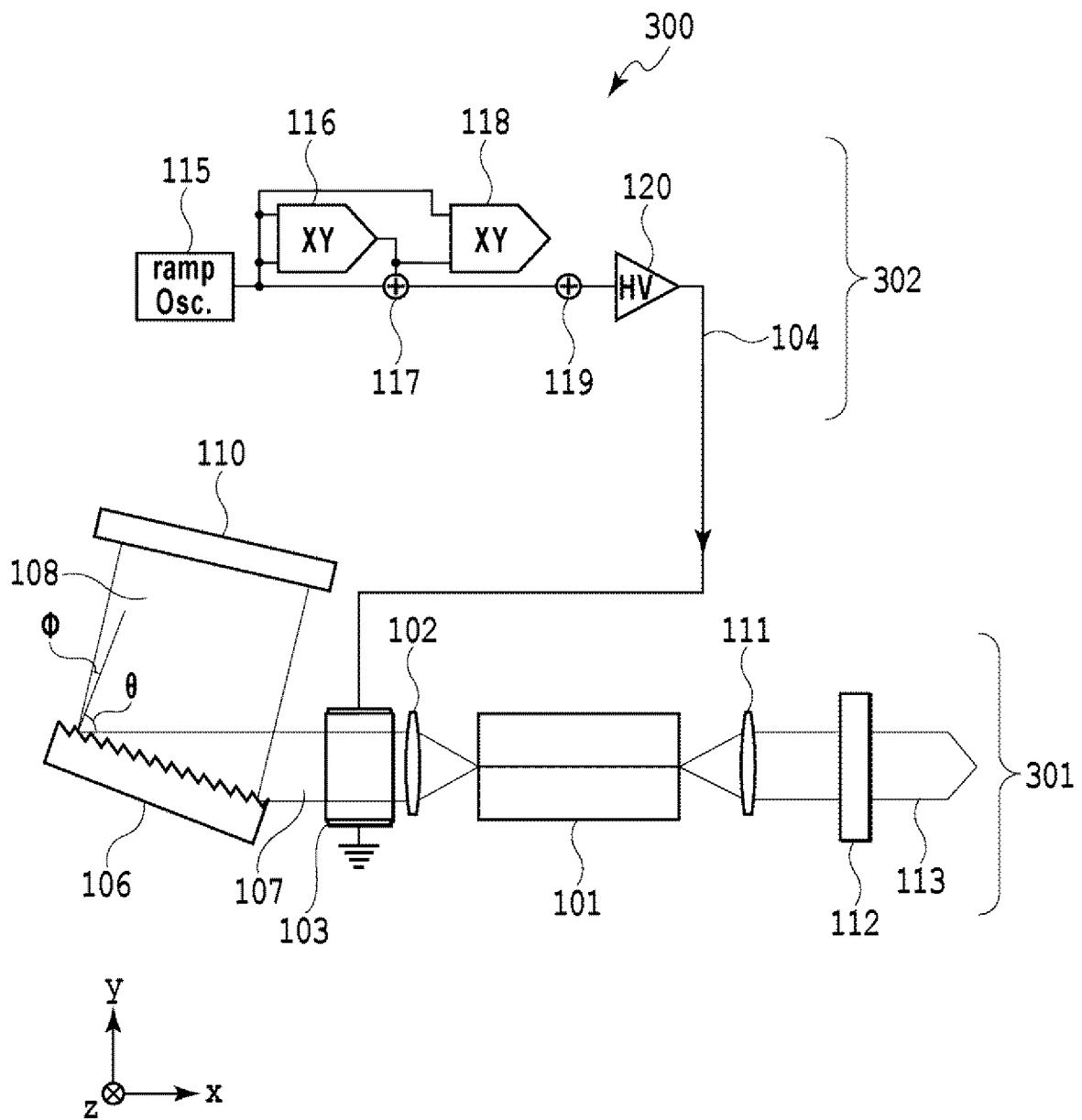
前記各第2共振器は、前記第1発振モードの周波数と当該各第2発振モードの周波数とが一致する周波数で発振された光を出力することを特徴とする請求項1ないし5のいずれか1項に記載の波長掃引光源。

[請求項9] 前記第2共振器は、透過率が波長に対して周期的に変化し各周期における透過スペクトルの半値幅が一定になるように構成されていることを特徴とする請求項1ないし8のいずれか1項に記載の波長掃引光源。

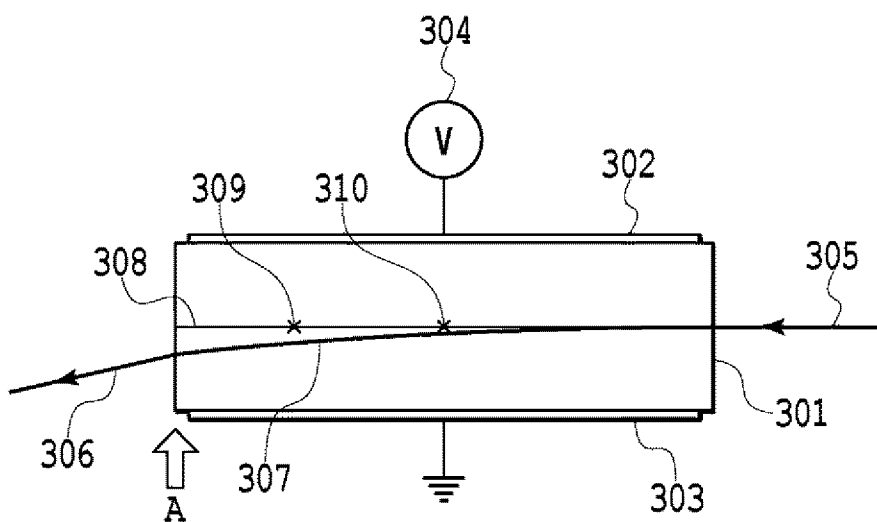
[図1]



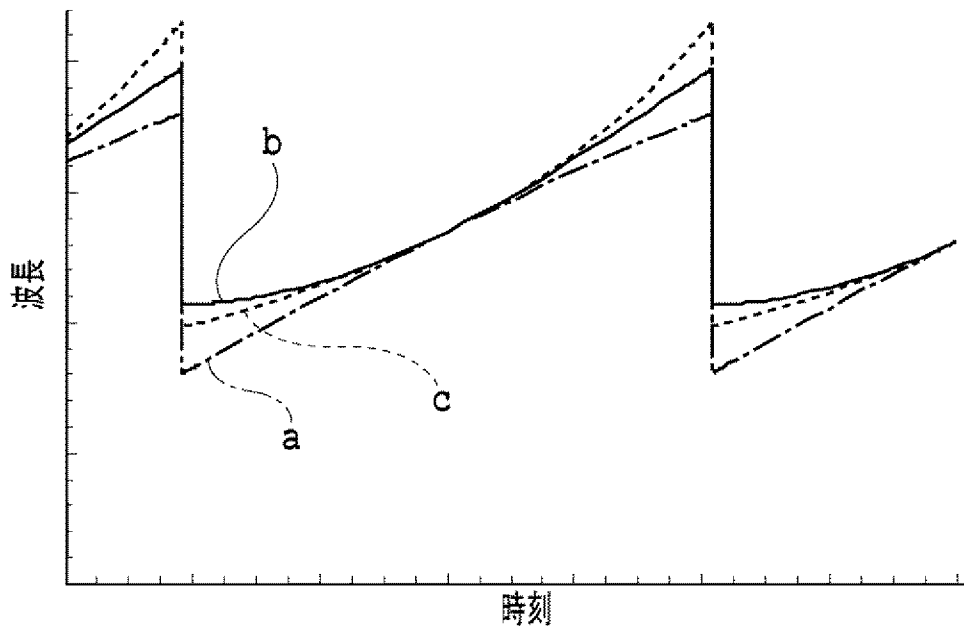
[図2]



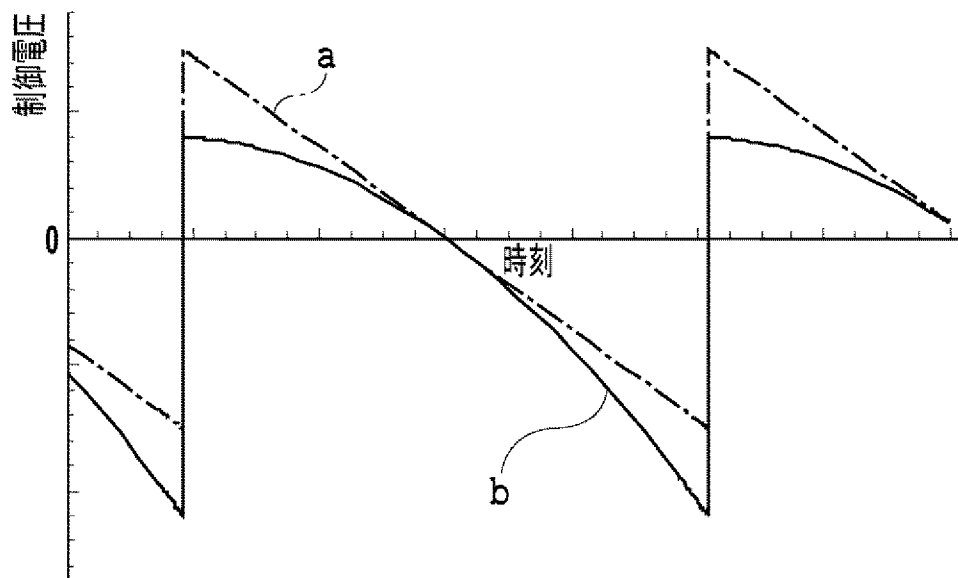
[図3]



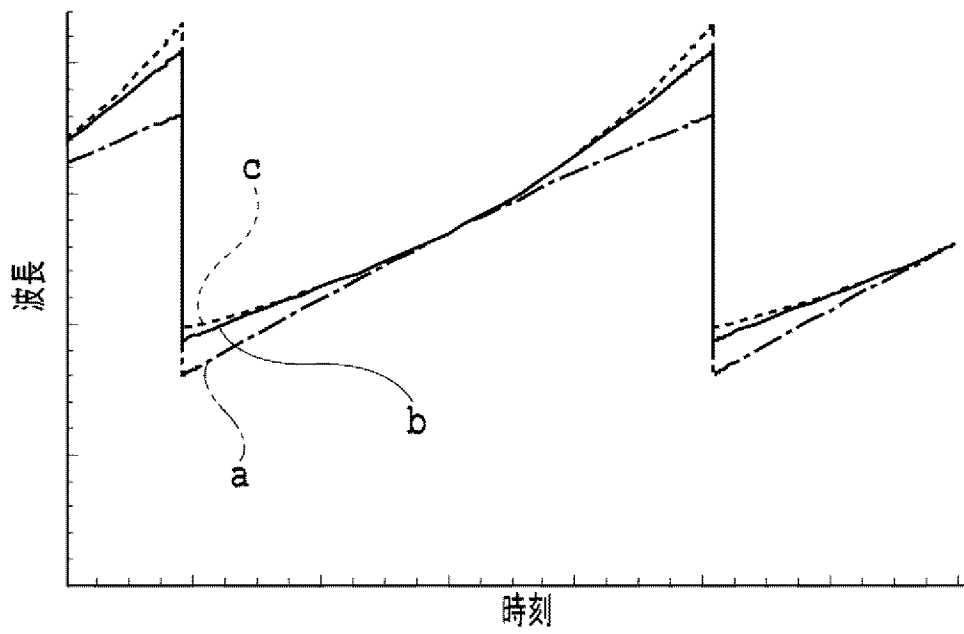
[図4A]



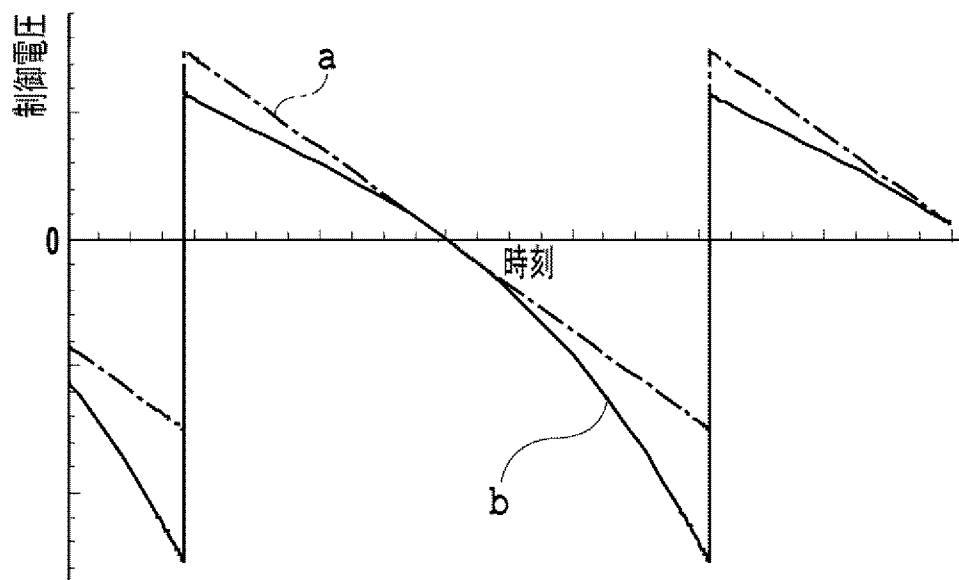
[図4B]



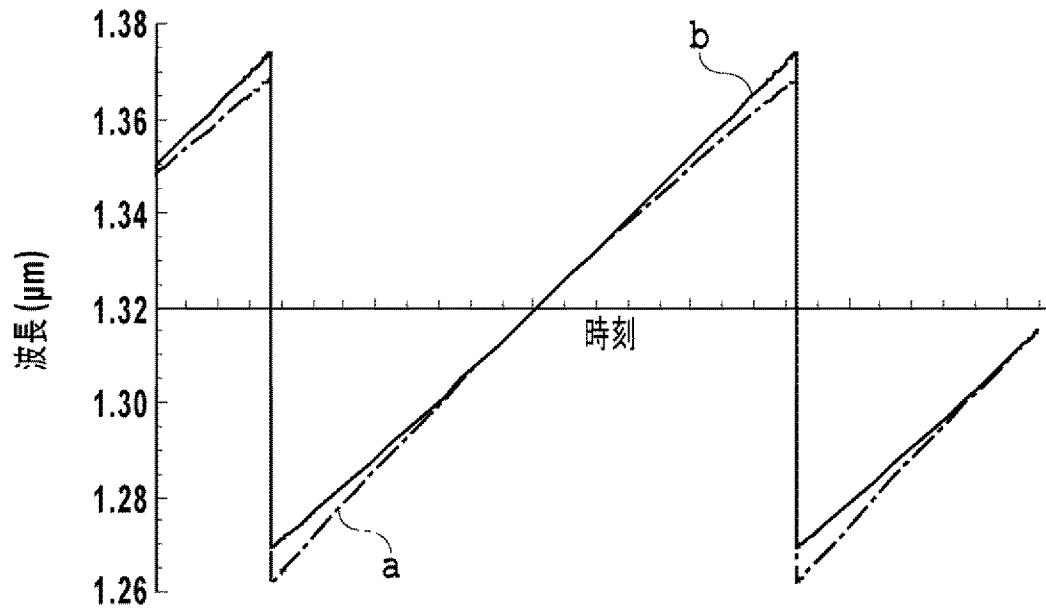
[図5A]



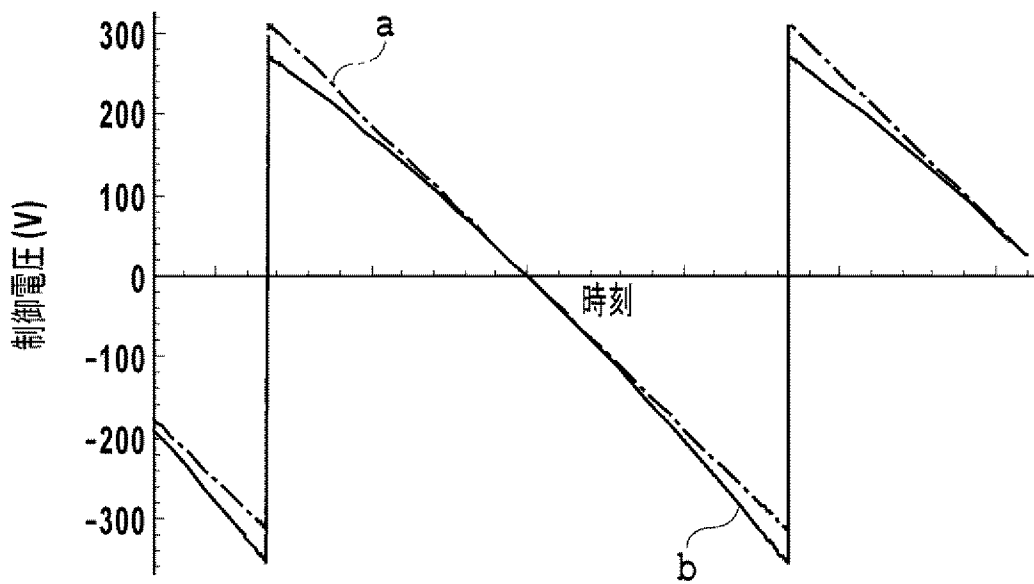
[図5B]



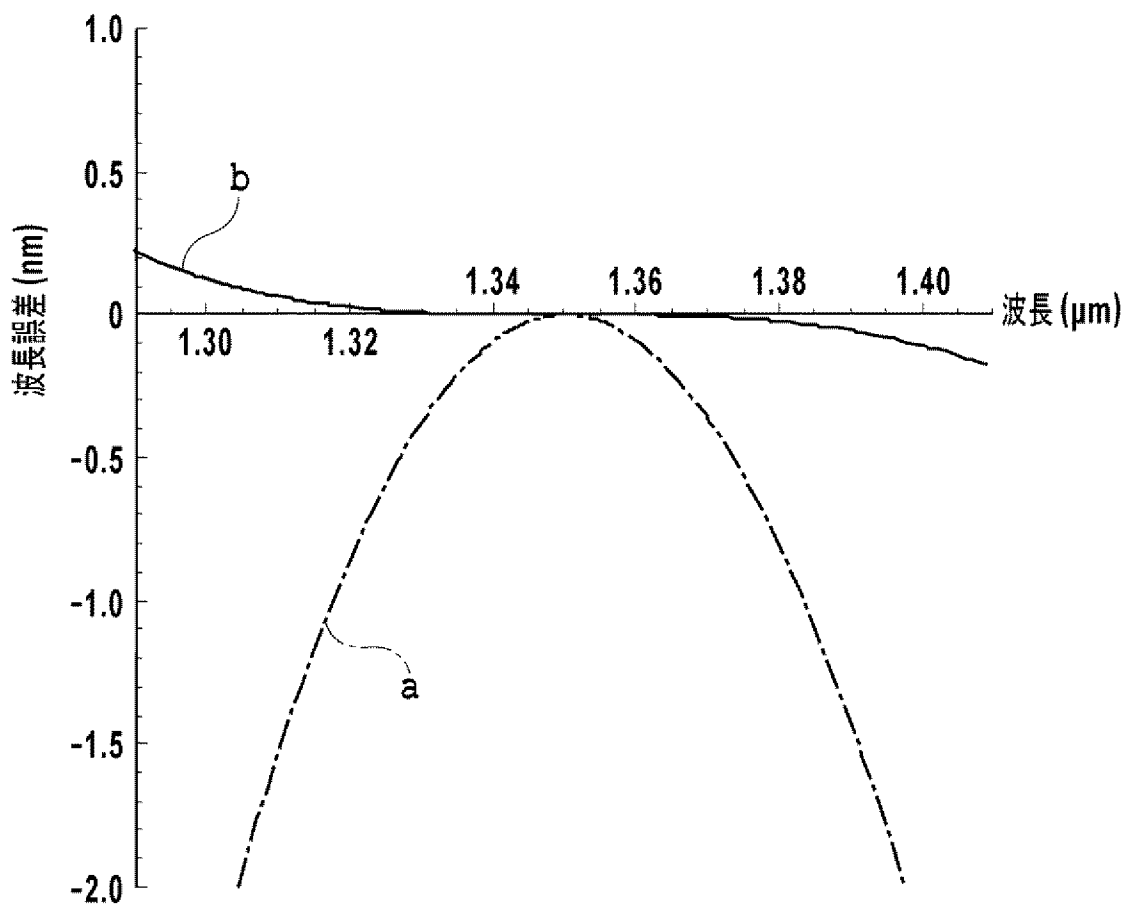
[図6A]



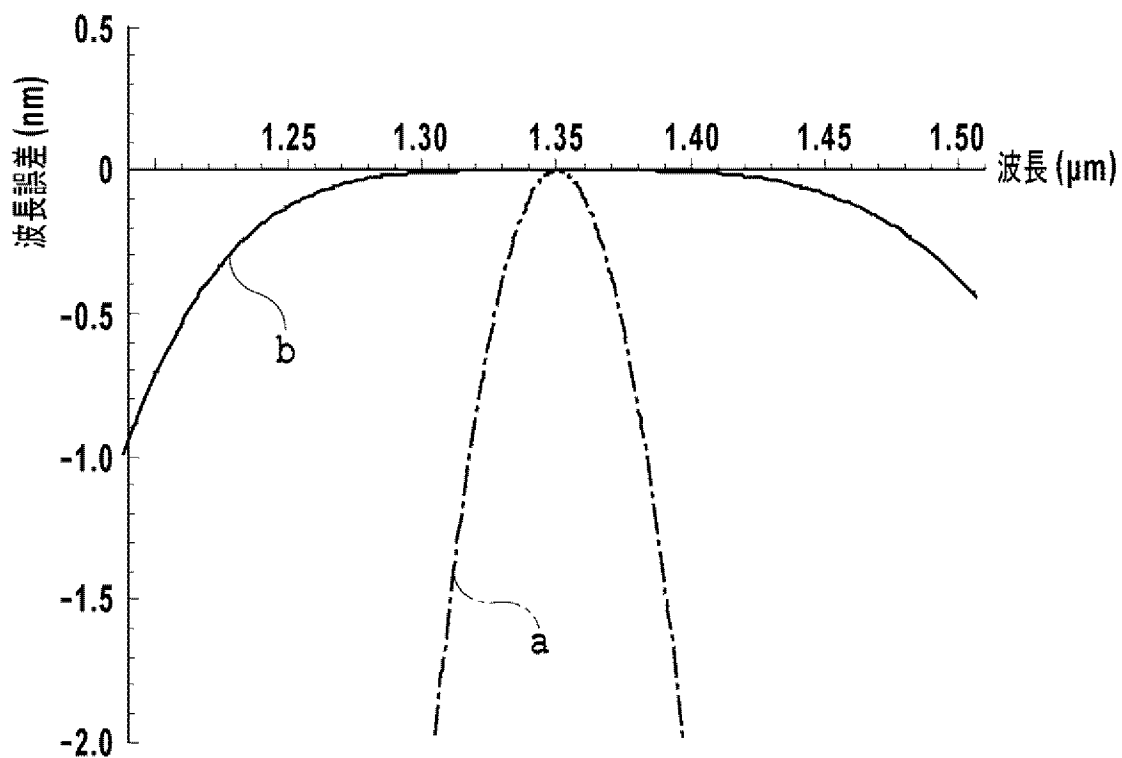
[図6B]



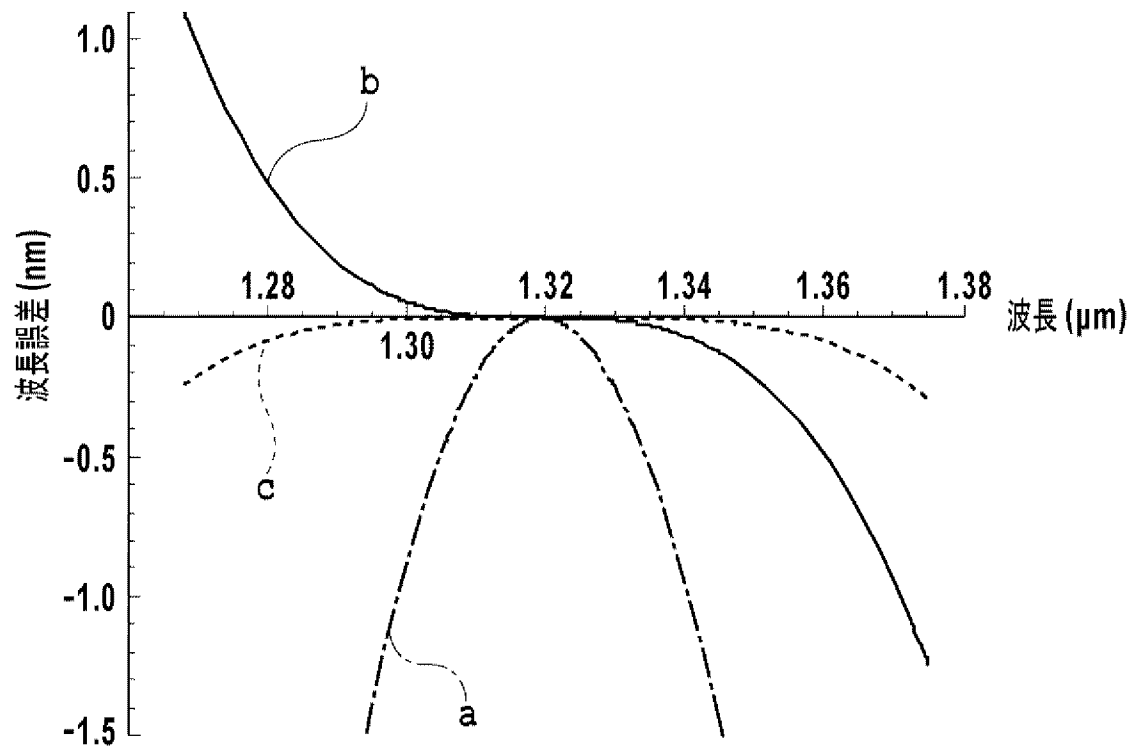
[図7]



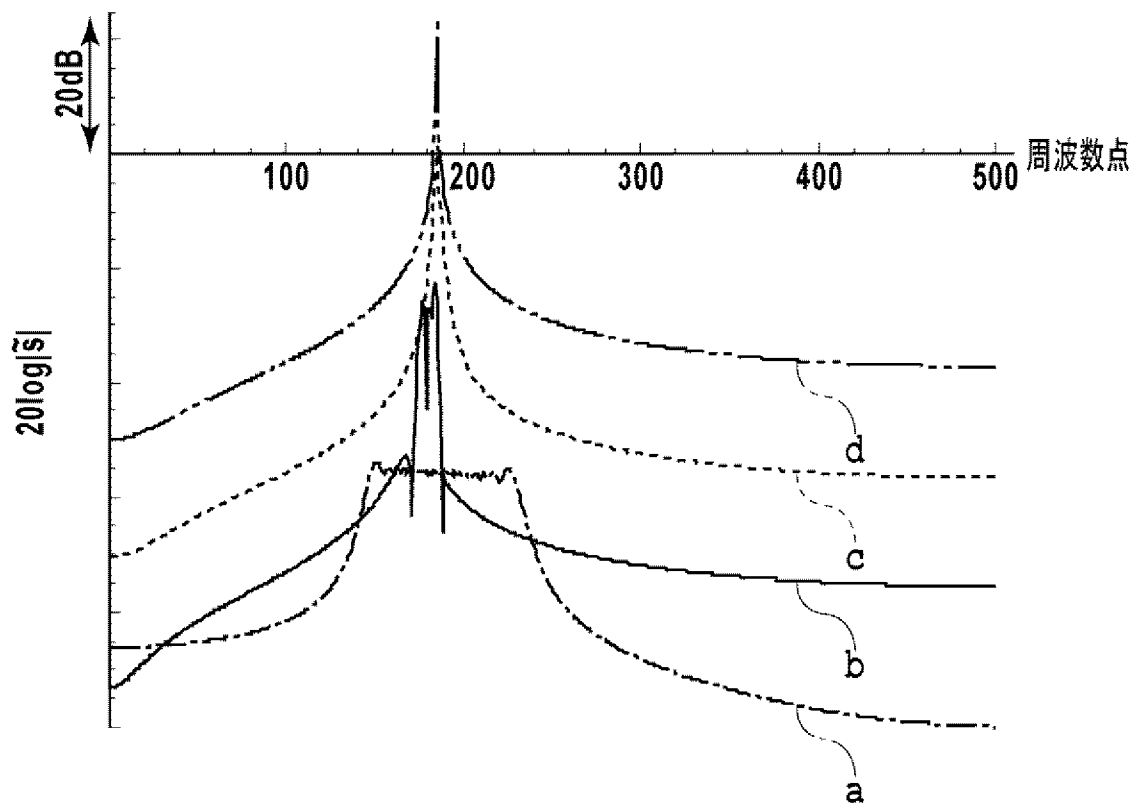
[図8]



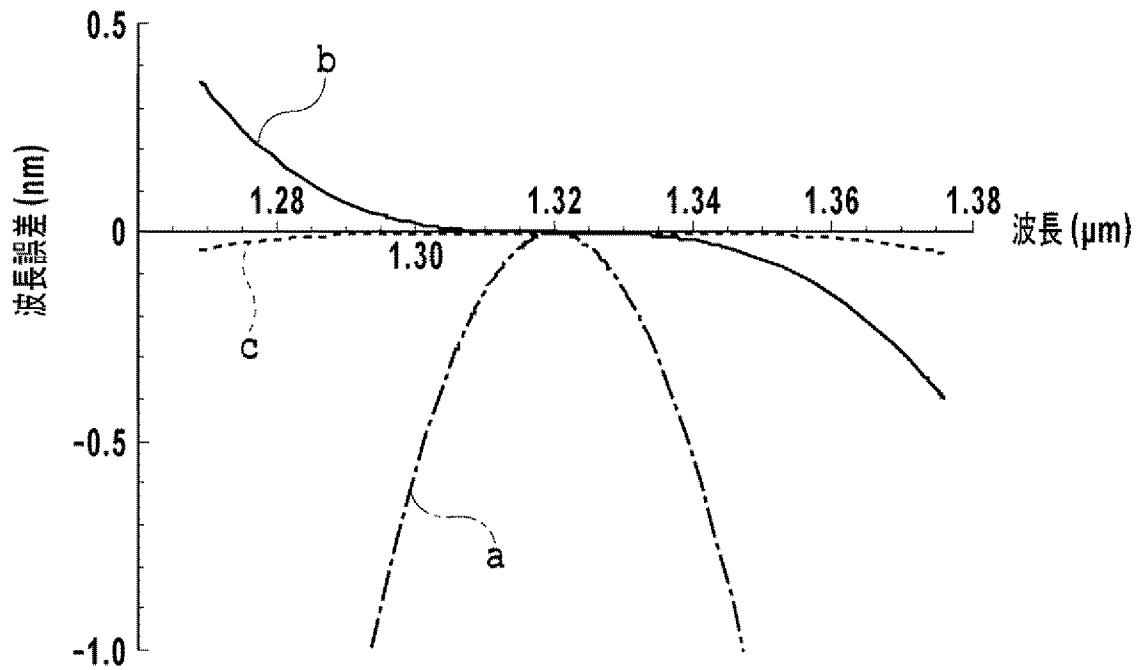
[図9]



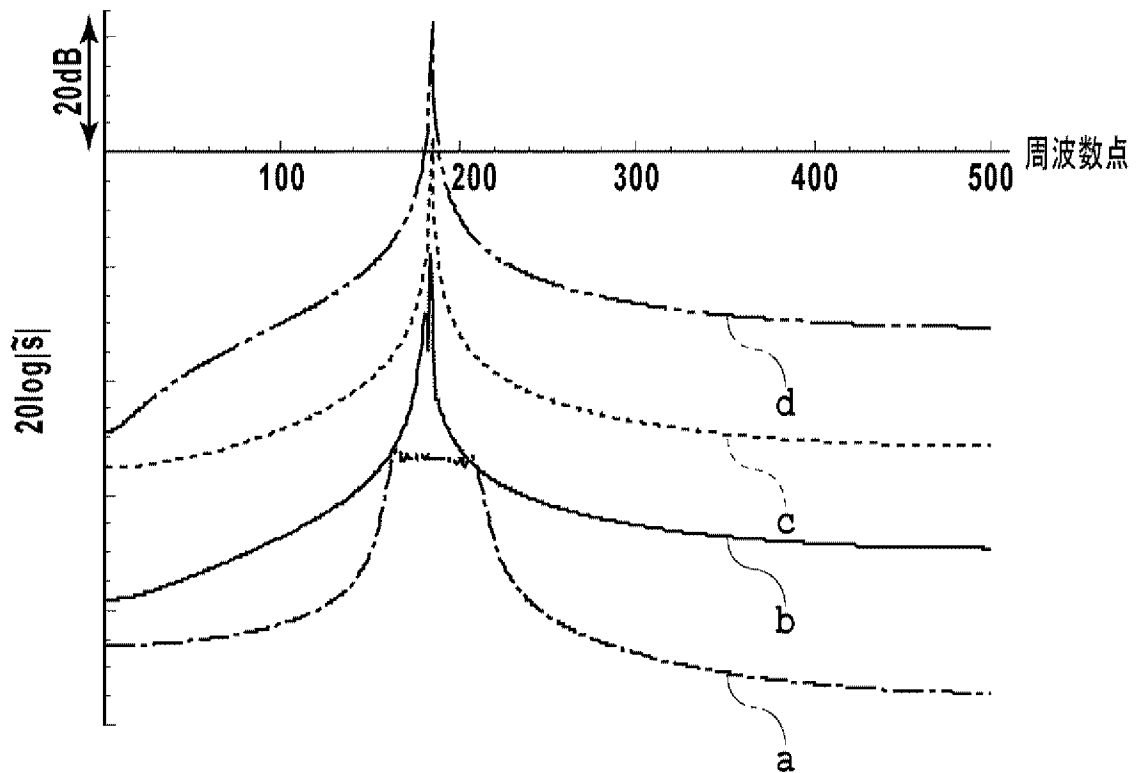
[図10]



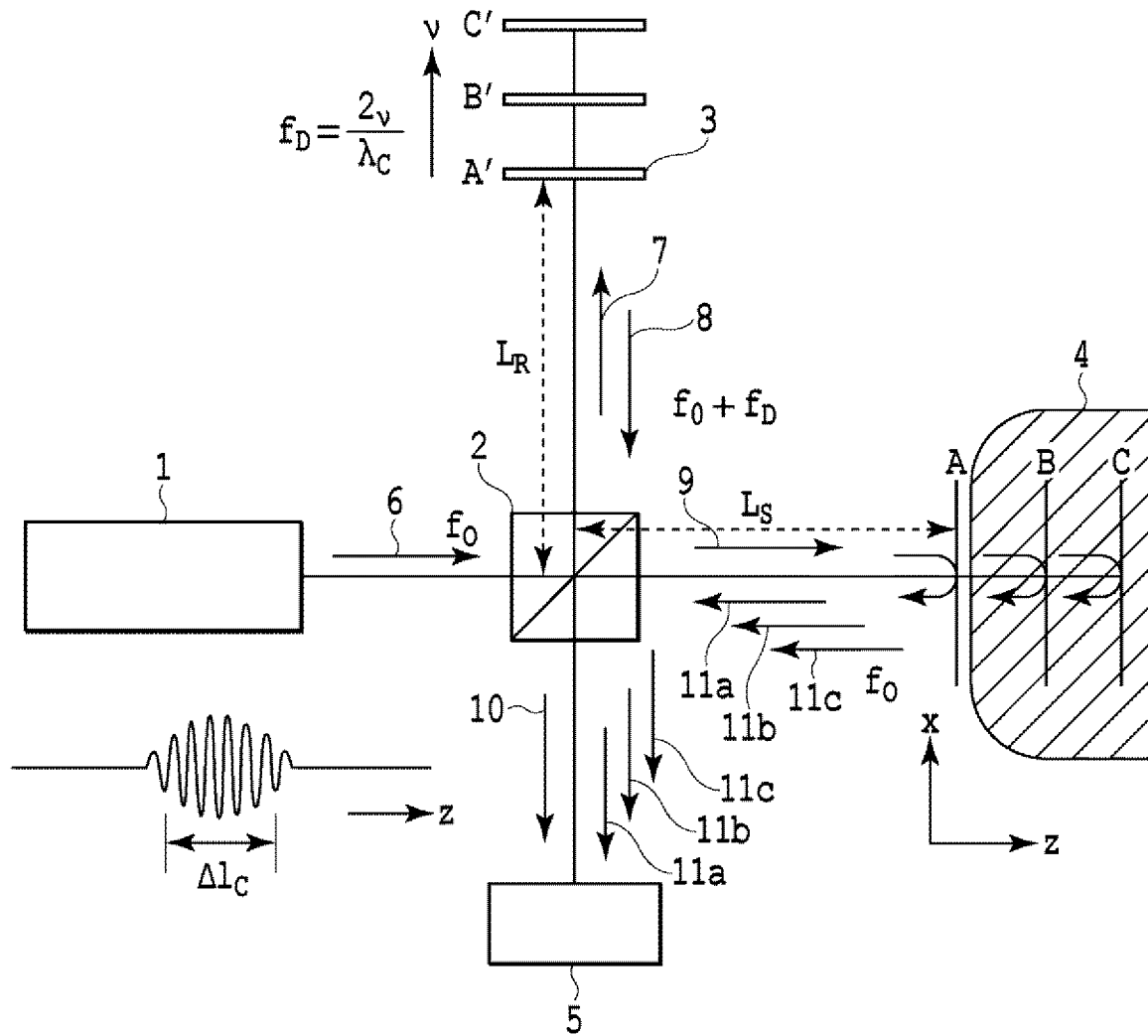
[図11]



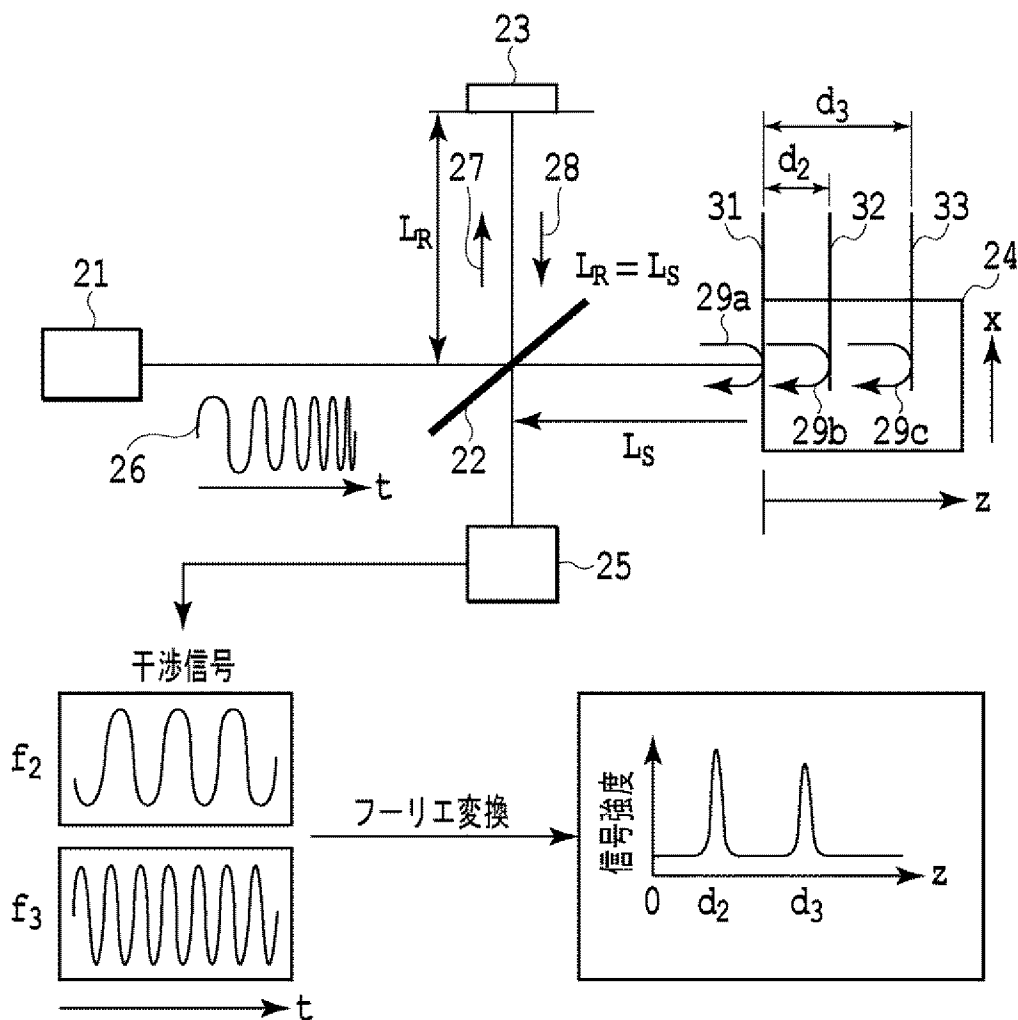
[図12]



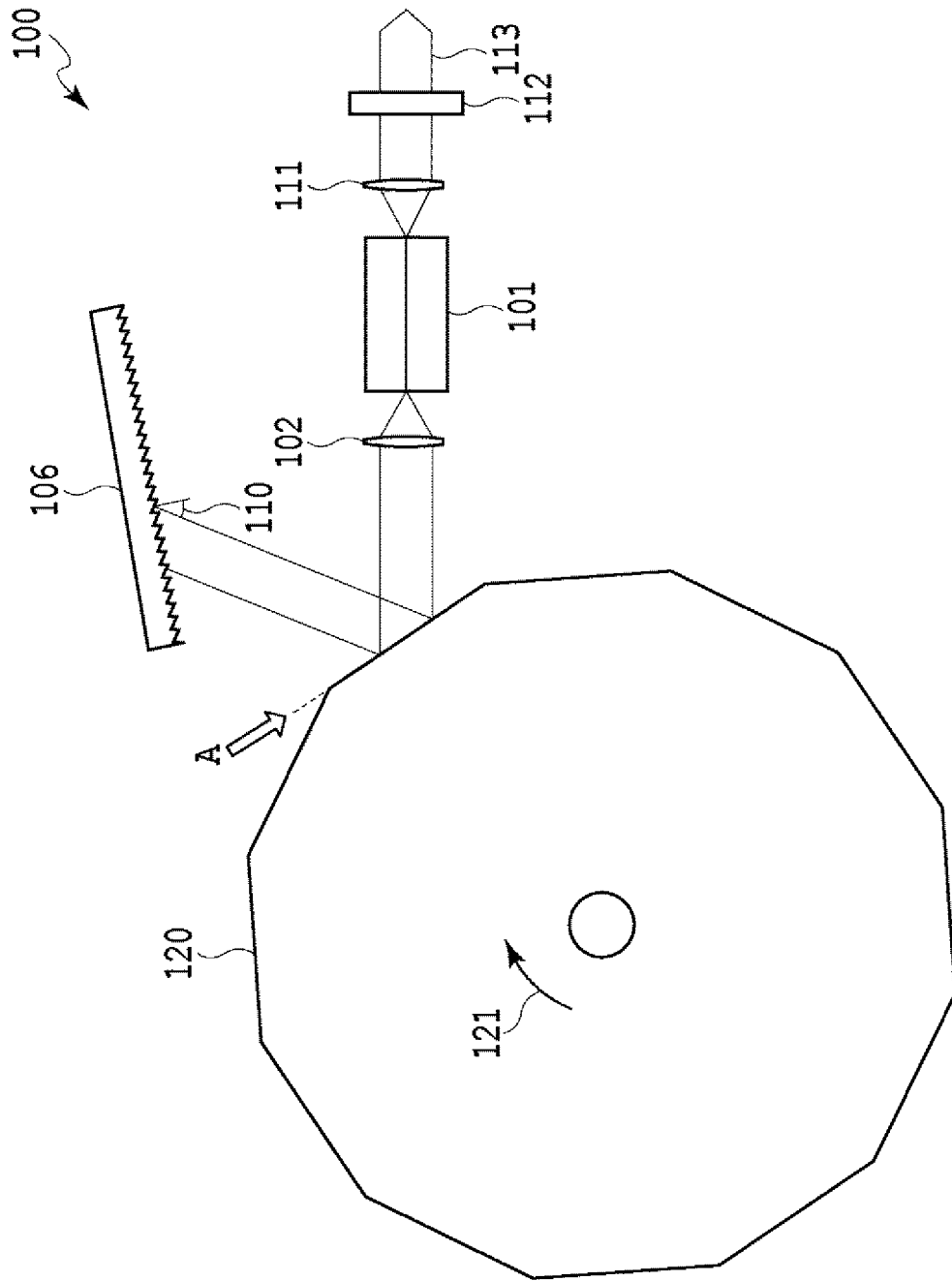
[図13]



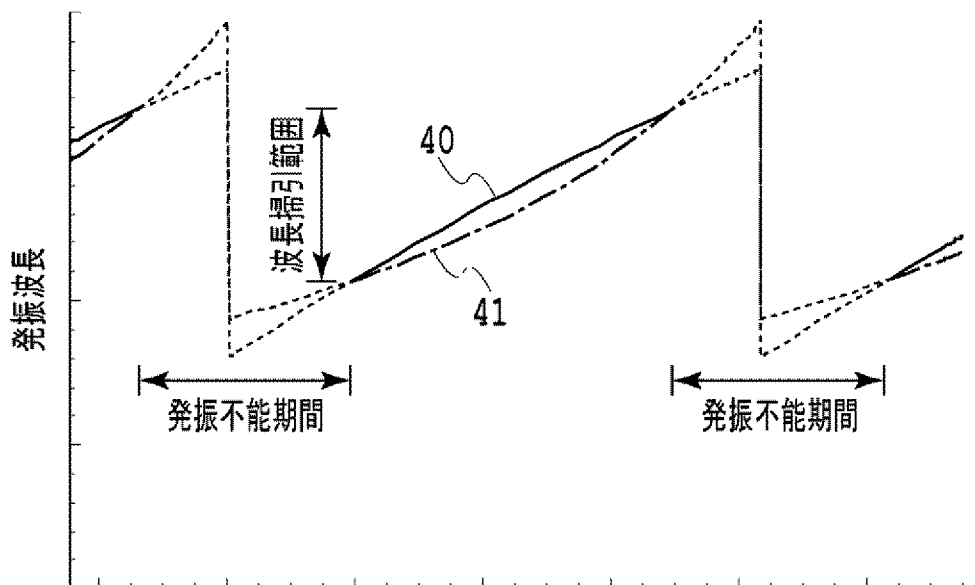
[図14]



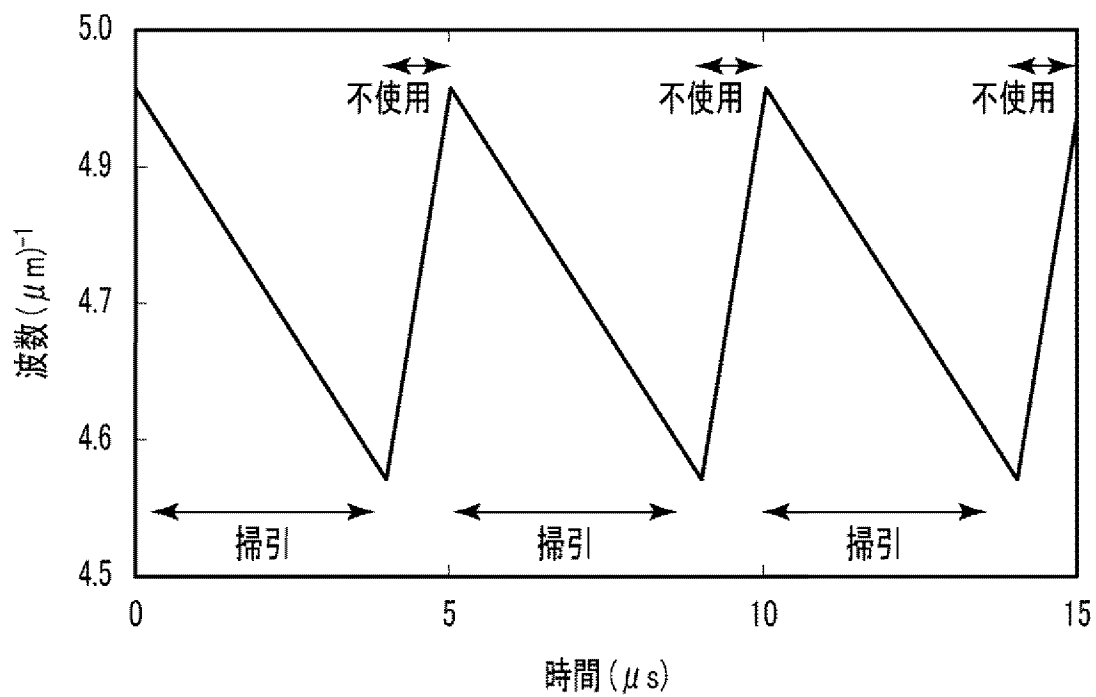
[図15]



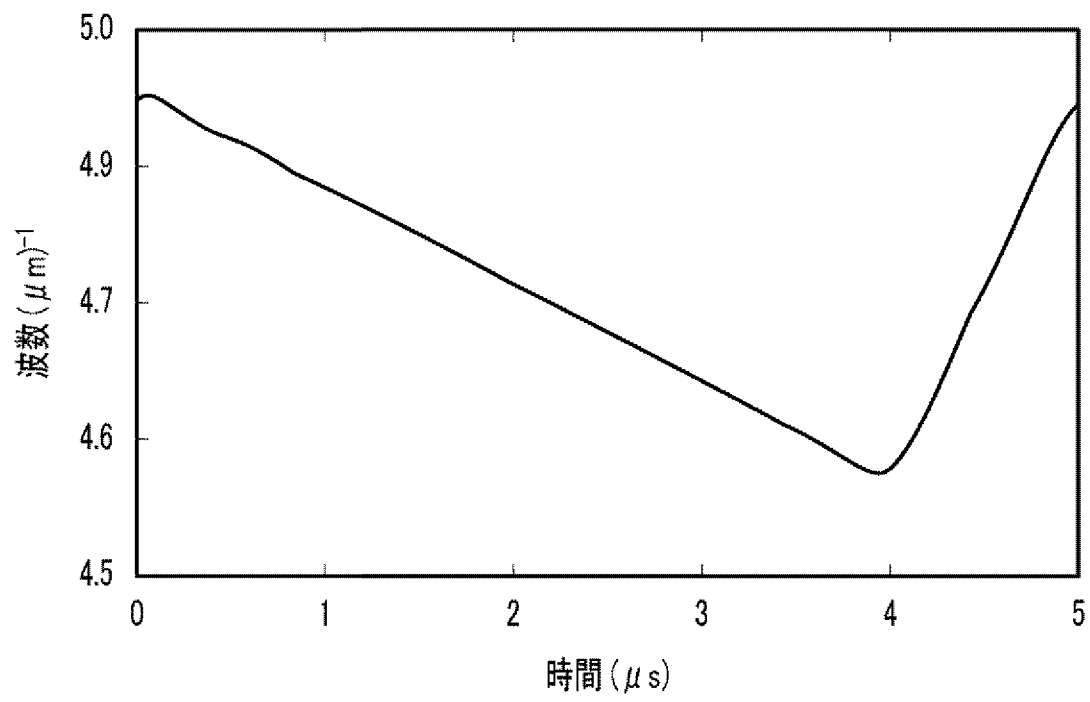
[図16]



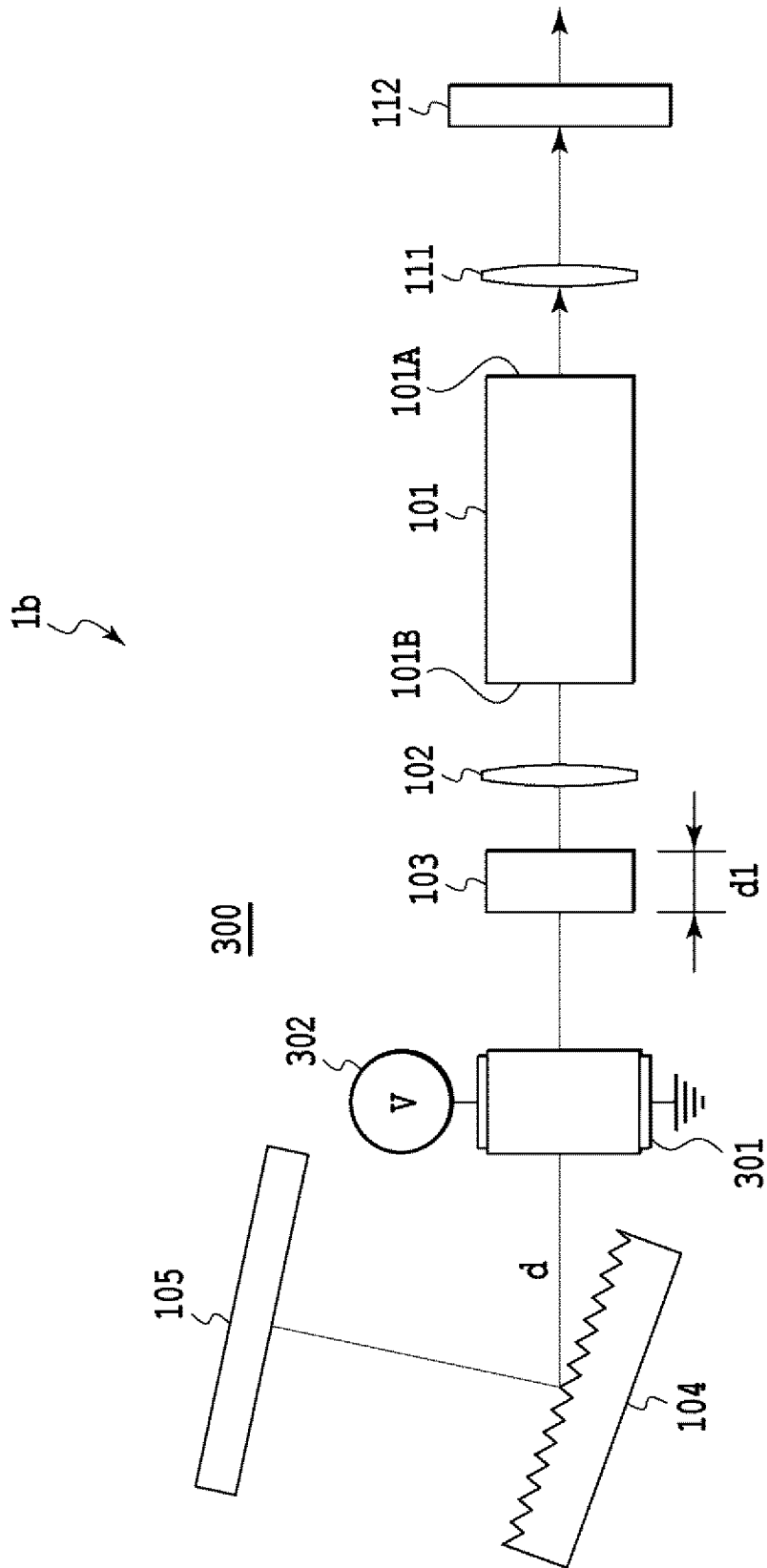
[図17]



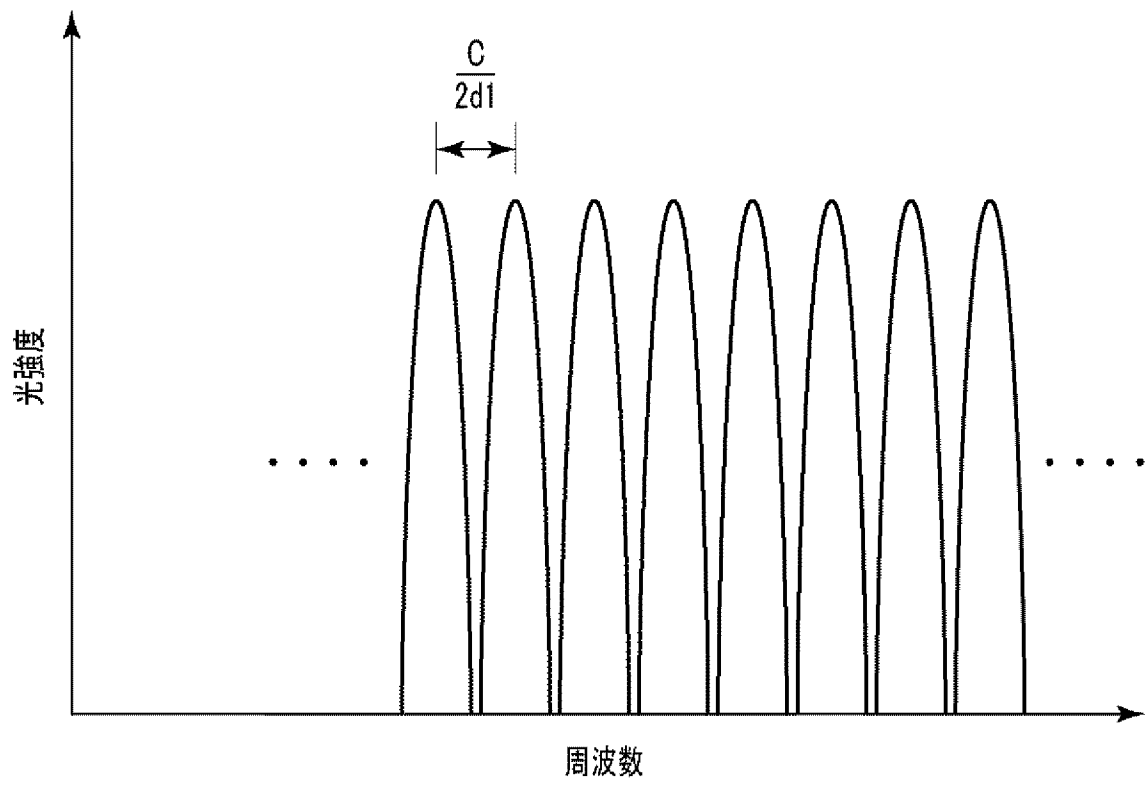
[図18]



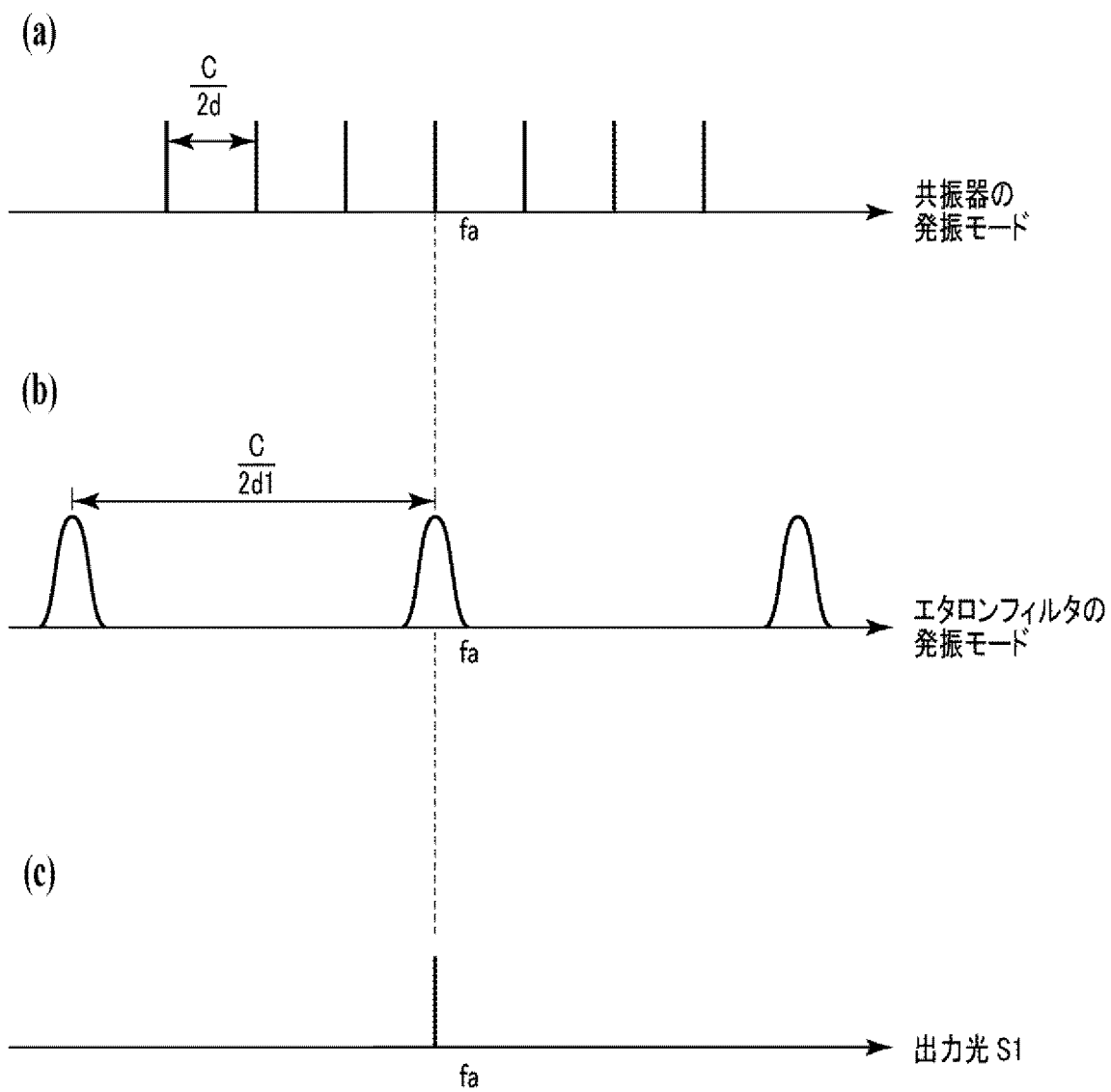
[図19]



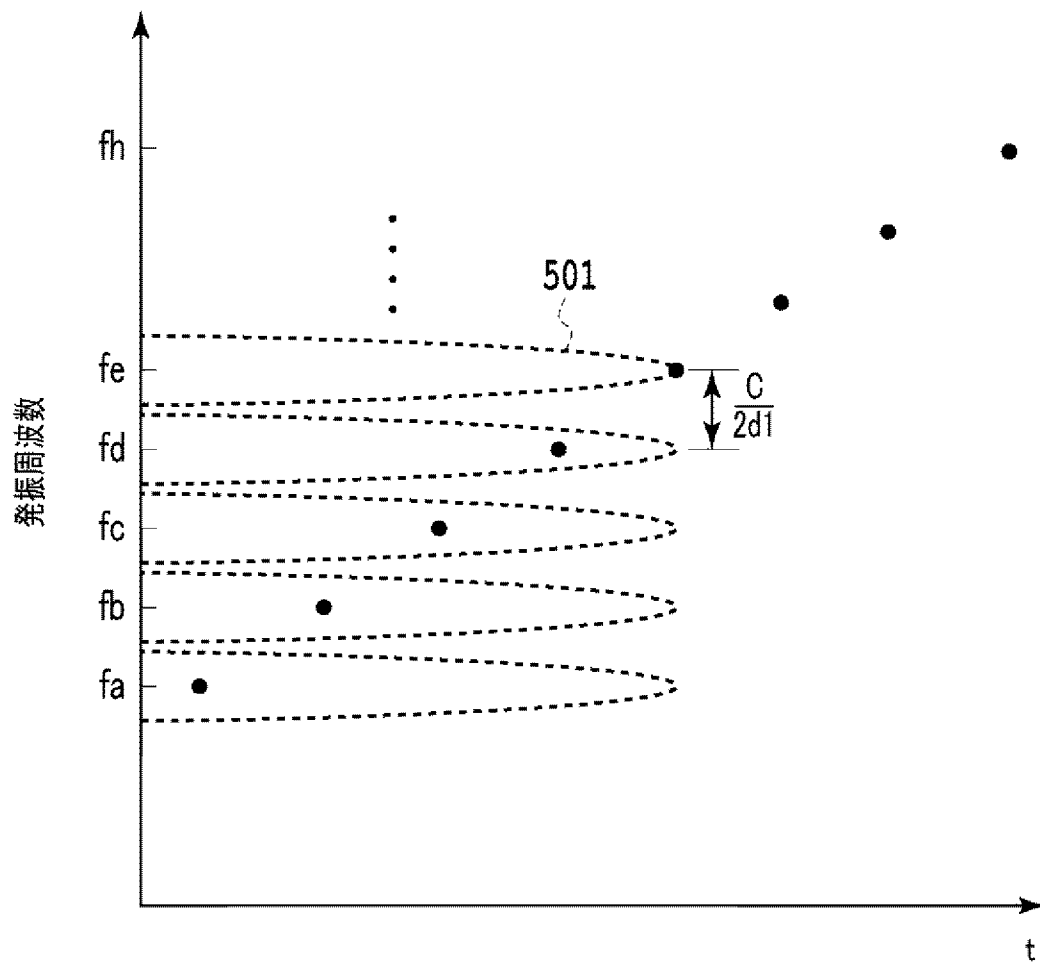
[図20]



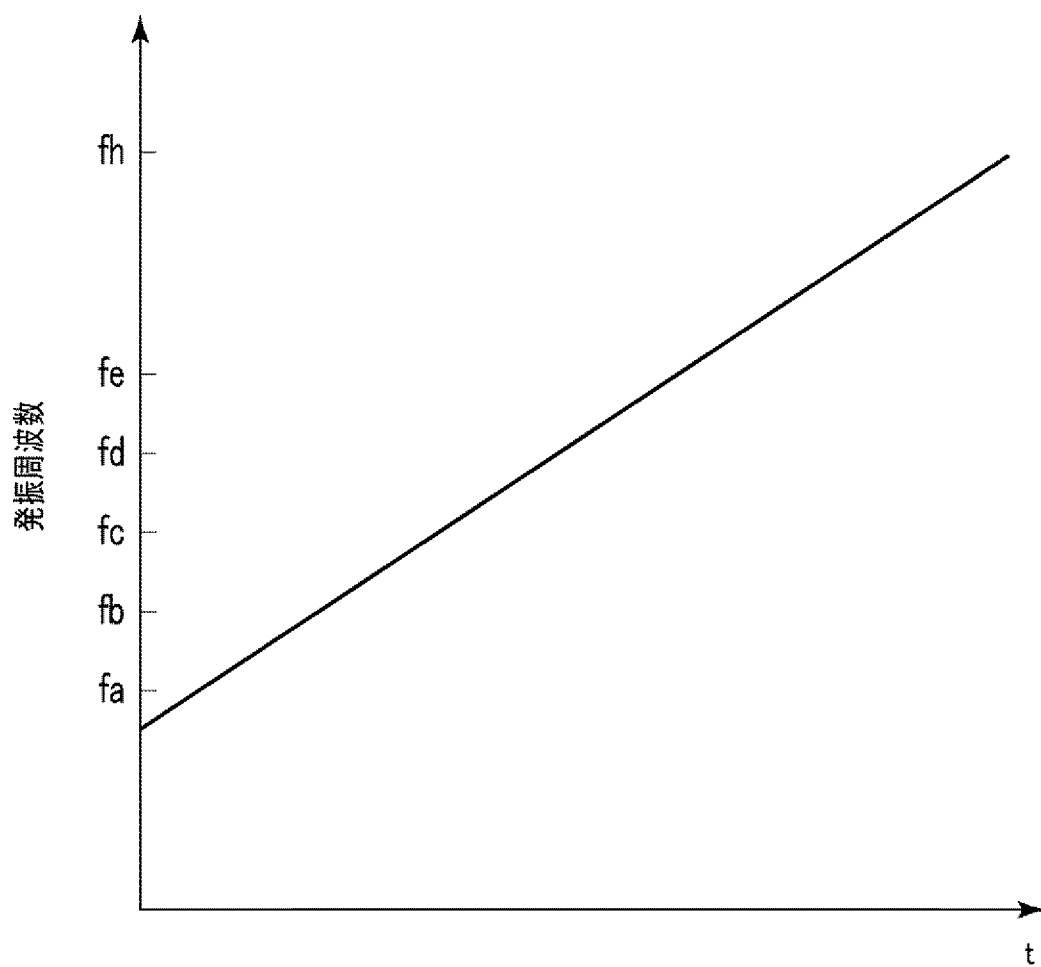
[図21]



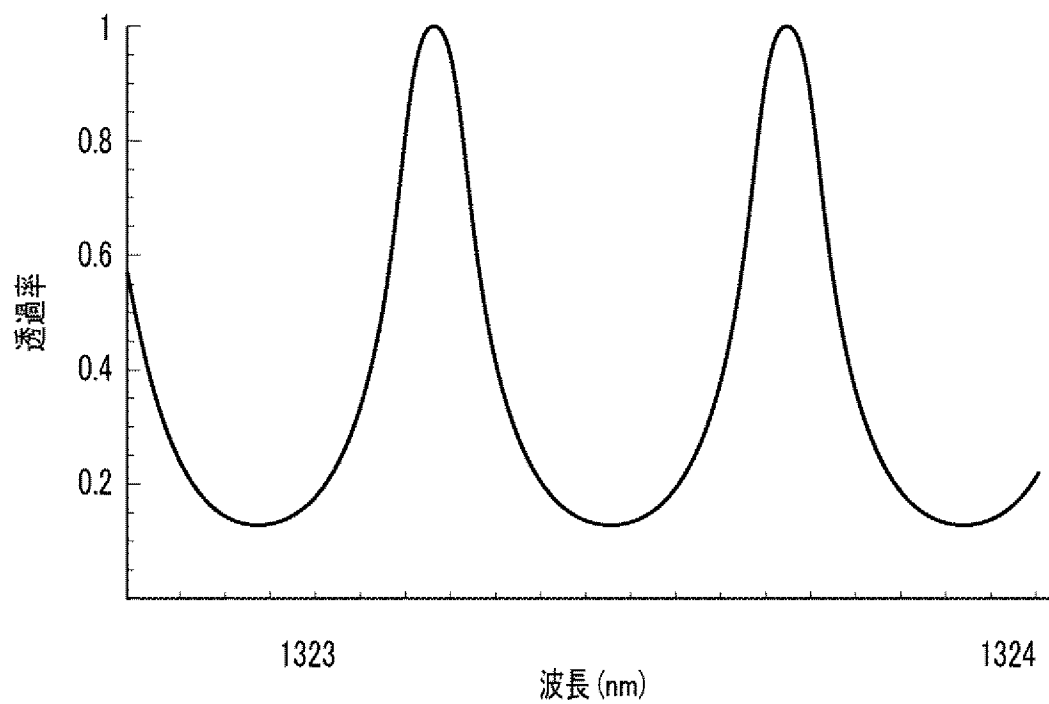
[図22]



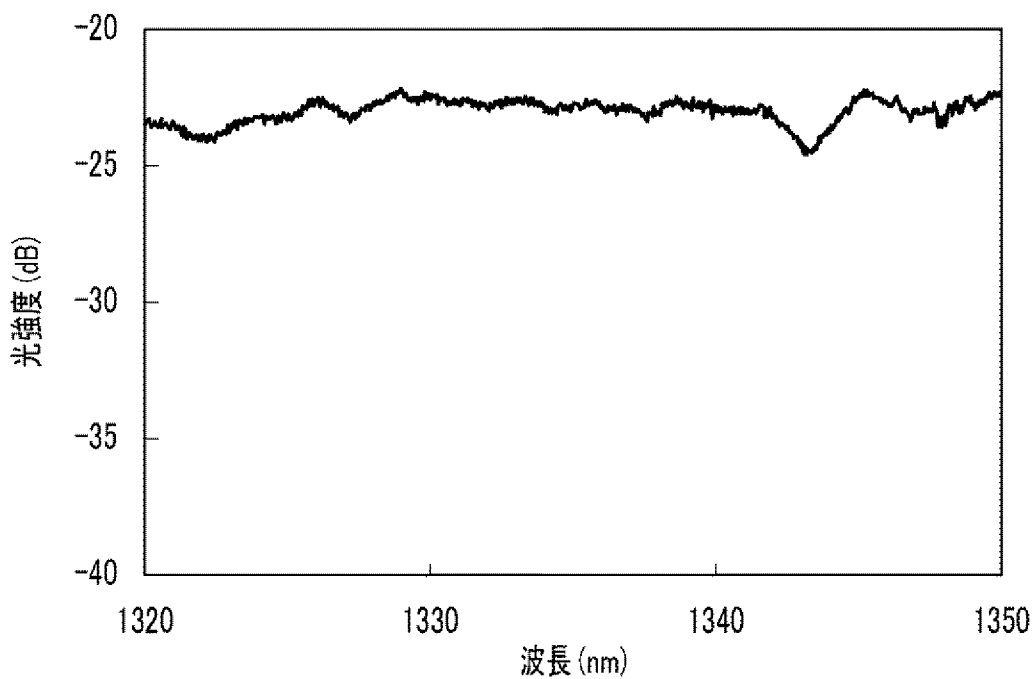
[図23]



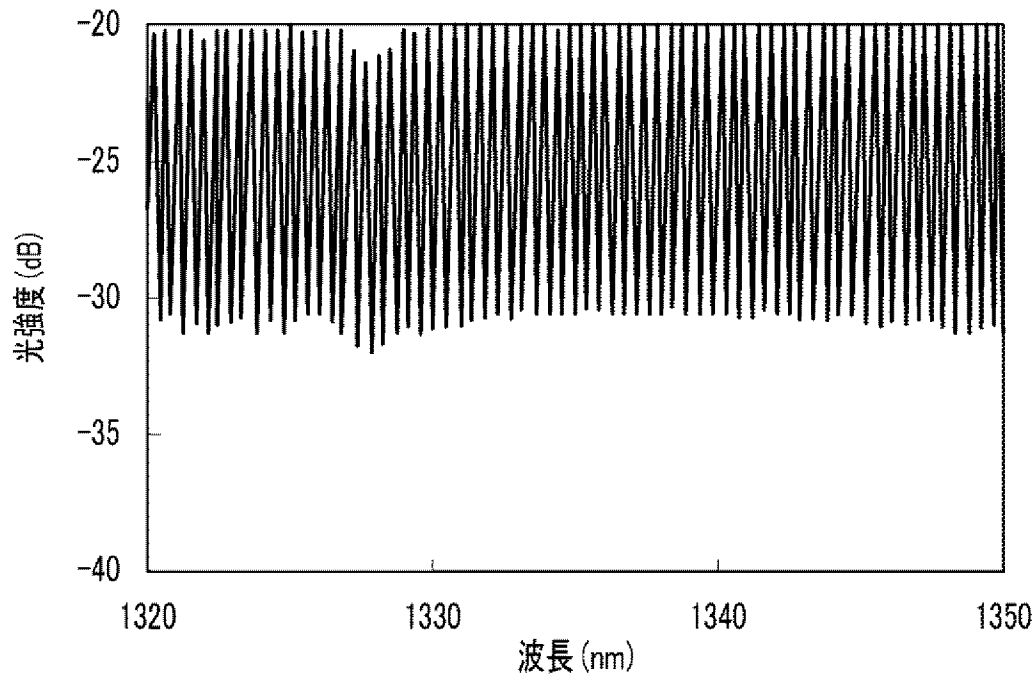
[図24]



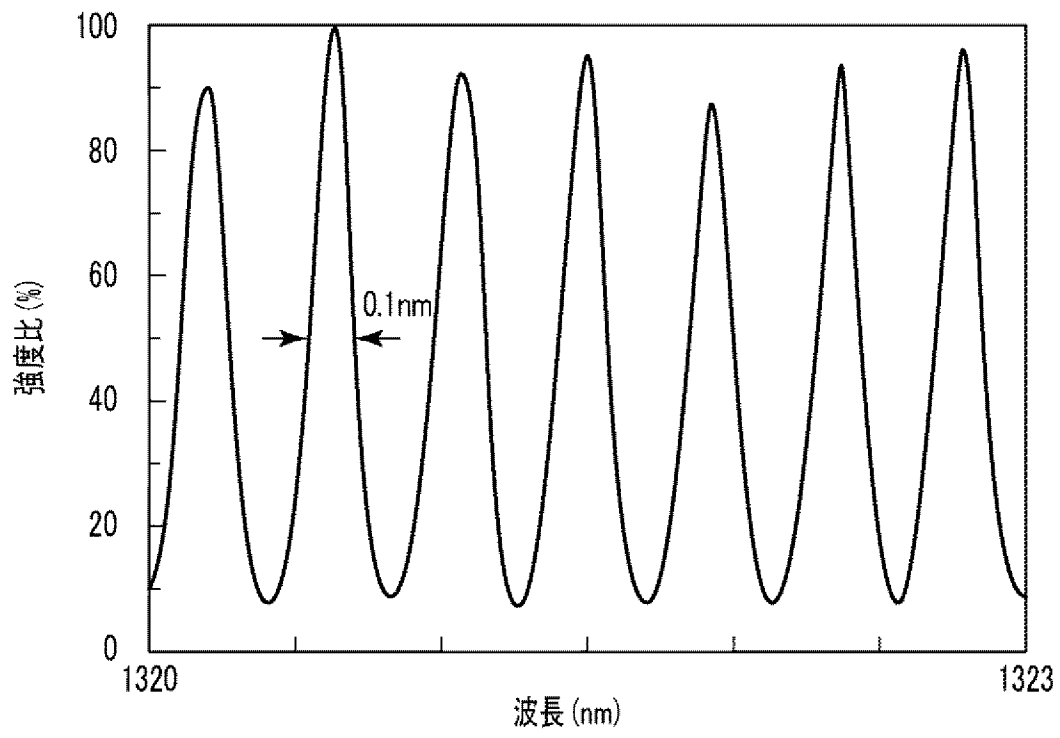
[図25A]



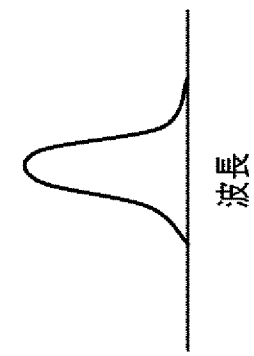
[図25B]



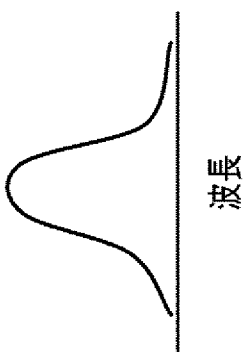
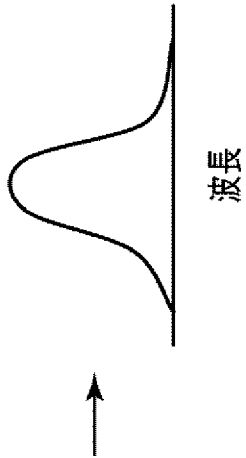
[図26]



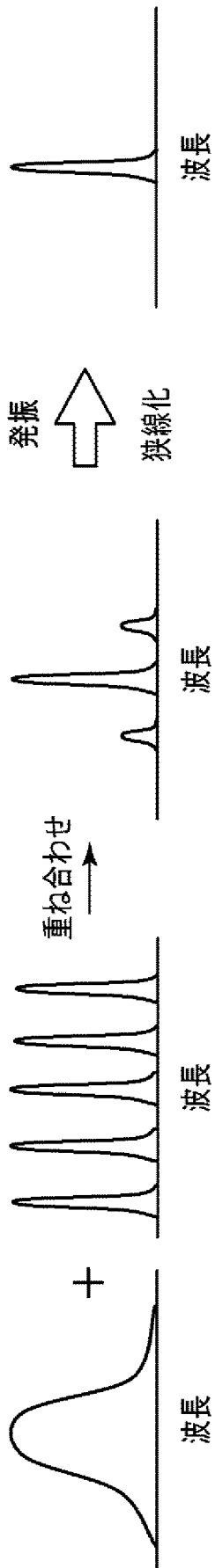
[図27A]



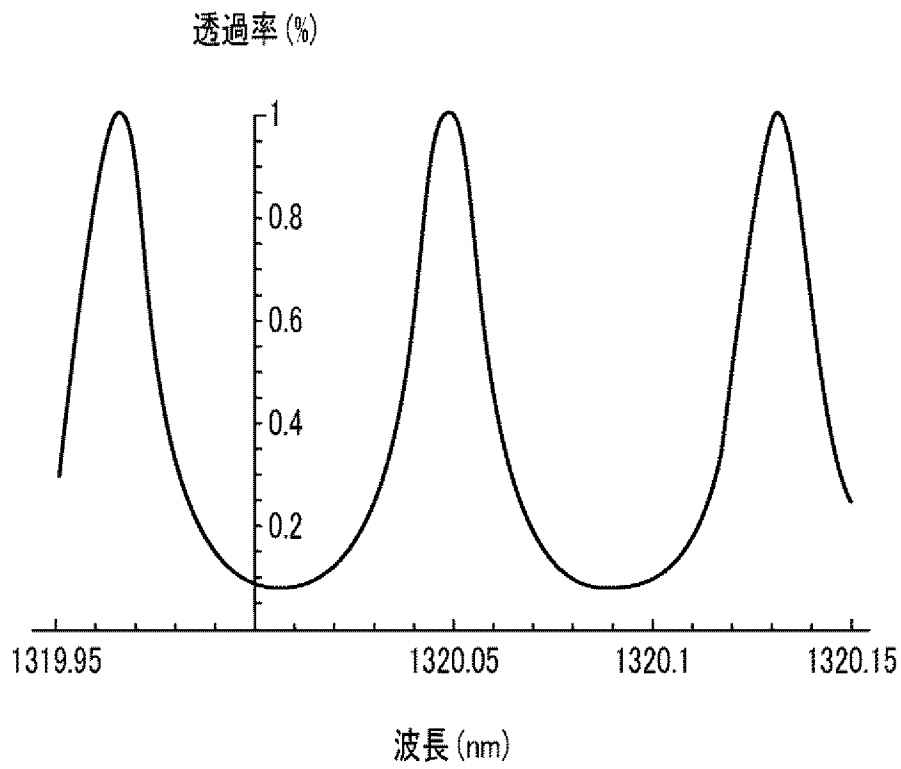
発振 ↑ 狭線化



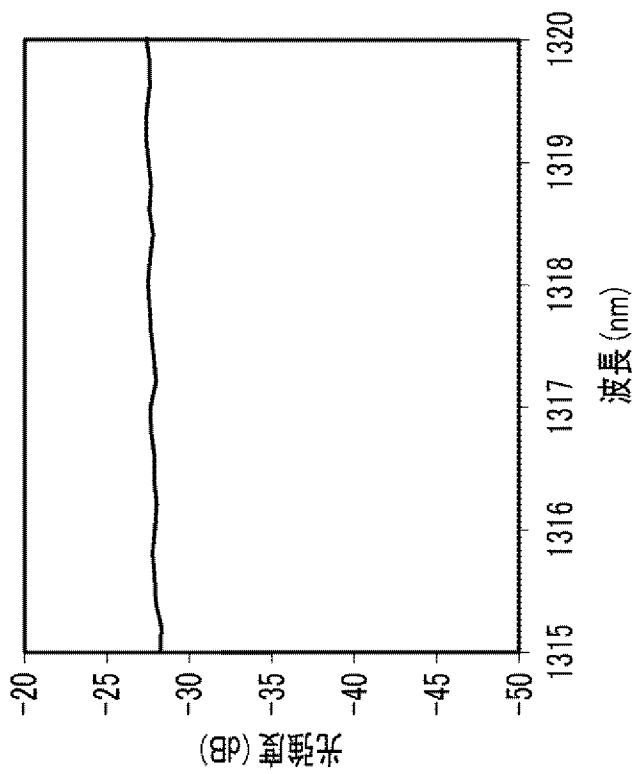
[図27B]



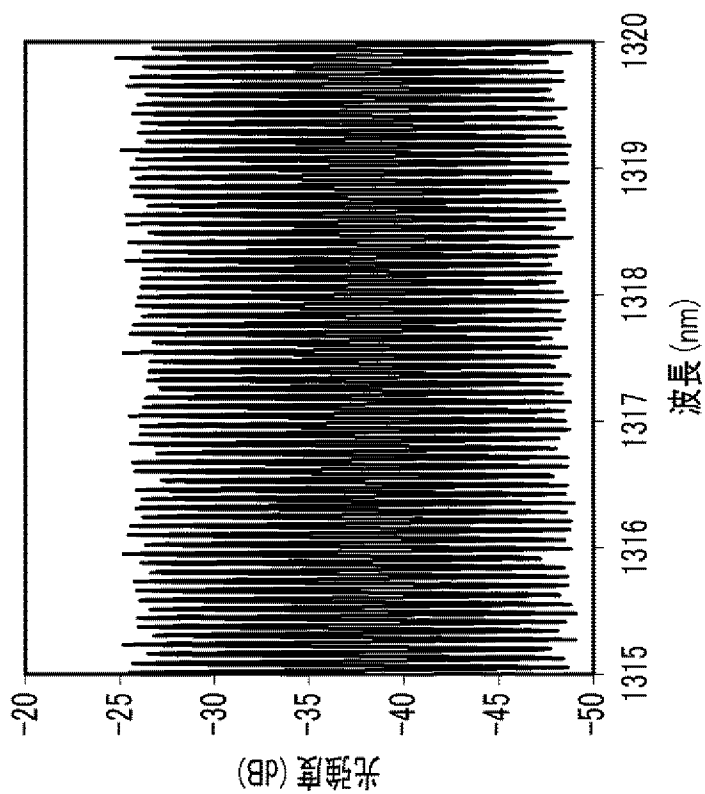
[図28]



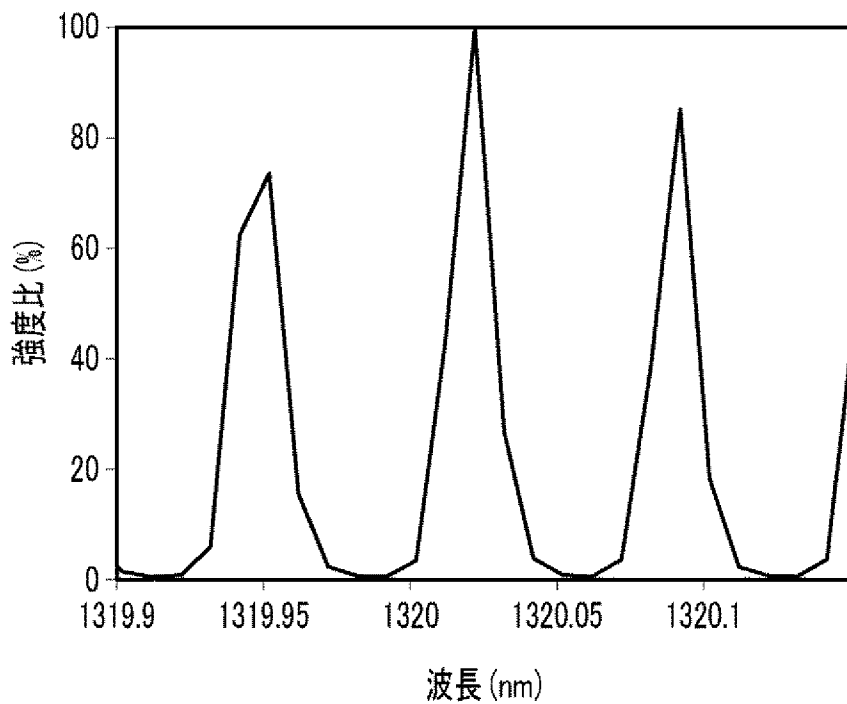
[図29A]



[図29B]



[図30]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/000017

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G01N21/01</i> (2006.01) i, <i>G02F1/29</i> (2006.01) i, <i>H01S3/107</i> (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) <i>G01N21/00-G01N21/61</i> , <i>H01S3/00-5/50</i> 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 1996-2012 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2012 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2012 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2004-046524 A (AGILENT TECHNOLOGIES, INC.), 12 February 2004 (12.02.2004), paragraphs [0020], [0031] to [0033], [0039]; fig. 1 to 4	1-9
Y	JP 2007-027306 A (Santec Corp.), 01 February 2007 (01.02.2007), paragraphs [0003], [0010] to [0016], [0021], [0027] to [0028]	1-9
A	WO 2010/047936 A2 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY), 29 April 2010 (29.04.2010), p.23 ll.24-26	1
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 23 March, 2012 (23.03.12)		Date of mailing of the international search report 10 April, 2012 (10.04.12)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer Telephone No.
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/000017

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 6205159 B1 (David W. Sesko), 20 March 2001 (20.03.2001), fig. 2 to 3; column 11, lines 35 to 42; column 15, line 63 to column 16, line 22; abstract	6-9
A	JP 2010-515919 A (LIGHTLAB IMAGING, INC.), 13 May 2010 (13.05.2010), paragraphs [0066] to [0070]; fig. 17	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2012/000017

JP 2004-046524 A	2004.02.12	US 2004/010537 A1	2004.01.15
		US 6822487 B2	2004.11.23
JP 2007-027306 A	2007.02.01	(Family: none)	
WO 2010/047936 A2	2010.04.29	AU 2009307933 A1	2010.04.29
		CA 2740880 A1	2010.04.29
		CR 20110198 A	2011.07.18
		EP 1839375 A2	2007.10.03
		EP 2264841 A2	2010.12.22
		EP 2338212 A2	2011.06.29
		US 2006/187537 A1	2006.08.24
		US 7414779 B2	2008.08.19
		US 2009/174931 A1	2009.07.09
		WO 2006/079078 A2	2006.07.27
		WO 2006/079078 A3	2006.08.31
		WO 2010/047936 A8	2010.07.15
		WO 2010/047936 A3	2011.06.03
US 6205159 B1	2001.03.20	(Family: none)	
JP 2010-515919 A	2010.05.13	CN 101600388 A	2009.12.09
		EP 2106240 A1	2009.10.07
		US 2008/165366 A1	2008.07.10
		US 7916387 B2	2011.03.29
		US 2011/101207 A1	2011.05.05
		US 2011/216325 A1	2011.09.08
		WO 2008/086017 A1	2008.07.17

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N21/01(2006.01)i, G02F1/29(2006.01)i, H01S3/107(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. G01N 21/00 - G01N 21/61, H01S 3/00 - 5/50										
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:30%;">日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2012年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2012年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2012年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2012年	日本国実用新案登録公報	1996-2012年	日本国登録実用新案公報	1994-2012年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2012年									
日本国実用新案登録公報	1996-2012年									
日本国登録実用新案公報	1994-2012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) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)										
C. 関連すると認められる文献										
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号								
Y	JP 2004-046524 A (AGILENT TECHNOLOGIES, INC.) 2004.02.12 [0020], [0031]-[0033], [0039], 図 1-4	1-9								
Y	JP 2007-027306 A (サンテック株式会社) 2007.02.01 [0003], [0010]-[0016], [0021], [0027]-[0028]	1-9								
A	WO 2010/047936 A2 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 2010.04.29 p. 23 ll. 24-26	1								
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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 23.03.2012	国際調査報告の発送日 10.04.2012									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号 100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 高場 正光 電話番号 03-3581-1101 内線 3292	2W 2910								

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	US 6205159 B1 (David W. Sesko) 2001.03.20 Figs.2-3, Col.11 ll.35-42, Col.15 l.63-Col.16 l.22, Abstract	6-9
A	JP 2010-515919 A (LIGHTLAB IMAGING, INC.) 2010.05.13 [0066]-[0070], 図 17	1

JP 2004-046524 A	2004. 02. 12	US 2004/010537 A1	2004. 01. 15
		US 6822487 B2	2004. 11. 23
-----	-----	-----	-----
JP 2007-027306 A	2007. 02. 01	(ファミリーなし)	
-----	-----	-----	-----
WO 2010/047936 A2	2010. 04. 29	AU 2009307933 A1	2010. 04. 29
		CA 2740880 A1	2010. 04. 29
		CR 20110198 A	2011. 07. 18
		EP 1839375 A2	2007. 10. 03
		EP 2264841 A2	2010. 12. 22
		EP 2338212 A2	2011. 06. 29
		US 2006/187537 A1	2006. 08. 24
		US 7414779 B2	2008. 08. 19
		US 2009/174931 A1	2009. 07. 09
		WO 2006/079078 A2	2006. 07. 27
		WO 2006/079078 A3	2006. 08. 31
		WO 2010/047936 A8	2010. 07. 15
		WO 2010/047936 A3	2011. 06. 03
-----	-----	-----	-----
US 6205159 B1	2001. 03. 20	(ファミリーなし)	
-----	-----	-----	-----
JP 2010-515919 A	2010. 05. 13	CN 101600388 A	2009. 12. 09
		EP 2106240 A1	2009. 10. 07
		US 2008/165366 A1	2008. 07. 10
		US 7916387 B2	2011. 03. 29
		US 2011/101207 A1	2011. 05. 05
		US 2011/216325 A1	2011. 09. 08
		WO 2008/086017 A1	2008. 07. 17
-----	-----	-----	-----