

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

第2868084号

(45)発行日 平成11年(1999) 3月10日

(24)登録日 平成10年(1998)12月25日

(51)Int.Cl.⁶
G 0 2 F 1/35

識別記号

F I
G 0 2 F 1/35

請求項の数5 (全 7 頁)

(21)出願番号	特願平9-133407	(73)特許権者	000004237 日本電気株式会社 東京都港区芝五丁目7番1号
(22)出願日	平成9年(1997)5月23日	(72)発明者	上野 芳康 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
(65)公開番号	特開平10-319448	(72)発明者	田島 一人 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
(43)公開日	平成10年(1998)12月4日	(72)発明者	中村 滋 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
審査請求日	平成9年(1997)5月23日	(74)代理人	弁理士 後藤 洋介 (外1名)
		審査官	津田 俊明

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 波長変換器

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】 非線形屈折率変化を起こす導波路、光分岐部と光合波部からなる光干渉回路、光遅延回路、及び連続光光源を備える波長変換器において、光遅延回路に設けられた光路差を L_d 、入力信号パルス間隔を T 、信号パルス光の遅延回路中の進行速度を v_g としたとき、 $L_d = v_g \cdot T / 2$ の関係を満たすことを特徴とする波長変換器。

【請求項2】 前記導波路において $n/2$ 以上の屈折率変化を発生し、入力信号パルスの整数倍の周波数を持つ信号パルスを出力することを特徴とする請求項1記載の波長変換器。

【請求項3】 請求項1及び2のいずれかに記載の波長変換器において、前記光干渉回路及び光遅延回路の少なくとも一方は半導体導波路、石英導波路及び光ファイバ

2

のいずれかにより構成されていることを特徴とする波長変換器。

【請求項4】 請求項1乃至3のいずれかに記載の波長変換器において、前記導波路は半導体光アンプであることを特徴とする波長変換器。

【請求項5】 請求項1乃至4のいずれかに記載の波長変換器において、前記導波路は電流を注入しない半導体導波路であることを特徴とする波長変換器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長多重(WDM)光通信に利用する波長変換器に関する。特に、高速なWDM光通信に利用するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、大容量光通信方式として、WDM

10

光通信が開発され始めている。WDM光通信では、信号光の波長が各通信チャネルに割り当てられるため、チャネル間で信号をやりとりするためには信号列の波長を一括して変換する必要がある。従来の光デバイスを使って信号波長を変換する場合、光信号を一旦電気信号に変換し、電気信号を異なる波長の光信号に再度変換する必要がある。

【0003】これに対して最近、電気信号へ変換することなく光信号のまま波長を変換するデバイスが研究されている。これまでに対称マッハツェンダー型やXPM型などの干渉型デバイスが提案された。対称マッハツェンダー型波長変換器は従来光スイッチとして報告されているが(S. Nakamuraら、Applied Physics Letters誌、第67巻、2445頁)、入力信号パルスと異なる波長を持つ信号パルスが出力されるので波長変換器としての機能を備えている。図1に示すように、非線形屈折率変化を起こす2台の導波路をマッハツェンダー干渉計のそれぞれのアームに配置した構成である。時刻 t_1 および時刻 $t_1 + t$ に t よりも充分短いパルス幅の信号パルスを入力すると、時刻 t_1 に立ち上がって時刻 $t_1 + t$ に立ち上がる光パルスが出力される。また、光遅延回路の設け方だけが異なる波長変換器を本願発明人の中村が発明している(特開平7-199240)。

【0004】XPM型波長変換器は、入力信号パルスとほぼ同じパルス幅の光パルスを出力する点で動作原理が異なる(T. Durhuusら、Journal of Lightwave Technology誌、第14巻、942頁)。しかし、非線形屈折率変化を起こす2台の導波路をマッハツェンダー干渉計のそれぞれのアームに配置する点は上記の対称マッハツェンダー型波長変換器と同じである。

【0005】**【発明が解決しようとする課題】**これらの波長変換器の課題は、出力信号パルスが大きな波長チャーピングを起こすことである。波長チャーピングの原因は、導波路の非線形屈折率変化が信号パルス光の位相を変化させるためである。XPM型波長変換器の波長チャーピングについては、Durhuusらが上記文献で実例を報告している。

【0006】本発明の第1の目的は、波長チャーピングを起こさない波長変換器を提供することにある。

【0007】本発明の第2の目的は、波長チャーピングが無く、かつ、入力信号パルスの整数倍の周波数を持つ信号パルスを出力する波長変換器を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】上記のような課題を解決するため、本発明の第1の波長変換器は、非線形屈折率変化を起こす導波路、光分岐部と光合波部からなる光干

渉回路、光遅延回路、及び連続光(以下、CW光)光源からなり、光遅延回路に設けられた光路差(L_d)が $L_d = v_g T / 2$ (T は入力信号パルス間隔、 v_g は信号パルス光の遅延回路中の進行速度)の関係を満たすことを特徴とする。

【0009】本発明の第2の波長変換器は、第1の波長変換器の非線形導波路において > 2 以上の屈折率変化を発生することを特徴とする。

【0010】本発明の波長変換器の基本的な作用は、波長変換器内部を2つに分岐して進行する2種類のCW光の位相の時間変化を制御し、それらを干渉させて出力パルス信号を発生させる際に波長チャーピングを相殺することにある。

【0011】

【発明の実施の形態】まず、本発明の第1の実施の形態である第1の波長変換器について説明する。図1に、1例として対称マッハツェンダー型波長変換器の構成図を示す。非線形屈折率を起こす2台の導波路(以下、非線形導波路1及び非線形導波路2)、分岐部3と合波部4からなる光干渉回路、入力ポート6へCW光を入力するCW光源7(波長 λ_1)、を備える。光干渉回路と光遅延回路は、半導体導波路で形成しても良いし、石英導波路、光ファイバー等を使って構成することもできる。図1では、波長 λ_1 の入力信号パルス(パルス幅 T)を波長 λ_2 に変換するものとした。

【0012】時刻 t_1 に信号入力ポート5に入る信号パルスは、まず分岐8で2つに分岐される。一方の信号パルスは、チャンネル9を通過して非線形導波路1に到達する。到達する時刻は、 $t_1 + T^p_1$ (T^p_1 :信号パルスが信号入力ポート5から非線形導波路1へ到達するのに要する時間)である。もう一方の信号パルスは、チャンネル10を通過して時刻 $t_1 + T^p_2$ に非線形導波路2に到達する。これら2つのチャンネルは光遅延回路を兼ねており、光路差 L_d によって遅延時間、 $t = T^p_2 - T^p_1 = L_d / v_g$ を決める。入力信号パルスは、それぞれ時刻 $t_1 + T^p_1$ および $t_1 + T^p_2 = t_1 + T^p_1 + t$ に、それぞれ非線形導波路1および非線形導波路2の屈折率を変化させる。

【0013】非線形導波路の屈折率の時間変化を図2(a)に示す。ここでは、非線形導波路を半導体光アンブとする。パルス幅 T のパルスの中心が時刻 $t_1 + T^p_1$ に到着すると、導波路の屈折率がおおよそ $t_1 + T^p_1 - T/2$ から $t_1 + T^p_1 + T/2$ にかけて増加し、その後減少する。この屈折率変化は、図2(b)に示す導波路中キャリア密度の変化によって起きる(バンドフィリング効果と呼ばれる)。

【0014】まず、信号パルスの光増幅に伴ってキャリアが発光再結合し、キャリア密度が減少する。次に、光アンブへの電流注入が光増幅後のキャリア密度を回復(増加)させる。図2(a)に示した屈折率変化の結

果、非線形導波路を通過するCW光の位相は図2(c)のように変化する。

【0015】以上、半導体光アンプを非線形導波路の一例として説明したが、非線形導波路は電流を注入しない半導体導波路(以下、光吸収型導波路)でもよい。この場合、信号パルスが導波路で吸収されてキャリア密度が増加し、その後減少するので、屈折率変化(a)、キャリア密度変化(b)、位相変化(c)の全ての符号が反転する。キャリア密度の増加時間は信号パルス幅(T)で決まり、減少時間はキャリアの発光再結合及び非発光再結合によって定まる時間で決まる。

【0016】従来の波長変換器では T' は T よりも遙かに長いとしていたが、本発明の波長変換器ではキャリア密度の回復に要する時間(T')は信号パルス幅(T)に等しくなるよう設計する。従来は、パルス幅としてモードロックレーザーパルスのパルス幅(10ps以下)を想定し、キャリア密度の回復には半導体中のキャリア寿命(100ps-10ns程度)相当の時間がかかるとしていた。従来のように信号パルスの繰り返しパルス幅の逆数(1/T)よりも遙かに遅い場合、キャリア密度の回復には半導体中のキャリア寿命(100ps~10ns程度)相当の時間がかかる。しかし、本発明では信号パルスの繰り返しパルス幅が1/Tに近いものとした。光アンプへ高繰り返し信号パルスを入力する場合、光増幅動作の障害となるレーザー発振が抑制されるので大きな電流注入を行うことができ、T = T' が可能である。光吸収導波路の場合も、高繰り返し信号パルスを入力すると平均キャリア密度が上昇するためキャリアの発光・非発光再結合時間が速くなり、T = T' *

$$E_1(t) = \bar{E}_0 \exp(-i\phi_1) = \bar{E}_0 \exp(-i\Delta\omega_e t) + \phi_b$$

【0020】

【数2】

$$E_2(t) = \bar{E}_0 \exp(-i\phi_2) = \bar{E}_0 \exp(i\Delta\omega_e t)$$

。が波長チャーピングに相当し、位相シフト量。 = 。 Tである。これらが干渉すると、次の数3で表わされる電界強度E_int をもち、図3の最下段に示すような出力パルスが生成する。

【0021】

【数3】

$$E_{int} = E_2(t) + E_2(t) = 2 \bar{E}_0 \sin(\Delta\omega_e t)$$

電界強度がsin関数で表されることから、この出力パルス電界は波長チャーピングが無い。すなわち、干渉前の波長チャーピング。が相殺された。数3では、簡単のため、t_1 + T^p_1 + T^o_1 - T/2を時間の原点とした。バイアス位相(φ_b)が。となるよう、干渉アームの光路長差を設計している。図では省略したが、干渉アームの一方に位相変調器を挿入し、光路長差

*が可能となる。

【0017】次に、対称マツハツェンダー型波長変換器へ入力する波長λ_2のCW光の働きを説明する(図1)。入力ポート6から入ったCW光は分岐部3で分岐し、それぞれ非線形導波路1及び非線形導波路2を通過し、合波部4で干渉し、出力ポート11から出る。分岐部3で分岐したCW光の2つの成分が合波部4で十分に干渉するためには、合波部4に殆ど同時に到着することが重要なことが知られている。分岐したCW光の2つの成分は、非線形導波路にも同時に到着するものとする。非線形導波路1に到達したCW光の位相変化は、すでに図2(c)に示した。非線形導波路2に到達するCW光位相は、tだけ遅れて変化する。本発明では、L_d = v_g T / 2としているので、t = T / 2の関係を充たす。

【0018】2つに分岐したCW光がそれぞれ2台の非線形導波路で位相変化を受けた後に再び合波部4に到着した際(干渉する直前)の位相φ_1、φ_2を図3に示す。4つの2値信号パルス"1101"を入力した場合について示した。t_1 + T^p_1 + T^o_1 - T/2からt_1 + T^p_1 + T^o_1 + T/2にかけて(図では簡単のためt_1 + T^p_1 + T^o_1をt_1と記した、T^o_1:パルスがWG1からY2まで到達するのに要する時間)、φ_1とφ_2の時間変化は符号が反転する。それぞれのCW光電界強度E_1(t)及びE_2(t)は、次の数1及び数2で表わされる。

【0019】

【数1】

を波長オーダの厳密さで安定に制御する。なお、図中の出力ポート12は、余剰なCW光を捨てるための出力ポートである。干渉が打ち消し合ってCW光が出力ポート12へ出ない場合に、余剰なCW光が入力ポート方向へ反射することを避けるために設けてある。また、図中の波長フィルタ13は、入力信号パルスを除去するために設けてある。波長フィルタの代わりに偏光フィルタを用いることもできる。非線形導波路として吸収型導波路を用いる場合は、入力信号パルスが非線形導波路に吸収されるのでフィルタは不要である。

【0022】以下、本発明の代表的な動作条件の例をいくつか示す。非線形導波路の1例は、0.8-1.0eV程度のバンドギャップエネルギーを持ち、厚さが20nm~100nm程度のバルク活性層を備える半導体光アンプである。利得ピーク波長は1.3~1.5μm、最大利得=10~30dB、パルス利得飽和エネルギー=1-50pJ、とする。活性層とクラッド層材料の1例を挙げると、それぞれIn_0.63Ga_0.37As_0.80P_0.20とInPである。In_0.63Ga_0.37As_0.80P_0.20

はInP基板に格子整合し、およそ0.8eVのバンドギャップ(波長1.5μm相当)を持つ。非線形導波路としてこの他、量子井戸活性層を備える半導体光アンプ、吸収型バルク活性層導波路(活性層厚さは20nm~100nm程度)、吸収型量子井戸活性層導波路、を用いてもよい。非線形導波路の活性層がバルクの場合、7pJ程度を入力信号パルスエネルギーで程度の位相シフトが起きることが吸収型AlGaAs/GaAs導波路で報告されている(上述の、S. Nakamura*

(吸収型非線形導波路に必要な入力パルスエネルギー)

(パルス利得)

となり、パルス利得が20dBの場合は10fJ~500fJである。また、半導体光アンプの活性層が量子井戸の場合は、0.5~5.0pJ程度を入力パルスエネルギーが必要なことが報告されている(中村他、1996年秋季応用物理学学会学術講演会予稿集、No.3、講演番号9a-ZV-1)。これは、同様な量子井戸活性層を持つ吸収型導波路では5~500pJに相当し、吸収型バルク活性層の場合よりも大きなエネルギーを必要とする場合がある(上野他、「スペクトルホールバーニング解消に伴うバンドフィリング屈折率変化の増大」、1997年春季応用物理学学会学術講演会、発表番号29p-NC9)。このように、動作に必要な入力信号パルスエネルギーは非線形導波路の構造と動作特性に依存するものの、報告や商品化されているあらゆる半導体光アンプや半導体導波路を本発明の波長変換器に用いることが可能である。

【0024】以下、図2(b)に示したキャリア密度変化の制御方法の具体例について述べる。t₁+T^p₁+T^o₁-T/2からt₁+T^p₁+T^o₁+T/2の間の光アンプ内部キャリア密度の減少量(吸収型導波路ならば増加量)の制御は、入力パルスエネルギーによって行う。キャリア密度を線形に時間変化させるには、入力パルス波形は矩形であることが望ましい。一方、t₁+T^p₁+T^o₁+T/2からt₁+T^p₁+T^o₁+3T/2の間の光アンプ内部キャリア密度の増加量は、注入電流量によって制御する。Tの時間に注入されるキャリアの数は次の数5で表わされる。

【0025】

【数5】

$$\Delta N_{IN} = I_{op} \Delta T / q$$

一方、数3に示したように、本発明の波長変換器の信号変換効率は位相シフト量(φ = ω_c T)がπ/2の時に最大となる。π/2位相シフトに必要なキャリア

$$\Delta N_{Decay} = N_0 \{1 - \exp(-\Delta T / \tau_c)\}$$

$$= N_c V \{1 - \exp(-\Delta T / \tau_c)\} \approx N_c V \Delta T / \tau_c$$

*ら、Applied Physics Letters 誌、第67巻、2445頁)。InGaAsPバルク活性層からなる吸収型導波路を用いた場合も、1pJ~50nJ程度のエネルギーが必要である。一方、バルク活性層光アンプを用いれば光増幅動作によってキャリア密度が大きく変化するので、シフトに必要な入力パルスエネルギーはおよそ次の数4

【0023】

【数4】

ア数変化 ΔN_{π/2} は、吸収型導波路で 位相シフトに必要な入力パルスエネルギー P を使って次の数6で表わされる。

【0026】

【数6】

$$\Delta N_{\pi/2} = P_{\pi} / 2 q \hbar \omega$$

20 I_{op} は注入電流、qは素電荷、qħ は光子エネルギー(波長が1.55μmの場合、0.8eV)とした。

N_{in} = N_{π/2} として数5と数6から π/2位相シフトに必要な注入電流 I_{op}^{π/2} を求めると、次の数7となる。

【0027】

【数7】

$$I_{op}^{\pi/2} = N_{\pi} / 2 \hbar \omega \Delta T$$

一例として、P = 10pJ、T = 10ns(繰り返し周期 T_n = 2Tから、信号パルス繰り返し周波数 = 50Gb/s相当)、ħ = 0.8eV(波長が1.55μmの場合)の場合に π/2位相シフトの回復に必要な注入電流 I_{op}^{π/2} は、550mAである。π/2の位相シフトは必ずしも必要ではない。位相シフト量を π/20とすると、π/2位相シフトの場合に比べて信号変換効率が sin²(π/20) = 2.4%に低下するが、動作に必要な注入電流と入力信号パルスエネルギーを1/10倍に低減できる。この場合も、数1と数2に従って波長チャーピングは相殺される。

30 【0028】吸収型光導波路を用いた場合、t₁+T^p₁+T^o₁+T/2からt₁+T^p₁+T^o₁+3T/2の間のキャリア密度の減少は、導波路材料中の光励起キャリアの寿命(τ_c)によって決まり、次の数8で表わされる。

【0029】

【数8】

ここで、 N_0 は導波路中の平均キャリア数、 N_c は平均キャリア密度、 V は光吸収によって励起されるキャリアの平均体積（上述したように信号パルスの繰り返しが多い場合、活性層の体積に相当する）とした。ここで、

$$\Delta N_{\text{Decay}}(t) = N_c V \{1 - \exp(-t/\tau_c)\} \approx N_c V \times t/\tau_c$$

光アンプの場合と同様にほぼ時間に対して線形な変化を起こす。以下、 $\pi/2$ 位相シフトに必要なキャリア寿命の 1 例を $N_{\text{Decay}} = N_c/2$ から求める。 $N_c = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $P = 10 \text{ pJ}$ 、 $T = 1 \text{ ps}$ 、 $h\nu = 0.8 \text{ eV}$ とし、活性層の寸法は、厚さ 50 nm 、幅 $5 \text{ }\mu\text{m}$ 、長さ $500 \text{ }\mu\text{m}$ とすると、 $\tau_c = 340 \text{ ps}$ である。導波路中のキャリア寿命は、静電界の印加、不純物ドーピング、イオン注入、低温成長、平均キャリア密度等によって制御できる。本実施の形態では、 10 kV/cm 程度の静電界を印加し、キャリアを掃き出した（S. Nakamuraら、Applied Physics Letters 誌、vol. 62, no. 9, pp. 925 - 927, 1993）。

【0031】以上の第 1 の実施の形態ではマッハツェンダー型波長変換器について記したが、本発明の方法は同等な動作原理に基づく他の波長変換器に適用することも可能である。例としては、前述の中村の発明（特開平 7 - 199240）、偏光分離型マッハツェンダー型波長変換器（K. Tajimaら、Applied Physics Letters 誌、vol. 67, pp. 3709 - 3711, 1995 年）やその変形である UNI 型波長変換器（N. S. Patelら、IEEE Photonics Technology Letters 誌、vol. 8, pp. 1695 - 1697, 1996 年）、等がある。

【0032】次に、本発明の第 2 の実施の形態である第 2 の波長変換器について説明する。第 1 の波長変換器と比べて異なる点は、位相シフト量だけである。第 2 の波長変換器では、位相シフト量を π/n を $n/2$ ($n = 2, 3, \dots$) に設定する。信号パルス列（クロック信号列）を入力した場合の位相変化の例を図 4 に示す。数 3 から明らかのように、 $n = 2$ ($\pi = \pi$) の場合は入力信号パルス列の 2 倍の繰り返し周波数を持つ信号パルス列が出力される。 $\pi = n/2$ の場合は、繰り返し周波数が n 倍となる。波長変換器の構造と動作条件

* T は τ_c よりも充分短いのでキャリア密度の時間変化は近似的に次の数 9 で表わされ、

【0030】

【数 9】

は、第 1 の波長変換器で述べたものを全て用いることが可能である。入力パルスエネルギー、注入電流（光アンプの場合）、キャリア寿命（吸収型導波路の場合）を制御して、動作条件（ $\pi = n/2$ ）を設定すれば、第 2 の波長変換器が完成する。制御の方法は、第 1 の波長変換器ですでに説明した方法と同じである。

【0033】

【発明の効果】本発明の第 1 の波長変換器によれば、波長チャージングが起きない波長変換信号を出力することができる。波長チャージングの無い出力信号は、信号歪の少ない長距離伝送を行うことができる。

【0034】また、本発明の第 2 の波長変換器によれば、低周波な（つまり繰り返しが遅い）光パルス列光源

を用いて高周波な光パルス列を生成することができる。

【0035】以上、本発明を実施の形態に基づいて説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、当業者の通常の知識の範囲内でその変更や改良が可能であることは勿論である。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の基本構成を示す構成図である。

【図 2】本発明の作用を示す説明図である。

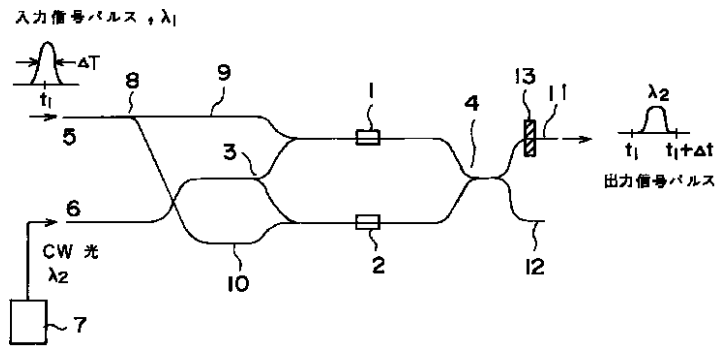
【図 3】本発明の作用を示す説明図である。

【図 4】本発明の作用を示す説明図である。

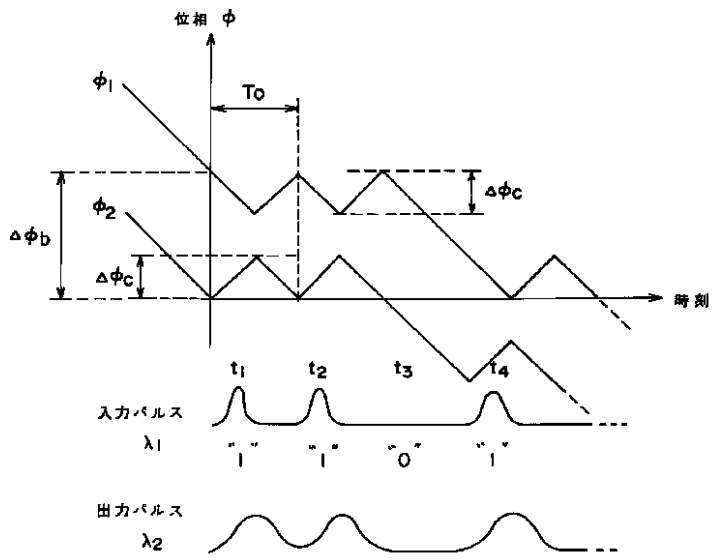
【符号の説明】

- 1 非線形導波路
- 2 非線形導波路
- 3 光分岐部
- 4 光合波部
- 5 信号パルスの入力ポート
- 6 CW光の入力ポート
- 7 CW光光源
- 8 信号パルスの分岐部
- 11 信号パルスの出力ポート
- 12 出力ポート
- 13 波長フィルタ

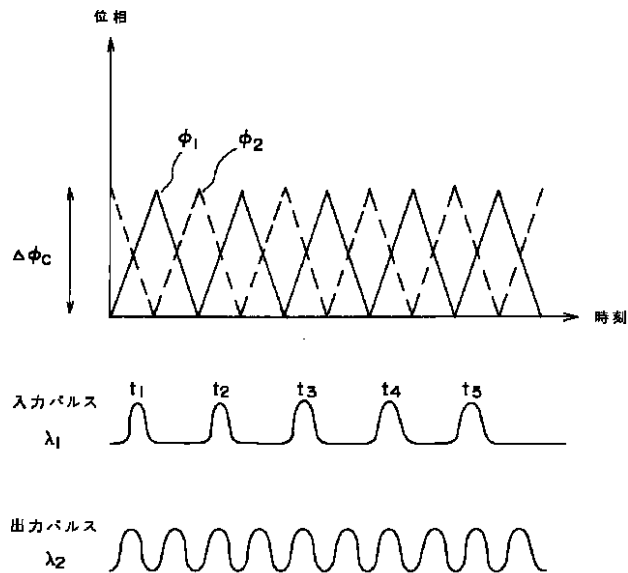
【図 1】



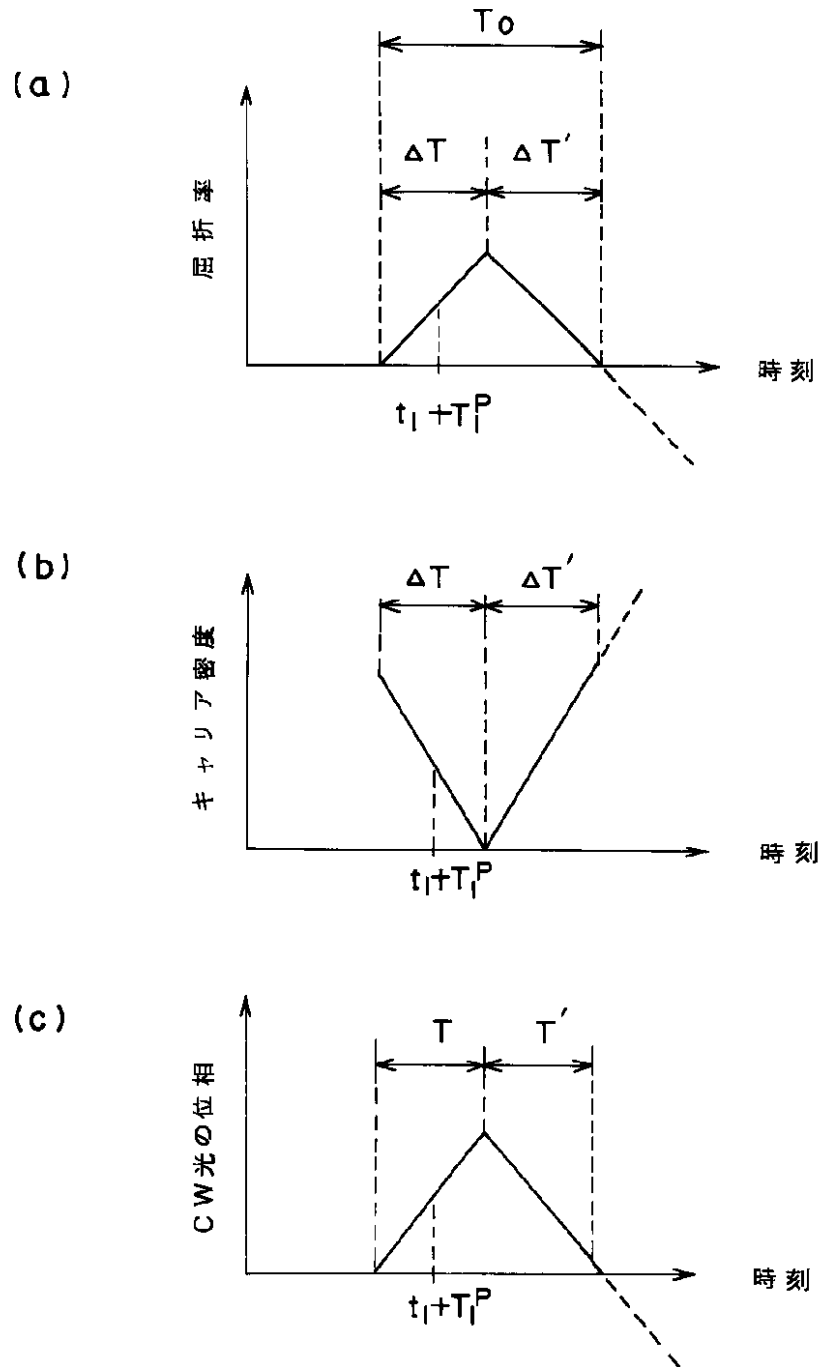
【図 3】



【図 4】



【図 2】



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.⁶, D B名)

G02F 1/35

G02F 2/02

G02F 1/025