

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

特許第3314772号
(P3314772)

(45)発行日 平成14年 8月12日(2002. 8. 12)

(24)登録日 平成14年 6月 7日(2002. 6. 7)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

G 0 2 F 1/01
H 0 1 S 5/50
H 0 4 B 10/00
H 0 4 J 14/08

6 1 0

G 0 2 F 1/01 F
H 0 1 S 5/50 6 1 0
H 0 4 B 9/00 D
B

請求項の数25(全 30 頁)

(21)出願番号 特願平11-348269
(22)出願日 平成11年12月 8日(1999. 12. 8)
(65)公開番号 特開2001-142035(P2001-142035A)
(43)公開日 平成13年 5月25日(2001. 5. 25)
審査請求日 平成11年12月 8日(1999. 12. 8)
(31)優先権主張番号 特願平11-246843
(32)優先日 平成11年 9月 1日(1999. 9. 1)
(33)優先権主張国 日本 (J P)

(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
(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
(74)代理人 100088812
弁理士 ▲柳▼川 信

審査官 田部 元史

(56)参考文献 特開 平 2 -126243 (J P, A)
米国特許5050183 (U S, A)
米国特許5911015 (U S, A)
米国特許5926492 (U S, A)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光パルス発生装置及びそれを用いた光クロック抽出装置と光クロック分周装置と光クロック抽出分周装置

1

2

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】 特定のパルス幅と繰返し周波数と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置であつて、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを有することを特徴とする光パルス発生装置。

【請求項 2】 前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイとを少なくとも含むことを特徴とする請求項 1記載の光パルス発生装置。

【請求項 3】 前記周回光導波路は、遅延時間が前記遅

延干渉器の遅延時間よりも長くかつ出力パルス間隔に等しい第 2の遅延干渉器を含むことを特徴とする請求項 2記載の光パルス発生装置。

【請求項 4】 前記周回光導波路は、ループ状をなすことを特徴とする請求項 1から請求項 3のいずれか記載の光パルス発生装置。

【請求項 5】 前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器を第 1の末端としかつ 1組の全反射ミラーを第 2の末端として構成され、光パルスが前記第 1の末端と前記第 2の末端との間を往復するようにしたことを特徴とする請求項 1から請求項 3のいずれか記載の光パルス発生装置。

【請求項 6】 前記周回光導波路は、光パルスと同時に前記半導体光増幅器を通過する連続光の強度を変調する光強度変調器と、前記連続光の位相を変調する光位相変

10

調器とのうちの少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 5 のいずれかが記載の光パルス発生装置。

【請求項 7】 前記周回光導波路は、周回損失をゼロにするための光ファイバ型光増幅器を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれかが記載の光パルス発生装置。

【請求項 8】 特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック抽出装置であって、

前記光パルス発生装置は、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを有し、

前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が前記遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力信号パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、信号光を入力するための信号光入力ポートとを少なくとも有することを特徴とする光クロック抽出装置。

【請求項 9】 前記周回光導波路は、ループ状をなすことを特徴とする請求項 8 記載の光クロック抽出装置。

【請求項 10】 前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器を第 1 の末端としかつ 1 組の全反射ミラーを第 2 の末端として構成され、光パルスが前記第 1 の末端と前記第 2 の末端との間を往復するようにしたことを特徴とする請求項 8 記載の光クロック抽出装置。

【請求項 11】 前記周回光導波路は、光パルスと同時に前記半導体光増幅器を通過する連続光の強度を変調する光強度変調器と、前記連続光の位相を変調する光位相変調器とのうちの少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項 8 から請求項 10 のいずれかが記載の光クロック抽出装置。

【請求項 12】 前記周回光導波路は、周回損失をゼロにするための光ファイバ型光増幅器を含むことを特徴とする請求項 8 から請求項 11 のいずれかが記載の光クロック抽出装置。

【請求項 13】 前記第 2 の遅延干渉器は、複数の遅延干渉器からなることを特徴とする請求項 8 から請求項 12 のいずれかが記載の光クロック抽出装置。

【請求項 14】 特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック分周装置であって、

前記光パルス発生装置は、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを有し、

前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が前記遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、クロック光パルス列を入力するための光クロック入力ポートとを少なくとも有することを特徴とする光クロック分周装置。

【請求項 15】 前記周回光導波路は、ループ状をなすことを特徴とする請求項 14 記載の光クロック分周装置。

【請求項 16】 前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器を第 1 の末端としかつ 1 組の全反射ミラーを第 2 の末端として構成され、光パルスが前記第 1 の末端と前記第 2 の末端との間を往復するようにしたことを特徴とする請求項 14 記載の光クロック分周装置。

【請求項 17】 前記周回光導波路は、光パルスと同時に前記半導体光増幅器を通過する連続光の強度を変調する光強度変調器と、前記連続光の位相を変調する光位相変調器とのうちの少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項 14 から請求項 16 のいずれかが記載の光クロック分周装置。

【請求項 18】 前記周回光導波路は、周回損失をゼロにするための光ファイバ型光増幅器を含むことを特徴とする請求項 14 から請求項 17 のいずれかが記載の光クロック分周装置。

【請求項 19】 前記第 2 の遅延干渉器は、複数の遅延干渉器からなることを特徴とする請求項 14 から請求項 18 のいずれかが記載の光クロック分周装置。

【請求項 20】 特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック抽出分周装置であって、

前記光パルス発生装置は、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを有し、

前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が前記遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、信号光を入力するための信号光入力ポートとを少なくとも有することを特徴とする光クロック抽出分周装置。

【請求項 21】 前記周回光導波路は、ループ状をなすことを特徴とする請求項 20 記載の光クロック抽出分周装置。

【請求項 22】 前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器を第 1 の末端としかつ 1 組の全反射ミラーを第 2 の末端として構成され、光パルスが前記第 1 の末端と前記第 2 の末端との間を往復するようにしたことを特徴とす

る請求項 20 記載の光クロック抽出分周装置。

【請求項 23】 前記周回光導波路は、光パルスと同時に前記半導体光増幅器を通過する連続光の強度を変調する光強度変調器と、前記連続光の位相を変調する光位相変調器とのうちの少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項 20 から請求項 22 のいずれか記載の光クロック抽出分周装置。

【請求項 24】 前記周回光導波路は、周回損失をゼロにするための光ファイバ型光増幅器を含むことを特徴とする請求項 20 から請求項 23 のいずれか記載の光クロック抽出分周装置。

【請求項 25】 前記第 2 の遅延干渉器は、複数の遅延干渉器からなることを特徴とする請求項 20 から請求項 24 のいずれか記載の光クロック抽出分周装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は光パルス発生装置及びそれを用いた光クロック抽出装置と光クロック分周装置と光クロック抽出分周装置に関し、特に超高速な時分割多重光通信に用いられる光パルス発生装置、光クロック抽出装置、光クロック分周装置、光クロック抽出分周装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近い将来の大容量光通信システムにおいては、160-640 Gbps 級の時分割多重光信号が利用されると考えられている。このような超高速な時分割多重光通信を行うためには、パルス幅 10 ps 以下、繰返し周波数 2 GHz 以上、波長 1300 ~ 1700 nm の超短光パルス列を発生する光パルス発生装置が必要となる。

【0003】例えば、160 Gbps の時間多重光通信を行う場合、パルス幅 1.2 ps、繰返し周波数 10 GHz の光パルス列を発生する光パルス発生装置が必要となる。1.2- ps、10- GHz の光パルス列をデジタル変調（デジタル符号化）して 10- Gbps デジタル信号光パルス列を生成し、16チャンネルの 10- Gbps デジタル信号光パルス列を時間多重すると、160 Gbps デジタル信号光パルス列となる。

【0004】これまでに数多くの超短光パルス発生装置が提案されてきている。有望な方式としては以下に述べる 3 種類の方式及びこれらの複合技術がある。第 1 の方式は光パルス圧縮を利用する光パルス発生装置である（以下、この方式を第 1 の従来例とする）。この方式ではまず、連続光を発生する半導体レーザと電気 - 光変調器 (electro-optic modulator) を用いて 10- ps 前後のパルス幅を持つ光パルスを発生する。

【0005】この方式では 10 ~ 20- GHz 程度の繰返し周波数が容易に得られる。また、この方式では Q スイッチ半導体レーザを用いて 10- ps、20- GHz の光パルスを発生することもできる。

【0006】次に、光非線形媒質と群速度分散媒質とを組合せて光パルスを圧縮すると、60 fs ~ 2 ps の光パルスが発生する。光非線形媒質としては光ファイバを用いることが多く、群速度分散媒質としては光ファイバやグレーティングを用いる。

【0007】上記のパルス圧縮については、「Jpn. J. Appl. Phys. 誌、第 35 巻、L1330 - L1332 頁、1996 年」、「Electron. Lett. 誌、第 34 巻、第 10 号、1009 頁、1998 年」、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第 11 巻、第 3 号、319 - 321 頁、1999 年」に記載されている。

【0008】第 2 の方式はモードロック半導体レーザである（以下、この方式を第 2 の従来例とする）。この方式では半導体レーザ内部に設けられた過飽和吸収体の働きによって、パルス幅 2 ps 以下、繰返し周波数 10 GHz 以上の光パルス列が発生する。

【0009】上記のモードロック半導体レーザについては、「Electron. Lett. 誌、第 31 巻、第 14 号、1165 - 1167 頁、1995 年」、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第 8 巻、第 5 号、617 - 619 頁、1996 年」に記載されている。

【0010】第 3 の方式はモードロックファーマーリングレーザである（以下、この方式を第 3 の従来例とする）。この方式ではリングレーザ共振器の一部をなす光ファイバの光非線形性と群速度分散とによって、パルス幅 2 ps 以下、繰返し周波数 10 GHz 以上の光パルス列が出力される。

【0011】上記のモードロックファーマーリングレーザについては、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第 11 巻、第 3 号、319 - 321 頁、1999 年」、「Electron. Lett. 誌、第 35 巻、第 8 号、645 - 646 頁、1999 年」に記載されている。

【0012】光クロック抽出装置及び光クロック分周装置も、上述の超高速な時分割多重光通信を行う場合に重要となる装置である。光クロック抽出装置の役割は伝送後のデジタル光信号から光クロック信号を発生することである。光クロック分周装置の役割は所定のクロック光パルス列から分周クロック光パルス列を発生することである。

【0013】従来の光クロック抽出装置やクロック分周装置は、光信号から電気信号への変換、電子回路によるクロック抽出や分周、電気信号から光信号への変換等の回路や装置を組合せて行われている（以下、この方式を第 4 の従来例とする）。

【0014】一方、最近、新しい光クロック抽出装置の方式として、モードロック半導体レーザを用いる方式が報告されている（以下、この方式を第 5 の従来例とす

る)。この方式については、「25th European Conference on Optical Communication (ECOC '99), paper PD3-6, pp. 56-57, Nice, France, Sept. 26-30, 1999」にその一例が記載されている。

【0015】最近報告されたもう1つの新しい光クロック抽出方式は、「Electron. Lett. 誌、第35巻、第16号、1368-1370頁、1999年」に記載されている(以下、この方式を第6の従来例とする)。

【0016】この方式の光クロック抽出装置は、半導体光増幅器、ループ光回路、連続光光源(continuous-wave light source)、バンドパス波長フィルタ等からなる。この方式の光クロック抽出装置では半導体光増幅器と連続光光源(continuous-wave light source)とバンドパス波長フィルタとからなる全光波長変換器の作用が利用されている。この報告の動作例では、10-Gbps デジタル信号光(Return-to-Zero 信号、パルス幅約25ps)から10-GHz 光クロックが抽出されている。

【0017】一方、最近、3つの新しい光クロック分周方式が報告されている。この光クロック分周方式としては、「Opt. Comm. 誌、第157巻、45-51頁、1998年」に記載された方式(以下、この方式を第7の従来例とする)と、「Electron. Lett. 誌、第35巻、第10号、827-829頁、1999年」に記載された方式(以下、この方式を第8の従来例とする)と、IEEE PTL 誌、第11巻、第4号、469-471頁、1999年」に記載された方式(以下、この方式を第9の従来例とする)とがある。これらの光クロック分周装置は半導体光増幅器を利用する、いわゆる全光スイッチとループ光回路とを含み、連続光光源を含まない。

【0018】

【発明が解決しようとする課題】上述した従来の光パルス発生装置では、第1の従来例の場合、装置の小型化が困難であるという問題がある。パルス圧縮を行うためには10m以上の光ファイバが必要であり、短い光ファイバを用いてパルス圧縮を行うと、光パルス波形が乱れたり、SNが劣化する等の問題が発生する。

【0019】一般に、パルス圧縮器の入力パワーが大きいと、パルス圧縮器に必要な光ファイバの長さが短縮する。しかしながら、この場合には大出力な光ファイバ増幅器が必要となり、大出力光ファイバ増幅器は10m以上のErドープ光ファイバを備える。従って、いずれの場合においても、装置の小型化が困難である。

【0020】また、第1の従来例で電気-光変調やQスイッチングを行うためには、周波数が2-40GHzと高

く、周波数精度が高くかつパワーが大きな高周波電気信号入力(クロック入力)が必要である。

【0021】第2の従来例の場合には、現在までのところ、モードロック半導体レーザの長期安定動作信頼性が確立していないという問題がある。また、第2の従来例では繰返し周波数を通信信号周波数規格に厳密に一致させる技術や複雑なレーザ構造を安定に量産する製造工程の確立も課題となっている。

【0022】さらに、モードロック半導体レーザを動作させるには周波数が2-40GHzと高く、周波数精度が高くかつパワーが大きな高周波電気信号入力(クロック入力)が必要である。

【0023】第3の従来例の場合には、第1の従来例と同様に、装置の小型化が困難であるという問題がある。リングレーザ共振器に十分な光非線形性を与えるためには、10m以上の光ファイバが必要となる。また、第3の従来例ではリングレーザ共振器にレーザ利得を与えるため、10m以上のErドープ光ファイバも必要である。

【0024】さらに、第3の従来例では光パルスの波長がErドープ光ファイバの利得帯域(1530-1560nm)に制限されるので、波長多重度や光パルス幅が制限されるという問題がある。第3の従来例では信号光パルスのパルス幅が狭くなると、より広い波長帯域が必要である。

【0025】近年、Erと異なる波長領域に利得を持つ希土類金属をドープした光ファイバが実用化されつつあるが、個々の利得帯域は半導体の利得帯域よりも狭い。また、モードロックファーバーリングレーザを動作させるためには、周波数が2-40GHzと高く、周波数精度が高くかつパワーが大きな高周波電気信号入力(クロック入力)が必要である。

【0026】従来の光クロック抽出分周装置の1つである第4の従来例では、クロック抽出や分周に要する時間が長く、パルス幅の短い光クロックを生成することが難しく、装置構成が大規模・複雑になるという問題がある。

【0027】従来の光クロック抽出装置の1つである第5の従来例では、クロック抽出や分周に要する時間がかなり長いという問題がある。また、第5の従来例では上述した第2の従来例における長期安定動作信頼性、製造技術等も問題になっている。

【0028】従来の光クロック抽出装置の1つである第6の従来例では、連続光が半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)を通過する方向と光パルスが半導体光増幅器を通過する方向とが逆方向(いわゆる、counter-propagation configuration)となっているため、パルス幅の短い光クロックを生成できない(したがって、繰返し周波数の高い光クロックを生成できない)という問題がある。

【0029】光パルスが半導体光増幅器を通過する時間を T_{tr} とすると、第6の従来例の光クロック抽出装置はパルス幅が T_{tr} 以下の短い光パルスを生成することが困難である。800- μm 程度の長さの半導体光増幅器を用いた第6の従来例の報告では、通過時間が $T_{tr} = 8\text{ps}$ である。したがって、25-ps、10-GHz 程度の光クロックを生成することはできても、100-GHz 以上の光クロック (パルス幅 $< 2\text{ps}$) を生成することはきわめて困難となる。

【0030】また、第6の従来例ではフーリエ変換限界に近い良質な光クロックパルスを効率よく生成することが難しいという問題がある。フーリエ変換限界に近い光パルスを生成するためには、内部のバンドパス波長フィルタの帯域を狭くする必要がある。

【0031】しかしながら、バンドパス波長フィルタの帯域を狭くすると、光パルス生成効率 (全光スイッチとしての透過率) が低下する。バンドパス波長フィルタの帯域を広げて生成効率を改善すると、光パルスがフーリエ変換限界から離れてしまう。これは半導体光増幅器から相互位相変調と相互利得変調とを同時に受けた連続光のスペクトルが広いスペクトル領域にわたってチャープしているためである。

【0032】第7の従来例では、第6の従来例と同様に、半導体光増幅器を通過する2種類の光パルス (入力光パルス及び分周クロックパルス) が半導体光増幅器内部を逆方向に進行する (counter-propagation configuration) ため、パルス間隔が狭い高速な (繰返し周波数の高い) 光クロックを処理することができないという問題がある。第7の従来例では、分周できる入力光クロックが、パルス間隔が半導体光増幅器を通過する時間 T_{tr} より十分大きいものに限られる。

【0033】また、第7の従来例では、入力クロック光パルス列の各光パルスが持つジッタ (位相雑音) を取り除く作用を持たないという問題がある。さらに、第7の従来例では、文献の記載を見る限り、生成できる分周クロックの分周比が2に限られ、3以上の分周クロックの生成が記載されていないことである。

【0034】さらにまた、第7の従来例では、「IEEE PTL 誌、第11巻、第4号、469-471頁、1999年」に記載されているように、分周動作特性が入力光信号の偏光方位に強く依存するという問題がある。

【0035】第8の従来例では、入力クロック光パルス列の各光パルスが持つジッタ (位相雑音) を取り除く作用を持たず、3以上の分周比の分周クロックを生成できず、装置が偏光子を備えるために動作特性が入力光信号の偏光方位に強く依存するという問題がある。

【0036】第9の従来例では、第7の従来例と同様に、パルス間隔が狭い高速な (繰返し周波数の高い) 光

クロックを処理することができず、ジッタ (位相雑音) を取り除く作用を持たず、3以上の分周比の分周クロックを生成することができないという問題がある。

【0037】また、第9の従来例では、第6の従来例のクロック抽出装置と同様に、フーリエ変換限界特性と効率とのトレードオフ関係にあるため、フーリエ変換限界に近い良質な光クロックパルスを効率よく生成することが難しいという問題がある。

【0038】第9の従来例の分周クロックパルスのスペクトルは、半導体光増幅器から受けた自己位相変調と自己利得変調とによって広いスペクトル領域にわたってチャープする。フーリエ変換限界に近い良質な光クロックパルスを生成するためには、第6の従来例と同様に、バンドパス波長フィルタの帯域を狭くしなければならない。この場合、バンドパス波長フィルタの帯域を狭くすると動作効率が低下し、バンドパス波長フィルタの帯域を広げると分周クロックパルスのフーリエ変換限界特性が劣化する。

【0039】そこで、本発明の第1の目的は上記の問題点を解消し、小型で波長帯域が広くかつ長期安定動作信頼性と量産製造方法とを兼ね備え、光パルス発生器が必要とする高周波電気信号入力 (クロック入力) のパワーが比較的小さくてよい光パルス発生装置を提供することにある。

【0040】本発明の第2の目的は、繰返し周波数が高く、パルス幅が短く、フーリエ変換限界に近い光クロックパルスを高速に生成することができる光クロック抽出装置を提供することにある。

【0041】本発明の第3の目的は、高速光クロックを高速に処理することができ、入力光クロックパルスのジッターを除去する作用と必要に応じた分周比の分周作用とを有することができるとともに、フーリエ変換限界に近い分周光クロックを効率よく出力することができる光クロック分周装置を提供することにある。

【0042】本発明の第4の目的は、高速かつ高性能なクロック抽出とクロック分周とを一括して同時に行うことができる光クロック抽出分周装置を提供することにある。

【0043】

【課題を解決するための手段】本発明による光パルス発生装置は、特定のパルス幅と繰返し周波数と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置であって、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを備えている。

【0044】本発明による光クロック抽出装置は、特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック抽出装置であって、前記光

パルス発生装置は、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを備え、前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が前記遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力信号パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、信号光を入力するための信号光入力ポートとを少なくとも備えている。

【0045】本発明による光クロック分周装置は、特定のパルス幅と波長を持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック分周装置であって、前記光パルス発生装置は、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを備え、前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が前記遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、クロック光パルス列を入力するための光クロック入力ポートとを少なくとも備えている。

【0046】本発明による光クロック抽出分周装置は、特定のパルス幅と波長を持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック抽出分周装置であって、前記光パルス発生装置は、連続光を出力する連続光光源と、前記連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器からの前記光パルス列と前記連続光と前記自然放出光とを周回させる周回光導波路とを備え、前記周回光導波路は、前記半導体光増幅器からの前記連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、前記遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が前記遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、信号光を入力するための信号光入力ポートとを少なくとも備えている。

【0047】すなわち、本発明の光パルス発生装置は、特定のパルス幅と繰り返し周波数と波長を持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置において、連続光を出力する連続光光源と、連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、半導体光増幅器からの連続光及び自然放出光を周回する周回光導波路とを備え、当該周回光導波路は半導体光増幅器からの連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、出力用カブラ等とを備え、光パルス列を周回させてい

る。

【0048】これによって、10m以上と長い非線形光ファイバや希土類ドープ光ファイバを含まないので、従来の光パルス発生装置よりも小型化することが可能となる。また、光パルス発生装置の周波数を同期させる際に必要なクロック入力（電気信号）パワーを従来の光パルス発生装置よりも小さくすることが可能となる。

【0049】また、本発明による光クロック抽出装置は、上述した光パルス発生装置を備え、周回光導波路が信号光入力ポートを備え、第 2 の遅延干渉器の遅延時間が入力信号光パルス間隔の整数倍に等しいようにしている。

【0050】さらに、本発明による光クロック分周装置は、上述した光パルス発生装置を備え、周回光導波路が光クロック入力ポートを備え、第 2 の遅延干渉器の遅延時間が分周クロックパルス間隔の整数倍に等しいようにしている。

【0051】さらに、本発明による光クロック抽出分周装置は、上述した光パルス発生装置を備え、周回光導波路が信号光入力ポートを備え、第 2 の遅延干渉器の遅延時間が分周クロックパルス間隔の整数倍に等しいようにしている。

【0052】

【発明の実施の形態】次に、本発明の実施例について図面を参照して説明する。図 1 は本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。図 1 において、本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置は周回光導波路や連続光光源 8 等を備えている。

【0053】本実施例の周回光導波路は半導体光増幅器（SOA: Semiconductor Optical Amplifier）1 と、遅延干渉器（MZI）2, 7 と、バンドパス波長フィルタ 3 と、ポーラライザ 4 と、偏光制御器 5 と、時間ディレイ 6 と、アイソレータ 11 と、合波器 13, 16, 17 と、分波器 14, 15, 18 とを含んで構成されている。

【0054】遅延干渉器 2 は少なくとも光位相調整器を備えており、当該光位相調整器はいずれかのアームに設けられている。遅延干渉器 7 は少なくとも時間ディレイを備えており、当該時間ディレイはいずれかのアームに設けられている。連続光光源 8 が発生する連続光は偏光制御器 9 と、アイソレータ 10 と、合波器 13 とを経て、周回光導波路に入力される。周回光導波路内部に発生した光パルスは分波器 14 を経て出力ポート 12 に出力される。

【0055】半導体光増幅器 1 は InGaAsP 利得領域が InP クラッドに囲まれた断面構造を持つ。半導体光増幅器 1 のパラメータは 2.5、波長 1520 ~ 1590 nm における非飽和利得は 28 dB 以上、利得ピーク波長は 1550 nm、パルス飽和エネルギーは 180 fJ、キャリア寿命は 60 ps、注入電流は 400 mA である。

【0056】尚、半導体光増幅器1としてはこれまでに報告されている他の様々なタイプのものを利用することができる。すなわち、半導体光増幅器1としては、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第7巻、第2号、147-148頁、1995年」、「Electron. Lett. 誌、第33巻、第25号、2123-2134頁、1997年」、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第6巻、第2号、170-172頁、1994年」等に記載されたものを利用することができる。

【0057】遅延干渉器2の遅延時間(周回光導波路内部を周回する光が遅延干渉器2の分波器15から第1アームを経て合波器16に達するまでに要する時間と、分波器15から第2アームを経て合波器16に達するまでに要する時間との時間差)は1.78ps、遅延干渉器2の位相差(遅延干渉器2の分波器15から第1アームを経て合波器16に達した光と、分波器15から第2アームを経て合波器16に達した光との位相差)は1.01 ~ 1.35、遅延干渉器7の遅延時間は10.0psとしており、周回光導波路を周回する光パルスの周回時間が10.0psの整数倍となるように時間ディレイ6を調整している。

【0058】また、半導体光増幅器1に入力する連続光の偏光が光パルスの偏光に対して直交するように、偏光制御器9で連続光の偏光を調整している。ポーラライザ4の偏光方位は半導体光増幅器1から遅延干渉器2までの間で新たに発生した光パルスを透過し、半導体光増幅器1で増幅された古い光パルスを遮断するように調整している。

【0059】本実施例による光パルス発生装置の出力光パルスの波長は波長フィルタ3が定める。半導体光増幅器1の利得ピーク波長、利得帯域、波長フィルタの中心波長を適宜組合せることによって、広い範囲の波長の光パルスを発生することができる。波長フィルタの透過スペクトル幅は光パルスのスペクトル幅に応じて設定する。本実施例では中心波長を1550nm、半値全幅を6nmとしている。

【0060】上述した光パルス発生装置は光パルス列を自発的に発生する。連続光を入力して半導体光増幅器1に電流を注入すると、まず半導体光増幅器1が発生する自然放出光と連続光とが周回する。これらの光が何度か周回すると、光パルスが成長し、かつ光パルスのパルス幅が縮小する。

【0061】周回する光パルスと半導体光増幅器1の動作状態とが平衡状態に達すると、一定の安定な光パルス列が周回し続ける。本実施例が発生する光パルスのパルス幅は1.5ps、パルス間隔は10.0ps(繰返し周波数100GHz)である。安定状態に達した光パルス列は以下のように周回光導波路を周回する。

【0062】光パルス(A)が半導体光増幅器1に入力されると、光パルスと同時に半導体光増幅器1を通過す

る連続光の位相と強度とが変調される。位相変調と強度変調とを受けた連続光が遅延干渉器2を通過すると、新しい1.5ps光パルス(B)が発生する。波長フィルタ3は半導体光増幅器1が出す被増幅自然放出光(ASE: Amplified Spontaneous Emission)を除去する。

【0063】波長フィルタ3を通過した光パルス(B)はポーラライザ4及び偏光制御器5等を経て、半導体光増幅器1へ戻る。半導体光増幅器1へ戻る光パルス(B)の偏光が連続光の偏光に対して直交するように、偏光制御器5で光パルス(B)の偏光を調整してある。

【0064】一方、半導体光増幅器1で増幅された光パルス(A)はポーラライザ4で除去される。半導体光増幅器1からアイソレータ11と遅延干渉器2とを経て、波長フィルタ3に至る光回路の構成及び作用は、特開平10-301151号公報、特開平10-319448号公報、特願平10-182652号の明細書、特願平10-198744号の明細書、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第10巻第3号、346-348頁、1998年」、「Opt. Lett. 誌、第23巻第23号、1846-1848頁、1998年」に記載されている波長変換器と同様である。

【0065】図2は本発明の光パルス発生装置の内部に含まれる波長変換器部分の動作を説明するための図である。この図2を参照して、半導体光増幅器1からアイソレータ11と遅延干渉器2とを経て波長フィルタ3に至る光回路によって構成される波長変換器(DISC型波長変換器)の作用について説明する。

【0066】光パルス列が半導体光増幅器1に入力すると、光パルス列が光増幅される。光パルス列が光増幅されると、その反作用として、半導体光増幅器1の内部のキャリア密度が変調される。キャリア密度の変調の結果、光パルス列と同時に半導体光増幅器1を通過する連続光の位相が変調される。

【0067】位相変調を受けた連続光はさらに遅延干渉器2に入力されると、分岐部15で2つの成分に分岐される。この場合、2つの成分は50:50に分岐され、遅延干渉器2において一方の成分に対して一定の遅延時間が与えられる。さらに2つの成分が合流部16に達すると、これらの成分が干渉を起こす。図2は遅延干渉器2を通過中の連続光の2つの成分の位相変化の一例を示しており、図2に挿入されている図は光位相の時間変化をより広い時間レンジで図示したものである。図2において、実線部分は遅延を与えられていない成分(速い成分)の位相変化を示し、破線部分は遅延を与えられた成分(遅い成分)の位相変化を示している。

【0068】上記の例では入力パルス列のパルス幅が5ps、パルス間隔が24ps、遅延干渉器2の遅延時間が7ps、2成分間の初期位相バイアスが、半導体光増

幅器 1 のキャリア寿命が 60 p s である。ここで、位相の立上り時間は入力パルス幅にほぼ等しい。位相の立下りは時間に対して直線状であり、これは上記の動作例の入力パルス間隔がキャリア寿命より十分に短く、光増幅後のキャリア密度の回復が直線状となっているためである。

【0069】図 2 に示す位相変調を受けた 2 成分は、合流部 16 で干渉を起こす。図 2 に示すように、遅い成分が立下り始めてから速い成分の位相が立下り始めるまで（図 2 においては $+10 \text{ p s}$ から $+20 \text{ p s}$ まで）の時間領域で、2 成分の位相差がおおよそ となる。

【0070】「Opt. Lett. 誌、第 23 巻第 23 号、1846 - 1848 頁、1998 年」に記載されているように、初期位相バイアスを 1.1 と最適化すると、上記時間領域における位相差が完全に となる。したがって、上記時間領域において、連続光の 2 つの成分が打ち消し合って干渉を起こす。よって、遅延干渉器 2 は速い成分の位相が立下り始めてから遅い成分が立下り始めるまで（図 2 においては -4 p s から $+10 \text{ p s}$ まで）の間だけ、連続光を透過する。

【0071】以上の結果、遅延干渉器 2 が連続光を切り取り、パルス幅（半値全幅）が $6\text{-}8 \text{ p s}$ 、パルス間隔が 24 p s の新しいパルス列（波長変換出力）を生成する。この場合、新しいパルス列の波長は連続光の波長で決まる。

【0072】図 2 に示す動作例では、遅延干渉器 2 の遅延時間と入力パルス幅とがほぼ等しい。上述した波長変換作用から明らかなように、遅延干渉器 2 の遅延時間が入力パルス幅より長い場合、新しく生成されるパルス列のパルス幅は遅延時間に近いものとなる。逆に、遅延干渉器 2 の遅延時間が入力パルス幅より短い場合、新しく生成されるパルス列のパルス幅は入力パルス幅よりも短くなる。

【0073】尚、図 2 に示す動作例の初期位相バイアスの最適値は 1.1 であり、本発明の第 1 の実施例の初期位相バイアスの最適値は 1.035 である。初期位相バイアスの最適値は光増幅による位相シフト量、遅延干渉器 2 の遅延時間、入力パルスのパルス間隔等に依存する。初期位相バイアスの最適値の見積り方法や最適状態の監視方法は、上述した「Opt. Lett. 誌、第 23 巻第 23 号、1846 - 1848 頁、1998 年」や特願平 10 - 198744 号の明細書に記載されている。

【0074】以下、本発明の第 1 の実施例の説明に戻る。周回する光パルスの一部が分波器 14 で取出され、出力ポート 12 に達する。本実施例の出力パルスのパルス幅は 1.5 p s 、繰返し周波数は 100 GHz 、平均パワーは 9 mW 、ピークパワーは 60 mW 、パルスエネルギーは 9 f J である。半導体光増幅器 1 に入力する光パルスのエネルギーは 9 f J 、連続光のパワーは 0.5 mW である。

【0075】図 3 (a) ~ (f) は本発明の第 1 の実施

例による光パルス発生装置の動作を説明するための図である。上述した光パルス列の周回が平衡状態となることを、図 3 を参照して以下に説明する。

【0076】図 3 はパルス幅の広い光パルス列 [図 3 (a)] が半導体光増幅器 1 に入力した場合の光パルス列の成長を示す。パルス幅は 4.0 p s 、パルス間隔は 10 p s としている。光パルスと連続光とが半導体光増幅器 1 や遅延干渉器 2 を通過すると、上述した波長変換器動作と同じメカニズムに従って連続光が光パルスに変換される。

【0077】新しく生成される光パルス [図 3 (b)] のパルス幅は遅延干渉器 2 の遅延時間に近いものとなる。但し、遅延時間に比べて元の光パルスのパルス幅が広いので、新しく生成される光パルスのパワーは比較的弱い。図 3 (b) に示す光パルスが 1 周目のパルスであり、半導体光増幅器 1 に戻る。

【0078】この例では 1 周目の光パルスが平衡状態よりも弱い。したがって、1 周目の光パルス列が通過している間、半導体光増幅器 1 のキャリア密度は平衡状態よりも高い。よって、2 周目の光パルスパワーは 1 周目より増大し、パルス幅はさらに縮小する。図 3 (c) ~ (f) にそれぞれ 2 周目、4 周目、8 周目、16 周目の光パルス列を示している。これらの図に示すように、周回を重ねるにしたがって、パルス幅とパワーとが平衡状態に達する。平衡状態に達したパルス列のパルス幅は 1.5 p s である。

【0079】図 4 (a) ~ (f) は本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の動作を説明するための図である。図 4 はパルス幅の狭い光パルス列 [図 4 (a)] が半導体光増幅器 1 に入力した場合の光パルス列の推移を示している。この場合、パルス幅を 0.8 p s 、パルス間隔を 10 p s としている。

【0080】1 周目の光パルス [図 4 (b)] のパルス幅はおおよそ 1.5 p s に広がる。図 3 (e), (f) に示す平衡状態のパルス波形と比べると、1 周目の光パルス波形は台形に近く、歪んでいる。パワーは平衡状態よりも大きい。1 周目の光パルス列が通過している間、半導体光増幅器 1 のキャリア密度と利得とは平衡状態よりも低い。

【0081】周回を重ねるにつれてパルス波形の歪が減少し、パワーが低下し、半導体光増幅器 1 のキャリア密度と利得が増大し、それぞれ平衡状態に近づく。図 4 (c) ~ (f) にそれぞれ 2 周目、4 周目、8 周目、16 周目の光パルス列を示している。この場合も、8 周目以降は平衡状態に達する。平衡状態のパルス列のパルス波形、パルス幅、パワーは図 3 に示すパルス列と同じである。

【0082】図 5 は本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の動作を説明するための図である。図 5 は平衡状態に達した本実施例の 1.5-p s 、 100-GHz の光パ

10

20

30

40

50

ルス列のスペクトルを示している。縦モード間隔は 100 GHz (0.8nm)、包絡線の半値幅は約 4 nm であり、transform-limited な光パルスが発生したことを示している。

【0083】周回初期の光パルスパワーやパルス間隔は不均一だが、平衡状態に達すると、それぞれ均一となる。周回光導波路に設けられた 10- ps 遅延干渉器 7 が光パルスのパワーを均一に分配し、かつ光パルスの間隔を 10- ps に制御する。遅延干渉器 7 の強度分岐比は、半導体光増幅器の特性等を考慮した上で、50 : 50、90 : 10、95 : 5、99 : 1、99.9 : 0.1、99.99 : 0.01、99.999 : 0.001 等の適正な比率に設計すればよい。

【0084】尚、本実施例による光パルス発生装置の光パルス繰返し周波数を制御する必要がある場合、出力光パルスの繰返し周波数を監視しながら遅延干渉器 7 と時間ディレイ 6 とを帰還制御する。出力光パルスの繰返し周波数とクロック入力の周波数との差分がゼロとなるように、遅延干渉器 7 と時間ディレイ 6 との遅延時間を微調整することによって、クロック周波数に厳密に一致した光パルスを発生することができる。ここで必要なクロック入力パワーは -10 dBm 以下である。

【0085】出力光パルス周波数の監視方法は出力光の一部を光検出器でモニタする方法の他に、半導体光増幅器 1 の注入電流をモニタする方法がある。半導体光増幅器 1 の駆動方式は基本的に直流定電流駆動だが、半導体光増幅器 1 が光パルスを増幅する反作用として駆動電流に周回光パルス周波数に等しい交流成分が混じる。

【0086】また、目的に応じて、周回光導波路の一部に光強度変調器や光位相変調器を設けてもよい。クロック入力を使って光強度変調器や光位相変調器を変調すると、周回光パルスのパルス間隔等の安定度をさらに高めることができる。

【0087】図 6 は本発明の第 2 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。図 6 において、本発明の第 2 の実施例による光パルス発生装置は 1 組の周回光導波路と 2 台の連続光光源 31、32 とを備えている。ここで、第 1 の連続光光源 31 の波長を 1、第 2 の連続光光源 32 の波長を 2 とする。

【0088】本実施例の周回光導波路は半導体光増幅器 (SOA) 21、26 と、遅延干渉器 (MZI) 22、24、27 と、波長フィルタ 23、28 と、時間ディレイ 25 と、アイソレータ 36、43 と、合波器 35、38、41、42、45 と、分波器 37、39、40、44、46 とを含んで構成されている。

【0089】当該周回光導波路は 2 組の波長変換器を備えている。半導体光増幅器 21 と遅延干渉器 22 と波長フィルタ 23 とからなる第 1 の波長変換器は入力光パルスの波長を 2 から 1 へと変換する。

【0090】一方、半導体光増幅器 26 と遅延干渉器 27 と波長フィルタ 28 とからなる第 2 の波長変換器は入

力光パルスの波長を 1 から 2 へと変換する。したがって、半導体光増幅器 21 に到着した光パルスが周回光導波路を 1 周すると、その波長は 2 から 1 へと変換され、さらに 1 から 2 へと変換され、半導体光増幅器 21 に戻る。

【0091】波長フィルタ 23 の中心波長は 1、波長フィルタ 28 の中心波長は 2 である。それぞれの波長フィルタ 21、28 は新しく生成された光パルスを透過し、増幅された古い光パルスと ASE とを遮断する。遅延干渉器 24 の構造及び動作は本発明の第 1 の実施例の遅延干渉器 7 と同じである。時間ディレイ 25 の構造及び動作は本発明の第 1 の実施例の時間ディレイと同じである。

【0092】上述した光パルス発生装置も、本発明の第 1 の実施例と同様に、光パルス列を自発的に発生し、1.5- ps、100- GHz のパルス列が周回光導波路を周回する。本実施例は 2 組の出力ポート 29、30 を備えており、出力ポート 29 から波長 1 の光パルス、出力ポート 30 から波長 2 の光パルスが取出される。

【0093】尚、連続光光源 31 からの連続光はアイソレータ 33 を経て周回光導波路に入力され、連続光光源 32 からの連続光はアイソレータ 34 を経て周回光導波路に入力される。

【0094】図 7 は本発明の第 3 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。図 7 において、本発明の第 3 の実施例による光パルス発生装置は 1 組の周回光導波路と 1 台の連続光光源 62 とを備えている。本発明の第 3 の実施例による光パルス発生装置は本発明の第 1 及び第 2 の実施例と異なり、周回光導波路が直線状となっている。

【0095】当該周回光導波路は半導体光増幅器 (SOA) 51 と、時間ディレイ 52、57 と、波長フィルタ 53、60 と、遅延干渉器 (MZI) 54 と、分波器 55、65 と、位相調整器 56 と、と、全反射鏡 58、59 と、合波器 64 とを含んで構成されている。

【0096】光が分波器 55 から位相調整器 56 と時間ディレイ 57 とを経て全反射鏡 58 に達する時間は分波器 55 から全反射鏡 59 に達する時間と異なる。本実施例ではこの時間差を 0.89 ps、遅延干渉器 54 の遅延時間を 10.0 ps としている。

【0097】上述した光パルス発生装置も、本発明の第 1 の実施例と同様に、光パルス列を自発的に発生し、1.5- ps、100- GHz のパルス列が周回光導波路を周回する。まず、連続光光源 62 を出た連続光が光サーキュレータ 61 とフィルタ 60 とを経て半導体光増幅器 51 に達する。図の左側から半導体光増幅器 51 に入力した光パルスは、右側から半導体光増幅器 51 に入力した連続光の位相と強度とを変調する。

【0098】位相変調と強度変調とを受けた連続光は分波器 55 で 2 つの成分に分岐し、第 1 の成分は全反射鏡

58で反射して分波器55に戻り、第2の成分は全反射鏡59で反射して分波器55に戻る。分波器55に戻った第1の成分及び第2の成分はここで干渉する。

【0099】第1の成分が分波器55を出てから分波器55に戻るまでに要する導波時間は第2の成分より1.78ps長い(または、短い)。つまり、分波器55から全反射鏡58, 59に至る光回路の作用は本発明の第1の実施例の遅延干渉器と同じである。したがって、半導体光増幅器51で位相変調と強度変調とを受けた連続光が分波器55で干渉すると、新しい光パルスが生成される。新しい光パルスは遅延干渉器54と時間ディレイ52と波長フィルタ53とを経て半導体光増幅器51に達する。

【0100】一方、半導体光増幅器51から図の右側へ向かって、増幅された光パルスが導波される。増幅された光パルスは波長フィルタ60と光サーキュレータ61を経て、出力ポート63から取出される。波長フィルタ53, 60は光パルスを透過し、半導体光増幅器51のASEを除去する。

【0101】遅延干渉器54の作用は本発明の第1の実施例の遅延干渉器7や本発明の第2の実施例の遅延干渉器24の作用と同じである。遅延干渉器54は光パルスのパワーを均一に分配し、かつ光パルスの間隔を10-psに制御する。時間ディレイ52の作用及び役割は本発明の第1の実施例の時間ディレイ6や本発明の第2の実施例の時間ディレイ25と同じである。

【0102】図8は本発明の第4の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。図8において、本発明の第4の実施例による光パルス発生装置は周回光導波路と1台の連続光光源78とを備えている。

【0103】当該周回光導波路は半導体光増幅器(SOA)71と、光サーキュレータ72と、遅延干渉器(MZI)73, 77と、波長フィルタ74と、時間ディレイ76と、分波器83, 85, 86と、合波器84, 87とを含んで構成されている。

【0104】本実施例の遅延干渉器72の遅延時間は1.78psとしており、その働きは本発明の第1の実施例の遅延干渉器2に等しい。本実施例の遅延干渉器77の遅延時間は10.0psとしており、その働きは本発明の第1の実施例の遅延干渉器7に等しい。

【0105】上述した光パルス発生装置も、本発明の第1の実施例と同様に、光パルス列を自発的に発生し、1.5-ps、100-GHzのパルス列が当該周回光導波路を周回する。

【0106】連続光源78を出た連続光はアイソレータ82と光サーキュレータ80とを経て半導体光増幅器71に達する。図の右側から半導体光増幅器71に入力した光パルスは半導体光増幅器71の中で連続光の位相と強度とを変調する。

【0107】位相変調と強度変調とを受けて右方向へ進

む連続光が光サーキュレータ72と遅延干渉器73とを通過すると、新しい光パルスに変換される。新しい光パルスは時間ディレイ76と遅延干渉器77と光サーキュレータ72とを経て半導体光増幅器71に戻る。

【0108】一方、半導体光増幅器71で増幅された光パルスは光サーキュレータ80と波長フィルタ81とを経て出力ポート79に達する。

【0109】波長フィルタ74, 81は半導体光増幅器71が出すASEを除去する。時間ディレイ76の作用及び役割は本発明の第1の実施例の時間ディレイ6と同じである。遅延干渉器77の作用及び役割は本発明の第1の実施例の遅延干渉器7と同じである。

【0110】尚、上記の本発明の第1の実施例(図1)、本発明の第2の実施例(図6)、本発明の第4の実施例(図8)にそれぞれ示した遅延干渉器7, 27, 77は必ず必要というわけではなく、無くてもよい。本発明の第3の実施例(図7)の場合には遅延干渉器54の第2のアームに相当する分岐部55から全反射鏡59までの部分が必ずしも必要というわけではなく、無くてもよい。

【0111】また、本発明の光パルス発生器の波長変換器部分が最適かつ効率の良い動作条件で生成する光パルスがフーリエ変換限界に近いことが、「Jpn. J. Appl. Phys. 誌、第38巻、part 2、第11A号、L1243-1245頁、1999年11月」に報告されている。したがって、本発明の光パルス発生器が発生する光パルスは、フーリエ変換限界に近い良質な光パルスである。本発明の光パルス発生器が有する波長フィルタの役割は古い光パルスやASEを除去することであり、波長フィルタの帯域を広げてもフーリエ変換限界特性が劣化することは無い。

【0112】本発明の光パルス発生器が発生する光パルスが周回光導波路を周回し続けるための必須条件の1つは、周回光導波路の周回損失がゼロとなることである。したがって、周回光導波路を構成する各部品の損失の合計より大きな利得を持つ半導体光増幅器を用い、周回損失がゼロとなるように周回光導波路の一部に設けた光減衰器(上記の本発明の第1~第4の実施例の説明では省略)を調整する。用途によっては、小さな利得を持つ半導体光増幅器を用い、周回光導波路の適当な部分に高利得なファイバ型光増幅器を設け、周回損失をゼロに調整することも可能である。

【0113】図9は本発明の第5の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。図9において、本発明の第5の実施例による光パルス発生装置はファイバ型光増幅器91と光ファイバ型光増幅器91のASE除去用のバンドパス波長フィルタ92と光減衰器93とを加えた以外は本発明の第1の実施例による光パルス発生装置と同様の構成であり、同一構成要素には同一符号を付してある。また、同一構成要素の動作は本発

明の第 1 の実施例と同様である。

【0114】光ファイバ型光増幅器 9 1 及びバンドパス波長フィルタ 9 2 は遅延干渉器 7 と合波器 1 3 との間に配設され、光減衰器 9 3 は時間ディレイ 6 と分波器 1 4 との間に配設されている。

【0115】図 1 0 は本発明の第 6 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。図 1 0 において、本発明の第 6 の実施例による光パルス発生装置は光ファイバ型光増幅器 9 1 とバンドパス波長フィルタ 9 2 と光減衰器 9 3 とが配置されたいる箇所が異なる以外は上記の本発明の第 5 の実施例による光パルス発生装置と同様である。

【0116】光ファイバ型光増幅器 9 1 及びバンドパス波長フィルタ 9 2 は時間ディレイ 6 と分波器 1 4 との間に配設され、光減衰器 9 3 は遅延干渉器 7 と合波器 1 3 との間に配設されている。

【0117】光ファイバ型光増幅器 9 1 は半導体光増幅器 1 とバンドパス波長フィルタ 3 との間以外の個所であれば、図 1 0 に示す本発明の第 6 の実施例に示すように、周回光導波路の別の個所に挿入しても良い。光ファイバ型光増幅器 9 1 を半導体光増幅器 1 とバンドパス波長フィルタ 3 との間に挿入すると、光ファイバ型光増幅器 9 1 が半導体光増幅器 1 の ASE を増幅して雑音が増加することとなる。

【0118】図 1 1 は本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図 1 1 において、本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置は本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置に、信号入力ポート 1 0 2 と合波器 1 0 1 とを付け加えたものである。

【0119】入力信号は信号入力ポート 1 0 2 と合波器 1 0 1 とを経て周回光導波路に入り、周回光導波路を周回する光パルスに合波される。周回光導波路を周回する光成分に対する入力信号の合波比の最適値は半導体光増幅器 1 の特性に依存するので、半導体光増幅器 1 の特性を考慮して適切な値を選ぶ。半導体光増幅器 1 を通過する光が受ける非線形位相シフト量は 0.5 から 1.2 程度の大きさを持つことが望ましい。本発明の第 7 の実施例の非線形位相シフト量は 0.7 としている。

【0120】本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置は入力信号周波数に等しい周波数の光クロックを発生し、出力ポート 1 2 へ出力する。上述した本発明の光パルス発生装置と同様、光クロックパルスのパルス幅は遅延干渉器 2 の遅延時間 (T_p) にほぼ等しく、パルス間隔は遅延干渉器 7 の遅延時間 (T_s) にほぼ等しい。

【0121】図 1 2 (a) ~ (f) は本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置の基本的な作用を説明するための図である。この図 1 2 を参照して入力信号を受けた本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置が

光クロックを抽出する作用を備えることを説明する。

【0122】図 1 2 (a) は入力光信号の 1 例である。この入力光信号は 8 ビット周期の “ 1 1 1 1 0 1 0 1 ” 信号、パルス幅が 1.5 p s、繰返し周波数が 100 G H z としている。

【0123】図 1 2 (b) は周回光導波路を 1 周した後の光パルス波形をシミュレーションした結果を示している。入力光信号が遅延干渉器 7 を通過する際に、遅延干渉器 7 が “ 1 ” 信号のエネルギーの一部を隣接信号位置へ分配するため、“ 0 ” 信号の位置に弱い光パルスが成長する。

【0124】図 1 2 (c) ~ (f) はそれぞれ、2 週目、4 週目、8 週目、1 6 週目の光パルス波形を示している。図に示すように、8 周ないし 1 6 周すると、パルス強度がほぼ均一に揃った光クロックパルスが生成される。クロックパルス幅は約 1.5 p s である。生成した光クロックパルスの消光比は 30 d B 以上と大きい。

【0125】図 1 2 には本発明のクロック抽出器が入力光信号を種としてクロックパルス列を生成する作用を備えることを示している。尚、図 1 2 (b) ~ (f) は装置の動作を以下のように簡略化してシミュレーションしたものである。すなわち、最初、図 1 2 (a) に示す入力信号が合波器 1 0 1 から合波器 1 3 へ向かって出発し、半導体光増幅器 1 等を経て再び合波器 1 0 1 へ戻ってくるものとしている。

【0126】入力信号の長さは周回光導波路を充たす長さとし(ビット数は 5 0 ビット以上)、合波器 1 0 1 へ戻った光パルスに新たな入力信号パルスが加わらないものとしている。つまり、合波器 1 0 1 へ戻った光パルスはそのまま合波器 1 3 へ進み、周回光導波路を周回し続けるものとしている。

【0127】以上のように、装置動作を簡略化した上でシミュレーションを行うと、周回パルス列(先頭部分の数十ビットを除いて)は 8 ビット周期の繰返し波形を示す。図 1 2 (b) ~ (f) に示した波形は、説明を簡単化するために、8 ビット周期の繰返し波形部分を示したものである。周回パルス列の先頭部分はやや特異なふるまいを示すものの、8 周 ~ 3 2 周程度の周回を経た後に純度の高い光クロックとなる。8 ビット周期よりもはるかにランダム性の高い実際のデジタル信号を入力する場合には、(先頭部分を含めて)上述した例よりも少ない周回数で純度の高い光クロックが生成される。

【0128】以下、図 1 2 を参照しながら、本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置の実際の動作について説明する。実際の光クロック抽出装置の周回光導波路は合波器 1 0 1 から入力光信号が入り続ける。合波器 1 0 1 から入力光信号が入り続けても、周回光成分に対する入力信号の合波比を充分小さくすることによって、周回光パルス列の各パルスの強度を図 1 2 (f) に示すように均一化することが可能である。

【0129】その後のある時刻に入力光信号の位相がジャンプした場合、図12に示した作用を備える本発明の光クロック抽出器は、新しい入力光信号の位相に一致する光クロック列を生成し始める。図12に示すように、入力信号の位相がジャンプしてから新しい光クロック列が生成するまでに必要な時間は、光パルス列が周回光導波路を8周～16周周回する時間程度と高速である。

【0130】一方、ある時刻以降の入力信号の各パルスのジッタが増えた場合、図12に示した作用を備える本発明の光クロック抽出器は、入力信号の平均的な位相に一致するクロックパルス列を生成し始める。すなわち、入力信号のパルス間隔がばらついていても、本発明の光クロック抽出器は等間隔なクロックパルス列を出力する。

【0131】したがって、本発明の光クロック抽出器は入力信号のジッタを除去する作用を備える。本発明の光クロック抽出器がジッタの少ない光クロック列を生成するまでに必要な時間は、光パルス列が周回光導波路を8周～16周周回する時間程度である。

【0132】一例として、光学長が1m、平均群速度屈折率が1.5の周回光導波路を備える光クロック抽出器のクロック生成時間を見積もると、60ns程度である。周回光導波路を光集積回路化して光学長を10cmに短縮すると、クロック生成時間はさらに6ns程度に短縮する。したがって、光集積型クロック抽出器がクロック抽出に必要とする入力信号の最小ビット数は、600ビットとなる(信号ビットレートを100Gbpsとした場合)。

【0133】さらに、ある時刻以降の入力信号の周波数が変わった場合、図12に示した作用を備える本発明の光クロック抽出器は、入力信号の平均的な周波数に一致するクロックパルス列を生成し始める。本発明の光クロック抽出器が新しい周波数の光クロック列を生成するまでにかかる時間は、周波数変化量に依存する。周波数変化量が充分小さい場合に必要時間は、光パルス列が周回光導波路を周回する時間より短い。

【0134】尚、本発明のクロック抽出器が追従できる入力信号周波数範囲は、 $\pm 1 \times 10^{-2}$ 程度である。この追従可能周波数範囲は、ファイバリングレーザよりはるかに広い。ファイバリングレーザの場合、リング共振器のQ値がきわめて大きく、固有周波数(レーザパルスの繰返し周波数)の変動範囲が非常に狭い。

【0135】本発明の光クロック抽出器の場合は、同一の光パルスが周回し続けるわけではなく、波長変換器の部分で古いパルスが新しいパルスに置き換わる。パルスが置き換わるプロセスにインコヒーレントなキャリア密度変化が関与するため、本発明の周回光導波路の実効的なQ値はファイバリングレーザのリング共振器よりはるかに小さい。これが、追従可能周波数範囲が広い原因である。

【0136】さらに、光クロック抽出器内部の時間ディレイ6と遅延干渉器7との遅延時間を機械的、電気的、あるいは熱的な方法で調整することによって、さらに広い範囲の入力信号周波数に追従する光クロックを生成することができる。

【0137】本発明の第7の実施例による光クロック抽出装置の半導体光増幅器1を通過する全ての光成分は、同じ方向へ進行する。したがって、第6の従来例のクロック抽出器と異なり、本発明の第7の実施例による光クロック抽出装置は半導体光増幅器1通過時間 T_{tr} よりも短いパルス幅を持つ光クロックパルス列を生成することが可能である。さらに、本発明の第7の実施例による光クロック抽出装置の遅延干渉器2の遅延時間を短くすると、入力信号パルス幅よりも狭い光クロックパルス列を生成することも可能である。

【0138】図13は本発明の光クロック抽出装置を利用した全光信号再生装置の構成を示すブロック図である。図13において、全光信号再生装置110は光クロック抽出装置111と、ディレイ112と、全光ゲート113とから構成されている。

【0139】入力光信号ポート114から入力された入力光信号の一部はディレイ112と制御光入力ポート116とを経て全光ゲート113に入力し、全光ゲート113を制御する。入力光信号の一部が“0”であれば全光ゲート113が閉じ、入力光信号の一部が“1”であれば全光ゲート113が一定時間開く。全光ゲート113が開く時間(いわゆる、スイッチ窓幅)は、全光ゲート113内部のディレイによって信号パルス間隔の20%～100%程度に設定される。

【0140】入力光信号の別の一部は光クロック抽出装置111を経て光クロックパルス列となり、さらに被制御光入力ポート115から全光ゲート113に入力される。以上の結果、全光ゲート113から再生光信号出力ポート117へ出力される出力信号は、入力光信号と同様に、デジタル符号化された光信号である。以上によって、生成される出力光信号の各光パルスは、光クロック抽出装置111が生成した光クロック列の一部である。したがって、出力光信号のジッタは入力光信号より小さい。

【0141】図13に示した全光信号再生装置110に適した全光ゲート113の例は、「日本特許第2531443号」、「日本特許第2629624号」、「IEEE Photonics Technol. Lett. 誌、第10巻、第11号、1575-1577頁、1998年」、「レーザ研究誌、第27巻、第4号、257-261頁、1999年」、「Electron. Lett. 誌、第35巻、第23号、2030-2031頁、1999年」、「第60回応用物理学学会学術講演会講演予稿集No. 3、講演番号3p-ZB-8、1013頁、1999年」等に記載されている。

【0142】また、「Technical Digest of the 23rd European Conference on Optical Communication (ECOC '97)、第2巻、269-272頁、1997年」、「Electron. Lett. 誌、第34巻、第24号、2340-2342頁、1998年」、「Electron. Lett. 誌、第35巻、第17号、1477-1478頁、1999年」等に記載されている全光信号再生装置の例は上述の全光スイッチを利用している。これらの全光信号再生装置は入力信号のジッタのみならず強度雑音をも低減している。全光スイッチ内部の非線形位相シフトを設定すると、全光スイッチ内部の干渉計のサイン関数的透過特性によって強度雑音が抑制されると記載されている。

【0143】本発明のクロック抽出装置の信号入力ポートを接続する合波器の位置は、周回光導波路の半導体光増幅器1から遅延干渉器2までの部分以外の場所であればどこでも良い。

【0144】図14は本発明の第8の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図14において、本発明の第8の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート104と合波器103とを本発明の第7の実施例による光クロック抽出装置とは異なる場所に備え、さらに光ファイバ型光増幅器91を備えた以外は本発明の第7の実施例による光クロック抽出装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。また、同一構成要素の動作は本発明の第7の実施例と同様である。さらに、本発明の第8の実施例による光クロック抽出装置の作用は上述した本発明の第7の実施例による光クロック抽出装置と同様である。

【0145】図15は本発明の第9の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図15において、本発明の第9の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート104と合波器103とを付け加え、遅延干渉器7を3段構成の遅延干渉器7-1~7-3に代えた以外は本発明の第1の実施例による光パルス発生装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。また、同一構成要素の動作は本発明の第1の実施例と同様である。

【0146】本発明の第9の実施例による光クロック抽出装置では遅延干渉器7を3段構成の遅延干渉器7-1~7-3としているが、2段構成あるいは4以上の段数の構成としてもよい。この遅延干渉器7-1~7-3の各段の遅延時間は、入力信号のパルス間隔の整数倍に設定する。

【0147】3段構成の遅延干渉器7-1~7-3を用いることによって、本発明の第9の実施例による光クロック抽出装置は、本発明の第7及び第8の実施例よりも強い「ビット間エネルギー分配作用」を備える。したがっ

て、本発明の第9の実施例による光クロック抽出装置がクロック抽出に要する時間は、本発明の第7及び第8の実施例よりも短い。

【0148】図16は本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図16において、本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート122と合波器121とを付け加えた以外は本発明の第2の実施例による光パルス発生装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。また、同一構成要素の動作は本発明の第2の実施例と同様である。

【0149】本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置は本発明の第7~第9の実施例と異なり、ポラライザ4を有していないので、入力信号の偏光方位の影響を受けない。その他の作用や動作特性は本発明の第7及び第8の実施例と同様である。

【0150】本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置はクロックを抽出する作用に加えて、クロックを分周する作用を備えることができる。例えば、本発明の第7及び第8の実施例と本発明の第10の実施例とのいずれかの光クロック抽出装置に光クロックを入力し、遅延干渉器7または遅延干渉器24の遅延時間を入力クロック周波数の1/16とすると、16分周光クロックが生成される。すなわち、本発明の第7及び第8の実施例と本発明の第10の実施例とはいずれもクロック分周も可能となっている。

【0151】本発明の第9の実施例による光クロック抽出装置の場合、3段構成の遅延干渉器7-1~7-3の少なくとも1段の遅延干渉器の遅延時間を入力クロック光パルス間隔の16倍とし、残り2段の遅延干渉器の遅延時間を入力クロック光パルス間隔の16倍の整数倍（1倍を含む）とすると、16分周光クロックが生成される。さらに、本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置は、上述したクロック抽出とクロック分周との2つの処理を同時に行うことができる。

【0152】図17(a)~(f)は本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置のクロック抽出分周の同時処理の基本作用を説明するための図である。図17(a)に示すように、入力光信号は8ビット周期の“11110101”信号、パルス幅が1.5ps、繰返し周波数が100GHzとしている。遅延干渉器27の遅延時間は20psである。

【0153】図17(b)~(f)に示すように、本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置は50-GHzの分周光クロックを発生する。クロックパルス幅は約1.5psである。

【0154】図18(a)~(f)は本発明の第10の実施例による光クロック抽出装置のクロック抽出分周作用を説明するための図である。図18において、遅延干渉器27の遅延時間を40psとした結果、8ビット周期

の“11110101”信号から4分周光クロック(25GHz)が発生する。

【0155】また、遅延干渉器22の遅延時間Tpを1.1psとした結果、出力光クロックのパルス幅が1.0psと、入力光信号パルス幅よりも短くなる。さらに、遅延干渉器22の位相バイアスを「Opt. Lett. 誌、第23巻、第23号、1846-1848頁、1998年」等の記載にしたがって最適化している。位相バイアス最適化の結果、図19に示すように、30dB以上の出力光クロック消光比が得られる。この動作例の非線形位相シフト量は0.94、位相バイアスの最適値は1.027である。

【0156】図20は本発明の光クロック抽出装置のクロック抽出分周作用を利用した全光多重解除装置の構成を示すブロック図である。図20において、全光多重解除装置130は光クロック抽出装置131と、ディレイ132と、全光ゲート133とから構成されている。

【0157】一例として160-Gbps光信号から16:1時分割解除光信号(10Gbps)を取出す多重解除動作について、図20を参照して説明する。光クロック抽出装置131は160-Gbps光信号から10-GHz分周光クロックを生成する。10-GHz分周光クロックを全光ゲート133の制御光入力ポート135に入力して全光ゲート133を制御すると、全光ゲート133が10-GHz周期のスイッチ窓を開く。スイッチ窓幅は10ps以下に設定する。

【0158】以上によって、被制御入力ポート136に入力された160-Gbps光信号のうち、10-GHz周期のスイッチ窓に一致する光パルス(すなわち、16:1時分割解除された10-Gbps光信号)だけが出力ポート137へ送り出される。

【0159】図21は本発明の光クロック抽出装置のクロック抽出分周作用を利用した全光パケット伸張装置の構成を示すブロック図であり、図22は図21のパケット伸張光回路にマツハツェンダ型遅延光回路を用いた場合の構成例を示す図である。図21において、全光パケット伸張装置140は光クロック抽出装置141、142と、ディレイ143と、全光パケット伸張光回路144とから構成されている。また、図22において、全光パケット伸張光回路144はマツハツェンダ型遅延光回路(あるいはループ型遅延光回路)144aと、全光スイッチ144b、144c等から構成されている。

【0160】一例として169.206-Gbps 256-bit光パケットを9.95328-Gbps 256-bit光パケットに伸張する動作(伸張率=17倍)について、図21及び図22を参照して説明する。光クロック抽出装置141は169.206-Gbps光パケットから17分周光クロック(9.95328GHz)を生成する。光クロック抽出装置142はさらに9.95328-Gbps光パケットから16分周光クロック(622.08MHz)を生成する。

【0161】622.08MHz光クロックは全光パケット伸張光回路144の光クロック入力ポート147を経て全光パケット伸張光回路144内の第1段目の全光スイッチ(全光スイッチ144b)の制御ポートに入力する。

9.95328GHz光クロックは全光パケット伸張光回路144の光クロック入力ポート148を経て全光パケット伸張光回路144内の第2段目の全光スイッチ(全光スイッチ144c)の制御ポートに入力する。尚、1段目から8段目までの遅延光回路の遅延時間は、それぞれ12.10ns、6.052ns、3.026ns、1.513ns、756.5ps、189.1ps、94.56psである

【0162】全光スイッチ144bは繰返し周波数が622.08-MHz、幅が95-psのスイッチ窓を開き、169.206-Gbps 256-bit光パケットを16-bitずつまとめて17倍に伸張する。全光スイッチ144cは繰返し周波数が9.95328GHz、幅が4-ps程度のスイッチ窓を開き、各信号ビットの間隔を17倍に伸張する。

【0163】以上の一連の動作によって、全光パケット伸張光回路144は169.206-Gbps 256-bit光パケットを9.95328-Gbps 256-bit光パケットに伸張し、出力ポート149へ送り出す。全光スイッチの代わりに電気信号で制御する光ゲートを利用した全光パケット伸張回路の構成例や動作例が、「IEICE Trans. Commun. 誌、第E81-B巻、第8号、1681-1686頁、1998年」、「1999年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-10-139、316頁」、「1999年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-10-141、318頁」、「Technical Digest of the 25th European Conference on Optical Communication(ECOC'99), vol.1, pp.256-257, Nice, France, Sept.26-30, 1999年」に記載されている。

【0164】尚、図22を参照して説明した全光パケット伸張光回路の動作は、信号レートが64倍速いこと及び電気制御光スイッチを全光スイッチに置き換えた以外は、「1999年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-10-141、318頁」に記載されたパケット伸張光回路と同様である。また、マツハツェンダ型遅延光回路の代わりに、「IEICE Trans. Commun. 誌、第E81-B巻、第8号、1681-1686頁、1998年」、「1999年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-10-140、317頁」、「Technical Digest of the 25th European Conference on Optical Communication(ECOC'99), vol.1, pp.256-257, Nice, France, Sept.26-30, 1999年」に記載されているループ型遅延光回路

を利用したパケット伸張光回路を使うことも可能である。

【0165】図23は本発明の第11の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図23において、本発明の第11の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート152、合波器151、ファイバ型光増幅器153等を付け加えた以外は本発明の第3の実施例による光パルス発生装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。同一構成要素の動作は本発明の第3の実施例と同様である。

【0166】本発明の第11の実施例による光クロック抽出装置では、光パルスと連続光とが半導体光増幅器51の中を逆方向へ進む。したがって、本発明の第11の実施例による光クロック抽出装置が生成する光クロックパルスの光パルス幅は、本発明の第7～第10の実施例よりも広がる。他の基本的なクロック抽出作用とクロック分周作用とは、本発明の第7～第10の実施例と同様である。

【0167】図24は本発明の第12の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図24において、本発明の第12の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート152及び合波器151を異なる位置に配置した以外は本発明の第11の実施例による光クロック抽出装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。同一構成要素の動作は本発明の第11の実施例と同様である。

【0168】信号入力ポート152及び合波器151は遅延干渉器54と分波器55との間に配置されており、半導体光増幅器51と遅延干渉器54との間以外の様々な個所に取り付けることができる。本発明の第12の実施例による光クロック抽出装置の基本的なクロック抽出作用とクロック分周作用とは、本発明の第11の実施例と同様である。

【0169】図25は本発明の第13の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図25において、本発明の第13の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート162、合波器161、ファイバ型光増幅器163等を付け加えた以外は本発明の第4の実施例による光パルス発生装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。同一構成要素の動作は本発明の第4の実施例と同様である。

【0170】本発明の第13の実施例による光クロック抽出装置でも、光パルスと連続光とが半導体光増幅器51の中を逆方向へ進む。したがって、本発明の第13の実施例による光クロック抽出装置が生成する光クロックパルスの光パルス幅は、本発明の第7～第10の実施例よりも広がる。本発明の第13の実施例による光クロック抽出装置の他の基本的なクロック抽出作用とクロック分周作用とは、本発明の第7～第10の実施例と同様である。

【0171】図26は本発明の第14の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。図26において、本発明の第14の実施例による光クロック抽出装置は信号入力ポート162及び合波器161を異なる位置に配置した以外は本発明の第13の実施例による光クロック抽出装置と同様の構成となっており、同一構成要素には同一符号を付してある。同一構成要素の動作は本発明の第13の実施例と同様である。

【0172】信号入力ポート162及び合波器161は光サーキュレータ72と遅延干渉器77との間に配置されており、半導体光増幅器71と遅延干渉器74との間以外の様々な個所に取り付けることができる。本発明の第14の実施例による光クロック抽出装置の基本的なクロック抽出作用とクロック分周作用とは、本発明の第13の実施例と同様である。

【0173】このように、本発明の光パルス発生装置は10m以上と長い非線形光ファイバや希土類ドープ光ファイバを含まない。したがって、従来の光パルス発生装置よりも小型化することが可能である。例えば、「Electron. Lett. 誌、第34巻、第10号、986-987頁、1998年」に記載された石英導波路と半導体導波路とのハイブリッド集積実装技術等を用いることによって、近い将来、本発明の光パルス発生装置の集積化が進むものと考えられる。

【0174】また、本発明の光パルス発生装置の周波数を同期する際に必要なクロック入力（電気信号）パワーは従来の光パルス発生装置より小さい。

【0175】一方、本発明の光クロック抽出装置は、繰返し周波数の高い高速光信号からパルス幅の狭い光クロックを高速に抽出することができる。本発明の光クロック抽出装置が出力する光クロックパルスはフーリエ変換限界に近く、消光比が大きく、ジッタや強度雑音が小さい。

【0176】さらに、本発明の光クロック抽出装置は、クロック抽出とクロック分周とを同時に行うことができる。分周比は2に限らず、任意の整数比の分周を行うことができる。

【0177】

【発明の効果】以上説明したように本発明の光パルス発生装置によれば、特定のパルス幅と繰返し周波数と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置において、連続光を出力する連続光光源と、連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、半導体光増幅器からの連続光及び自然放出光を周回する周回光導波路とを備えることによって、小型で波長帯域が広くかつ長期安定動作信頼性と量産製造方法とを兼ね備え、光パルス発生器が必要とする高周波電気信号入力（クロック入力）のパワーを比較的小さくすることができるという効果がある。

【0178】また、本発明の光クロック抽出装置によれ

ば、特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック抽出装置において、光パルス発生装置に、連続光を出力する連続光光源と、連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、半導体光増幅器からの光パルス列と連続光と自然放出光とを周回させる周回光導波路とを設け、周回光導波路に、半導体光増幅器からの連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、信号光を入力するための信号光入力ポートとを少なくとも設けることによって、パルス幅が短く、フーリエ変換限界に近い光クロックパルスを高速に生成することができるという効果がある。

【0179】さらに、本発明の光クロック分周装置によれば、特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック分周装置において、光パルス発生装置に、連続光を出力する連続光光源と、連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、半導体光増幅器からの光パルス列と連続光と自然放出光とを周回させる周回光導波路とを設け、周回光導波路に、半導体光増幅器からの連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、クロック光パルス列を入力するための光クロック入力ポートとを少なくとも設けることによって、高速光クロックを高速に処理することができ、入力光クロックパルスのジッターを除去する作用と必要に応じた分周比の分周作用とを有することができるとともに、フーリエ変換限界に近い分周光クロックを効率よく出力することができるという効果がある。

【0180】さらにまた、本発明の光クロック抽出分周装置によれば、特定のパルス幅と波長とを持つ光パルス列を発生する光パルス発生装置を含む光クロック抽出分周装置において、光パルス発生装置に、連続光を出力する連続光光源と、連続光光源からの連続光を増幅して通過させかつ自然放出光を発生する半導体光増幅器と、半導体光増幅器からの光パルス列と連続光と自然放出光とを周回させる周回光導波路とを設け、周回光導波路に、半導体光増幅器からの連続光から光パルスを発生する遅延干渉器と、遅延干渉器からの光パルスを遅延するディレイと、遅延時間が遅延干渉器の遅延時間よりも長くかつ入力パルス間隔の整数倍に等しい第 2 の遅延干渉器と、信号光を入力するための信号光入力ポートとを少なくとも設けることによって、高速かつ高性能なクロック抽出とクロック分周とを一括して同時に行うことができるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。

【図 2】本発明の光パルス発生装置の内部に含まれる波長変換器部分の動作を説明するための図である。

【図 3】(a) ~ (f) は本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の動作を説明するための図である。

【図 4】(a) ~ (f) は本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の動作を説明するための図である。

10 【図 5】本発明の第 1 の実施例による光パルス発生装置の動作を説明するための図である。

【図 6】本発明の第 2 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。

【図 7】本発明の第 3 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。

【図 8】本発明の第 4 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。

【図 9】本発明の第 5 の実施例による光パルス発生装置の構成を示すブロック図である。

20 【図 10】本発明の第 6 の実施例による光パルス発生抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 11】本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 12】(a) ~ (f) は本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置の動作を説明するための図である。

【図 13】本発明の第 7 の実施例による光クロック抽出装置を利用した全光信号再生装置の構成を示す図である。

30 【図 14】本発明の第 8 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 15】本発明の第 9 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 16】本発明の第 10 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 17】(a) ~ (f) は本発明の第 10 の実施例による光クロック抽出装置のクロック抽出分周の同時処理の基本作用を説明するための図である。

40 【図 18】(a) ~ (f) は本発明の第 10 の実施例による光クロック抽出装置のクロック抽出分周作用を説明するための図である。

【図 19】位相バイアス最適化の結果に示す図である。

【図 20】本発明の光クロック抽出装置のクロック抽出分周作用を利用した全光多重解除装置の構成を示すブロック図である。

【図 21】本発明の光クロック抽出装置のクロック抽出分周作用を利用した全光パケット伸張装置の構成を示すブロック図である。

50 【図 22】図 21 のパケット伸張光回路にマッハツェンダ型遅延光回路を用いた場合の構成例を示す図である。

【図 2 3】本発明の第 1 1 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 2 4】本発明の第 1 2 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【図 2 5】本発明の第 1 3 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

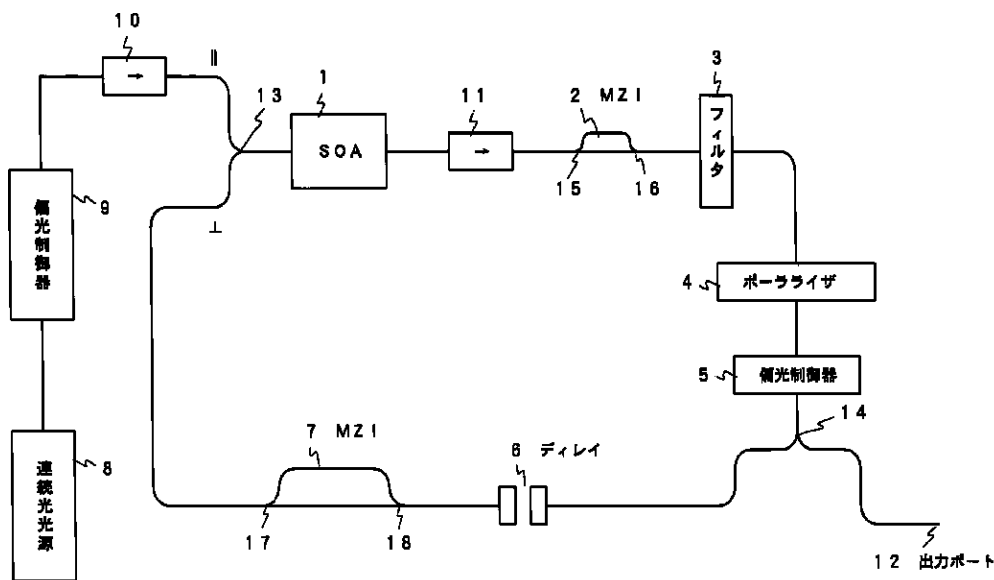
【図 2 6】本発明の第 1 4 の実施例による光クロック抽出装置の構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

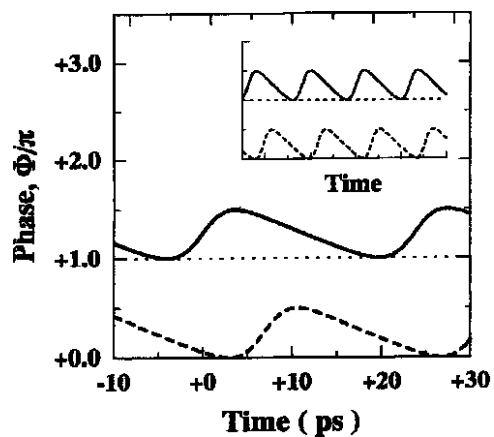
- 1, 21, 26, 51, 71 半導体光増幅器
- 2, 7, 7-1~7-3, 22, 24, 27, 54, 73, 77 遅延干渉器
- 3, 92, 154, 164 バンドパス波長フィルタ
- 4 ポーラライザ
- 5, 9 偏光制御器
- 6, 25, 52, 57 時間ディレイ
- 8, 31, 32, 62, 78 連続光光源
- 10, 11, 33, 34, 36, 43, 82 アイソレータ
- 13, 16, 17, 35, 38, 41, 42, 45, 64, 84, 87, 101, 103, 121, 151, 1*

- * 61 合波器
- 14, 15, 18, 37, 39, 44, 46, 55, 65, 83, 85, 86 分波器
- 23, 28, 53, 60, 74 波長フィルタ
- 56 位相調整器
- 61, 72, 80 光サーキュレータ
- 91, 153, 163 光ファイバ型光増幅器
- 93 光減衰器
- 102, 104, 122, 152, 162 信号入力ポート
- 10 ート
- 110 全光信号再生装置
- 111, 131, 141 光クロック抽出装置
- 112, 132, 142 ディレイ
- 113, 133 全光ゲート
- 114, 134, 144 入力光信号ポート
- 115, 136, 146 被制御光入力ポート
- 116, 135, 145 制御光入力ポート
- 117, 137, 147 再生光信号出力ポート
- 130 全光多重解除装置
- 140 全光パケット伸張装置
- 143 全光パケット伸張回路

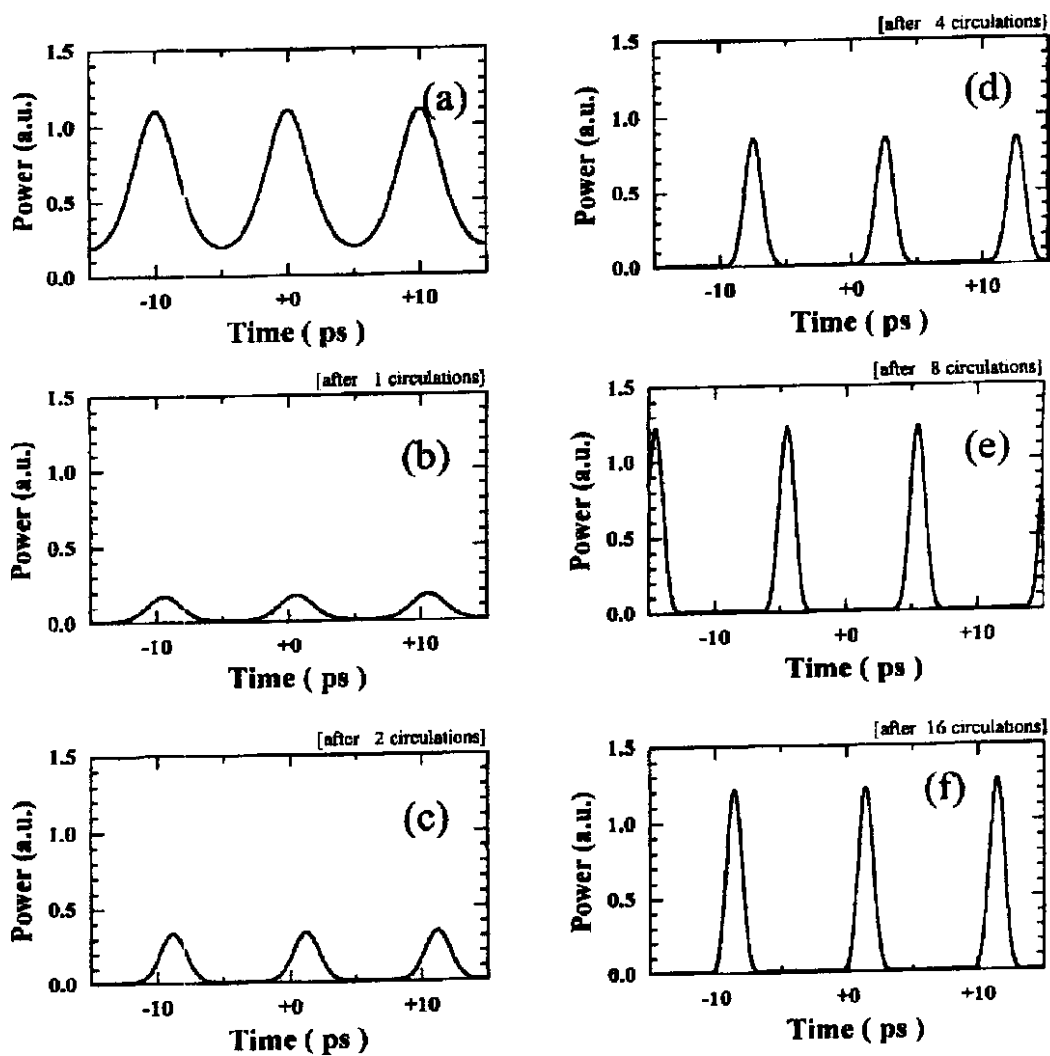
【図 1】



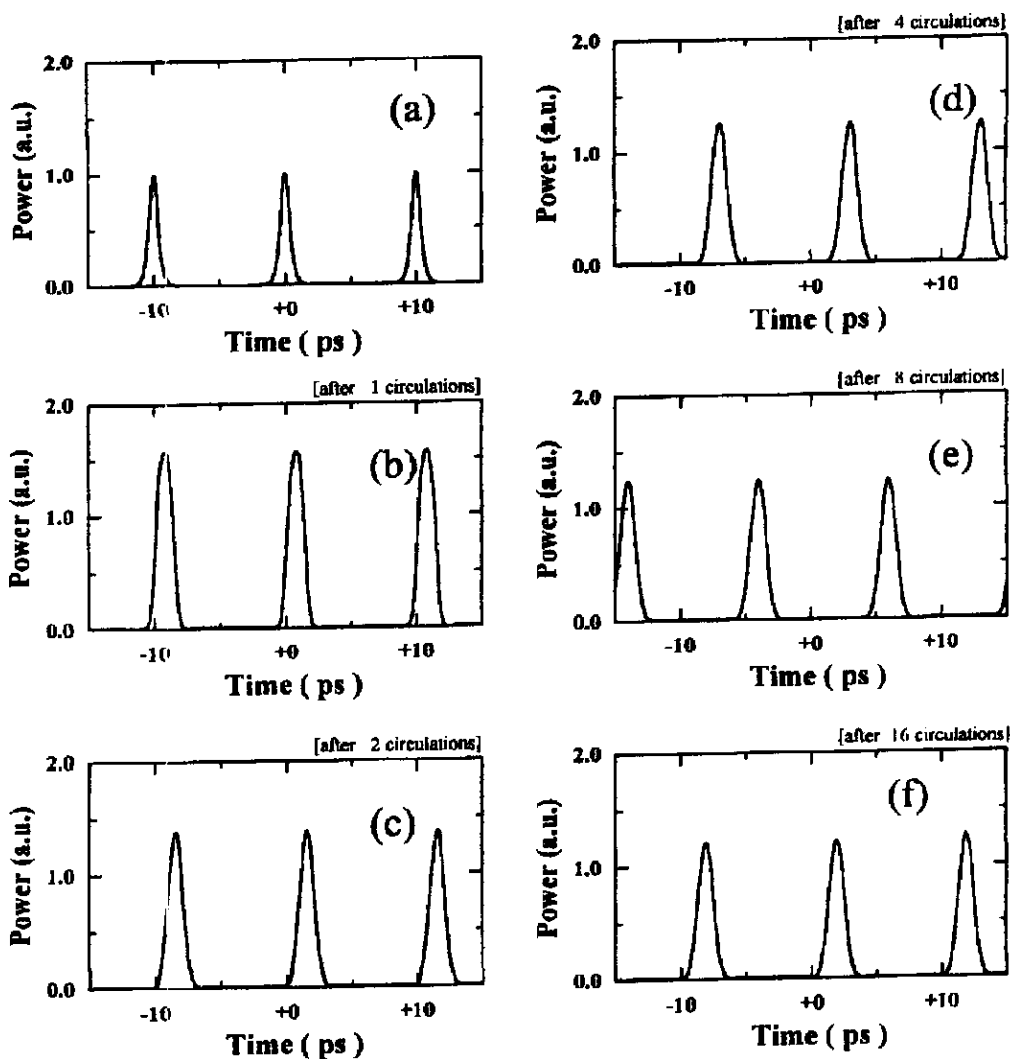
【図 2】



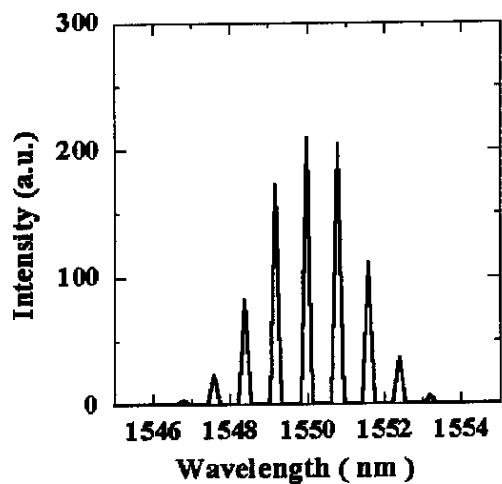
【図 3】



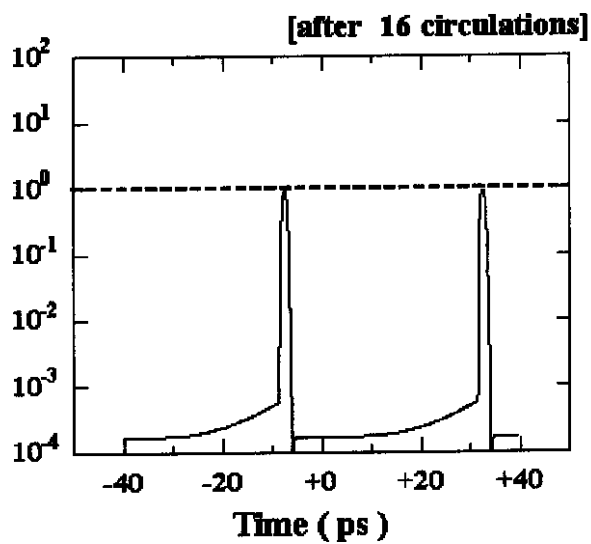
【 図 4 】



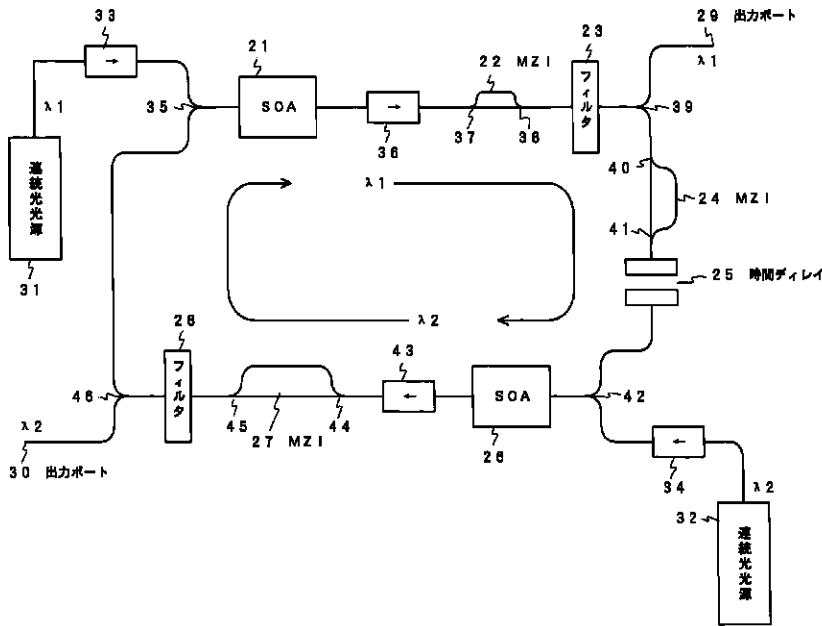
【 図 5 】



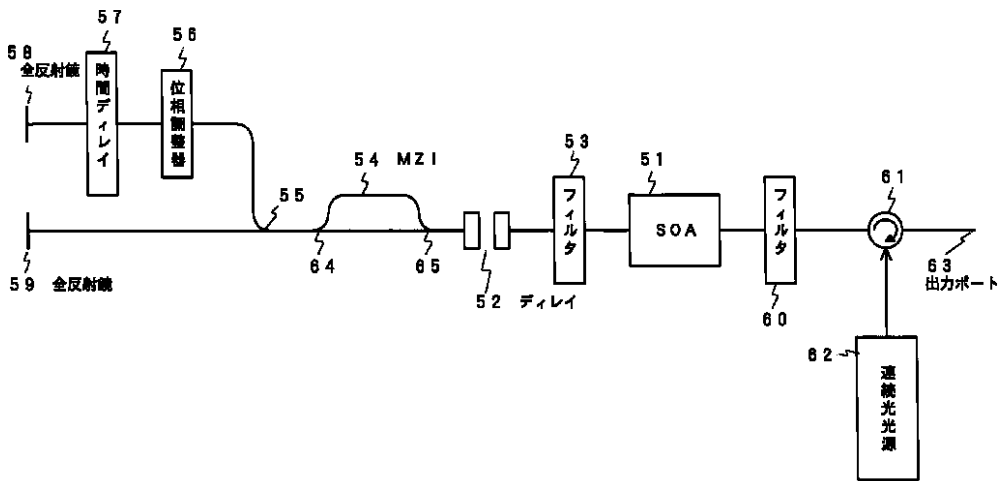
【 図 1 9 】



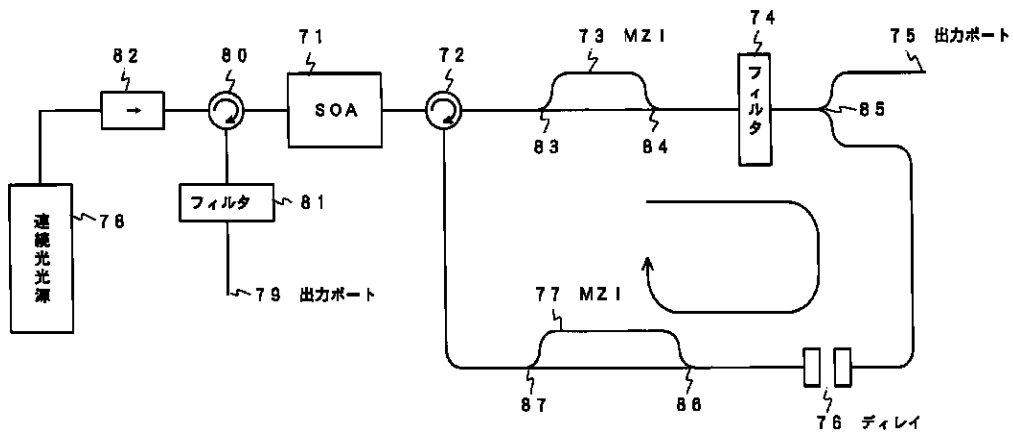
【図 6】



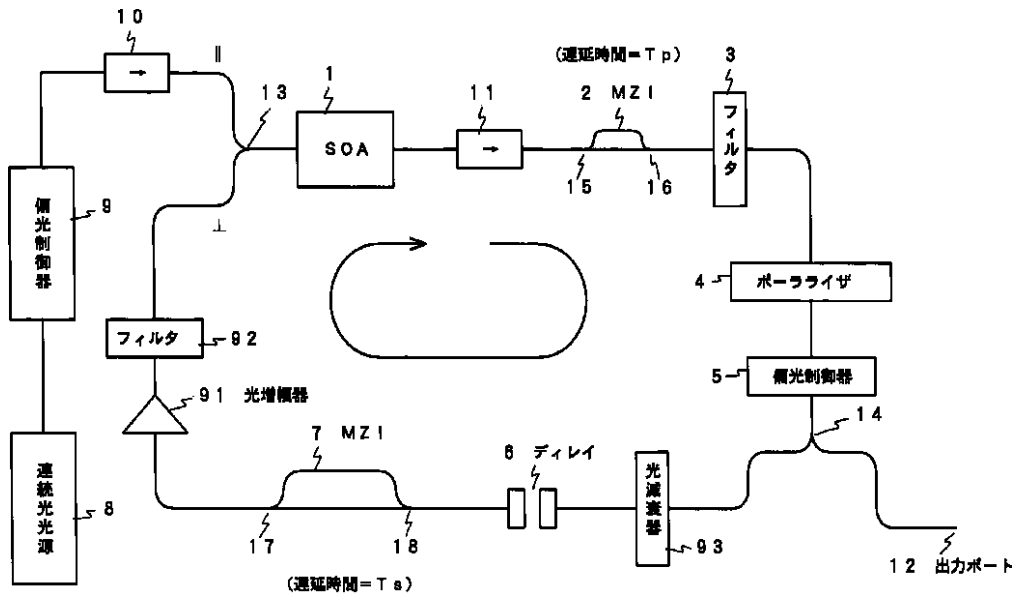
【図 7】



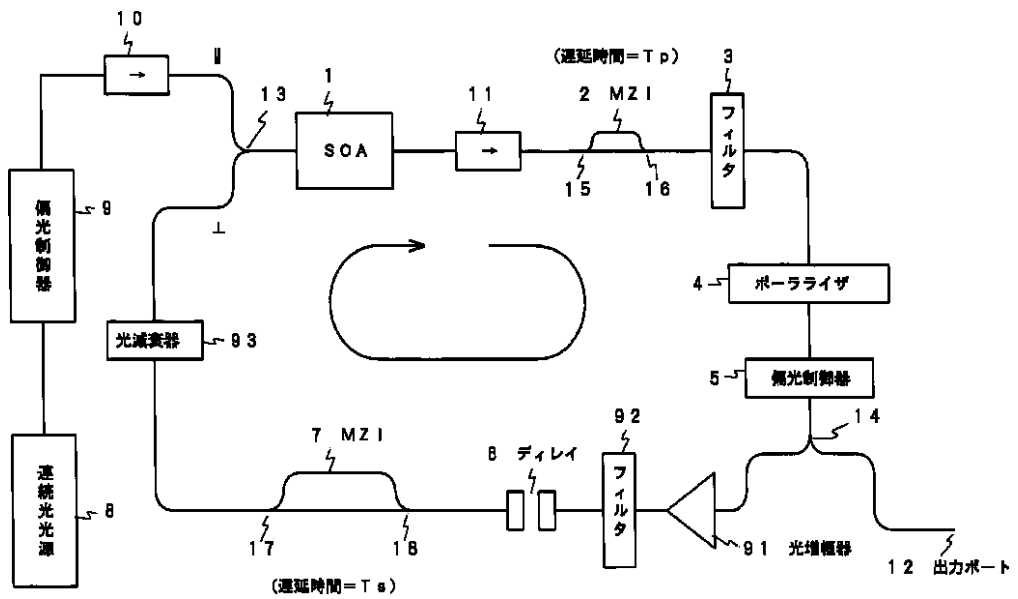
【図 8】



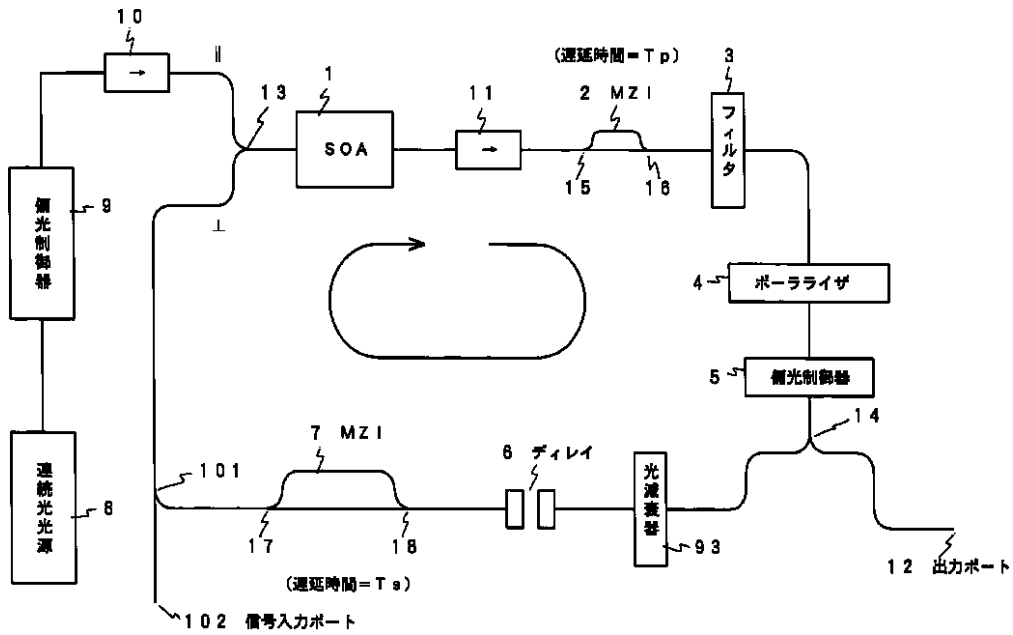
【図 9】



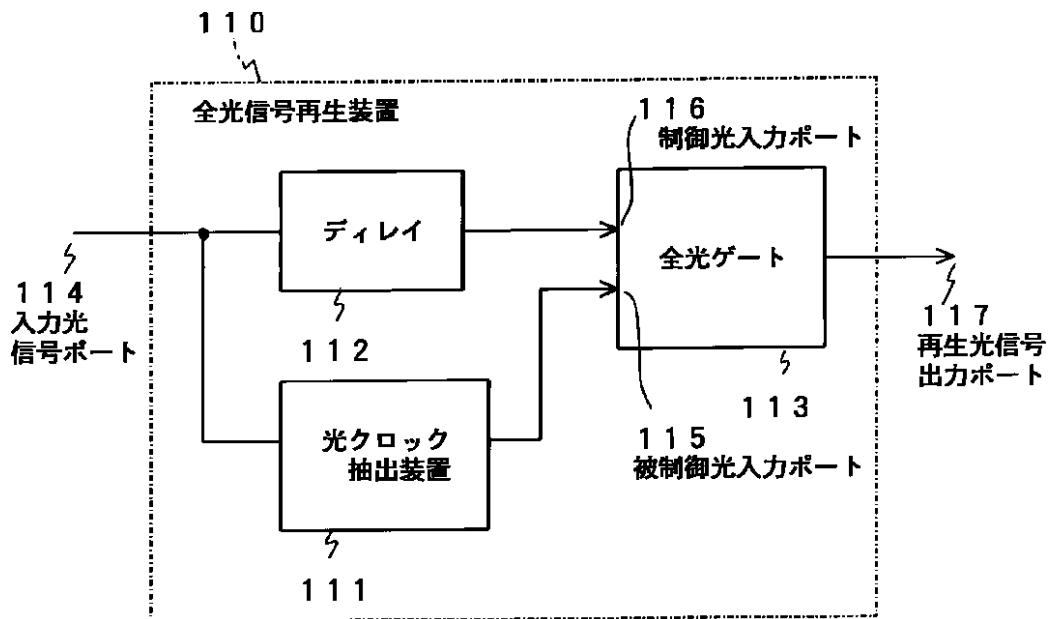
【図 10】



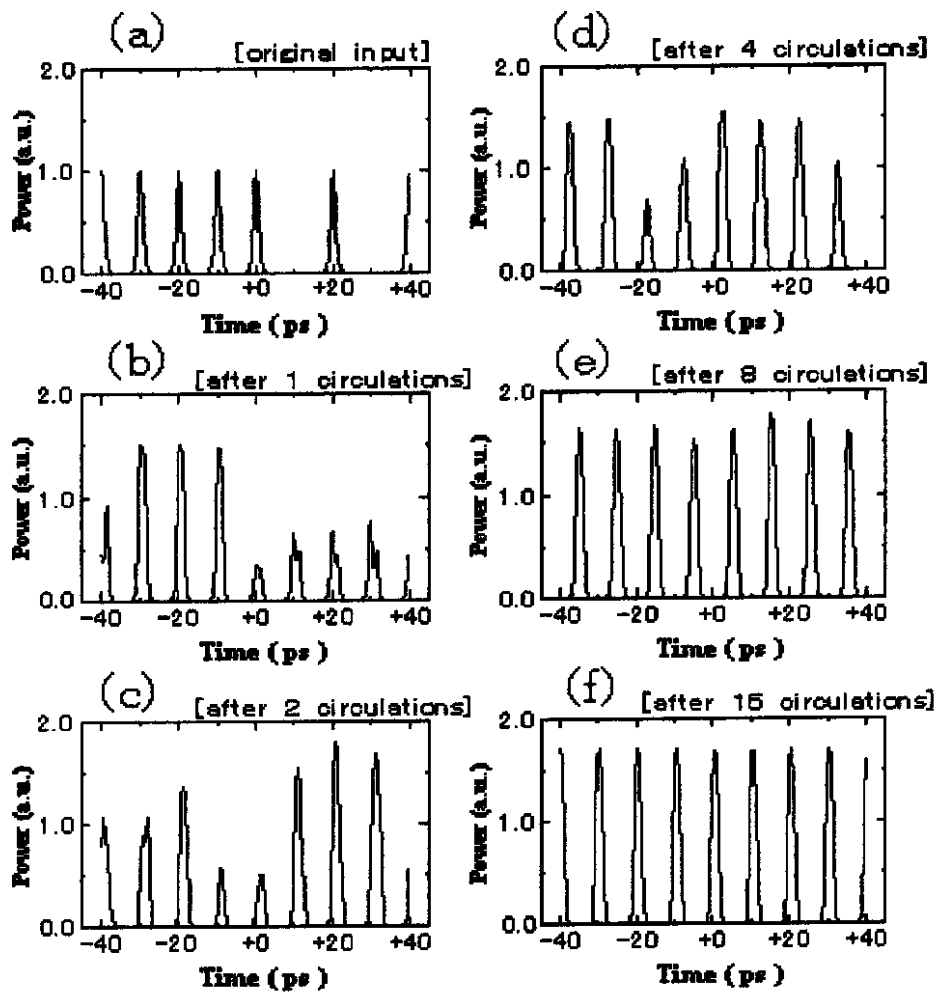
【図 11】



【図 13】



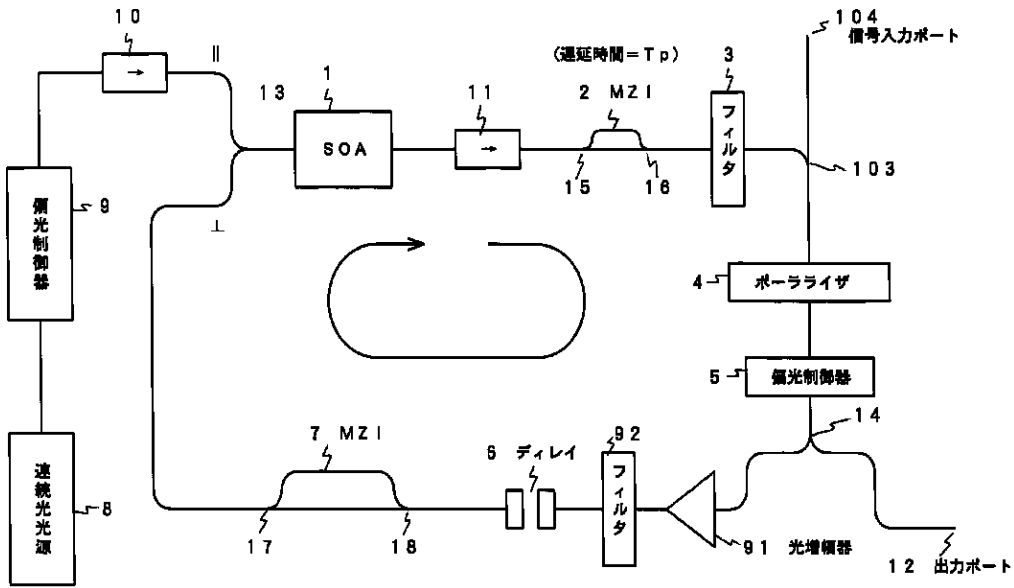
【図 12】



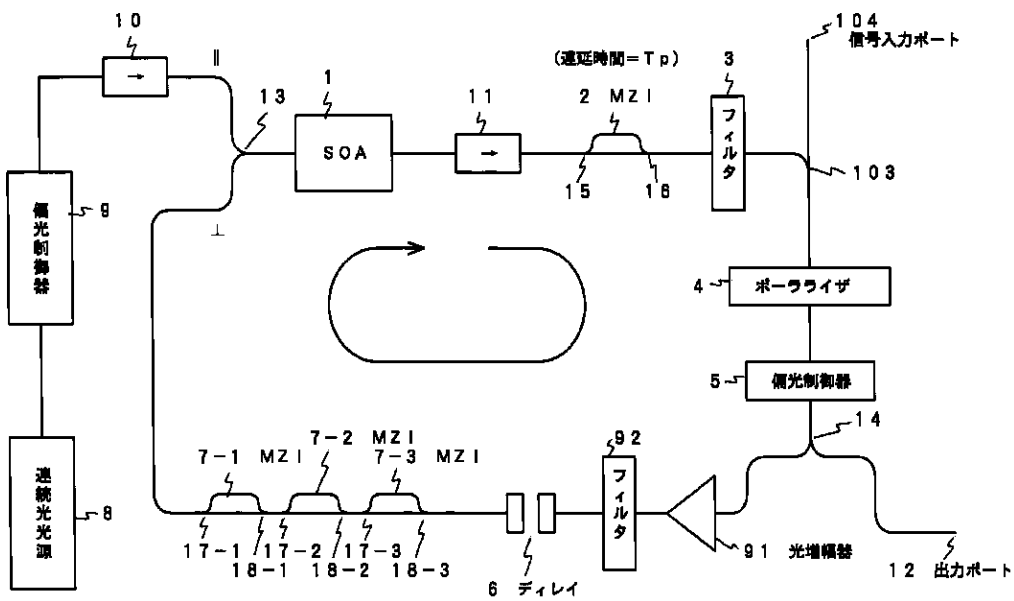
入力光信号: 1.5-ps 100-GHz “11110101” 固定ワード信号

出力光: 1.5-ps, 100-GHz 光クロック

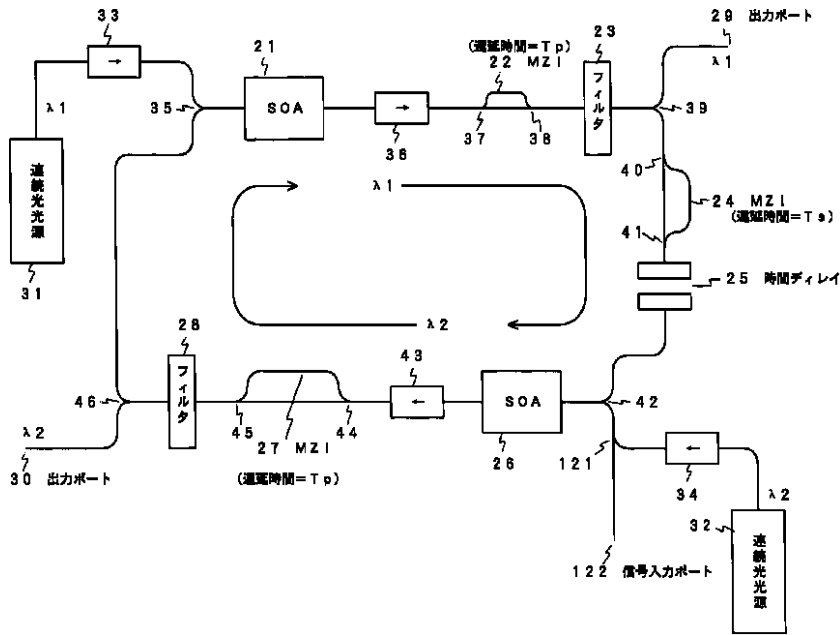
【図 14】



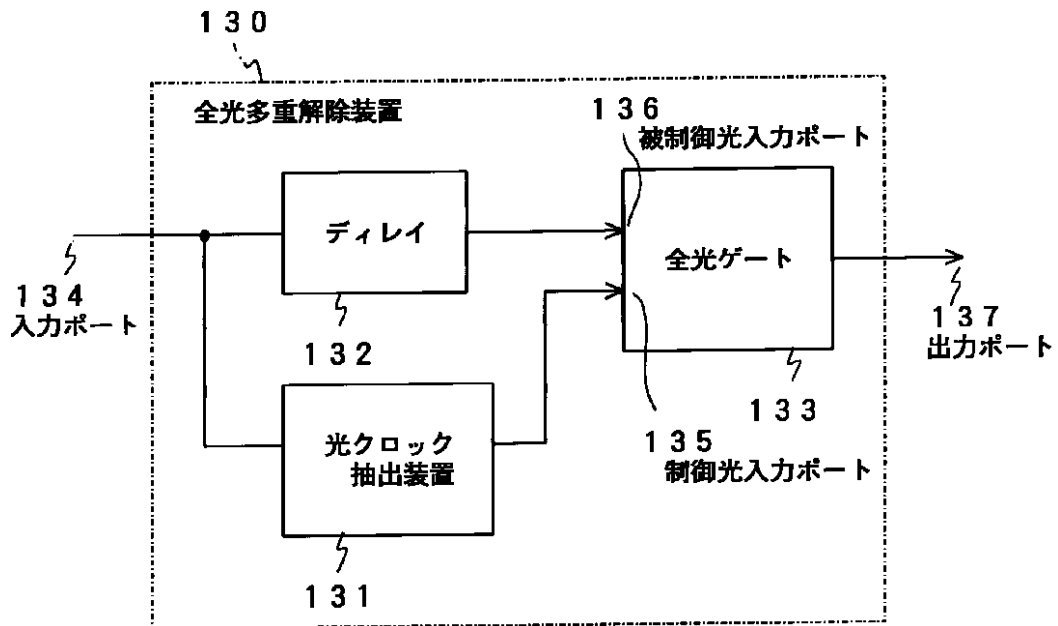
【図 15】



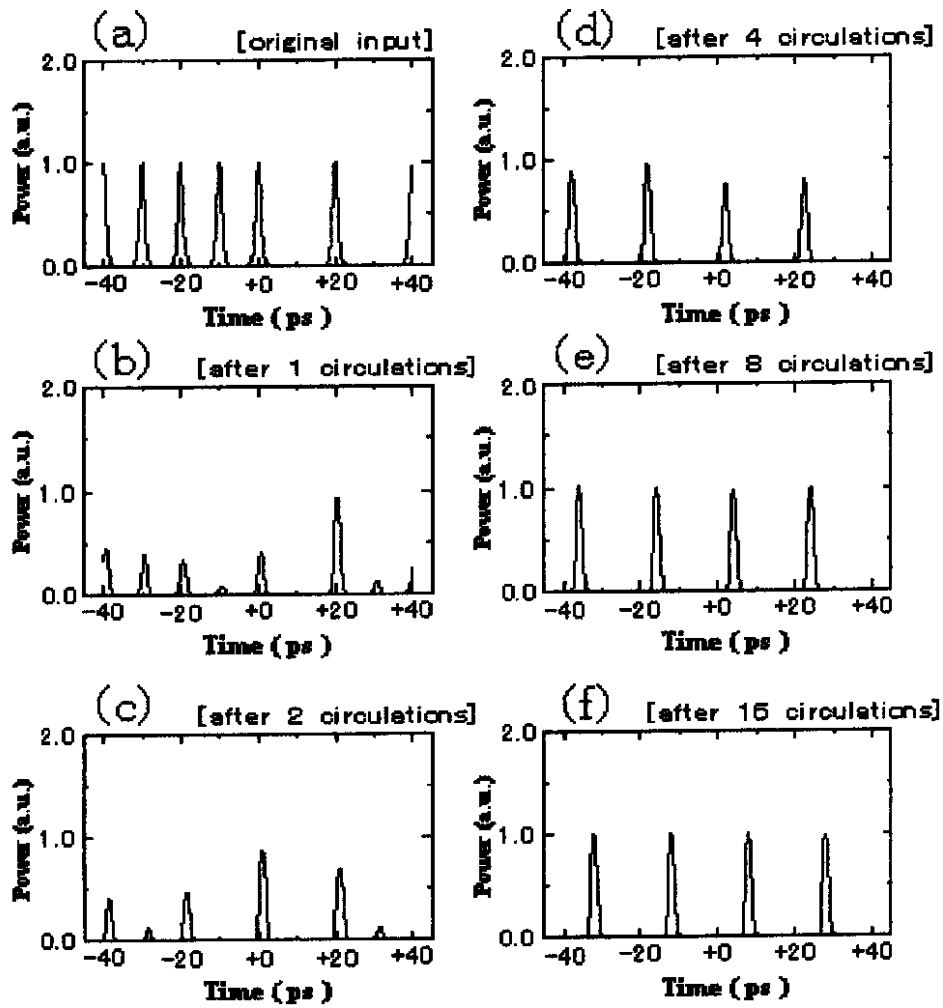
【図 16】



【図 20】



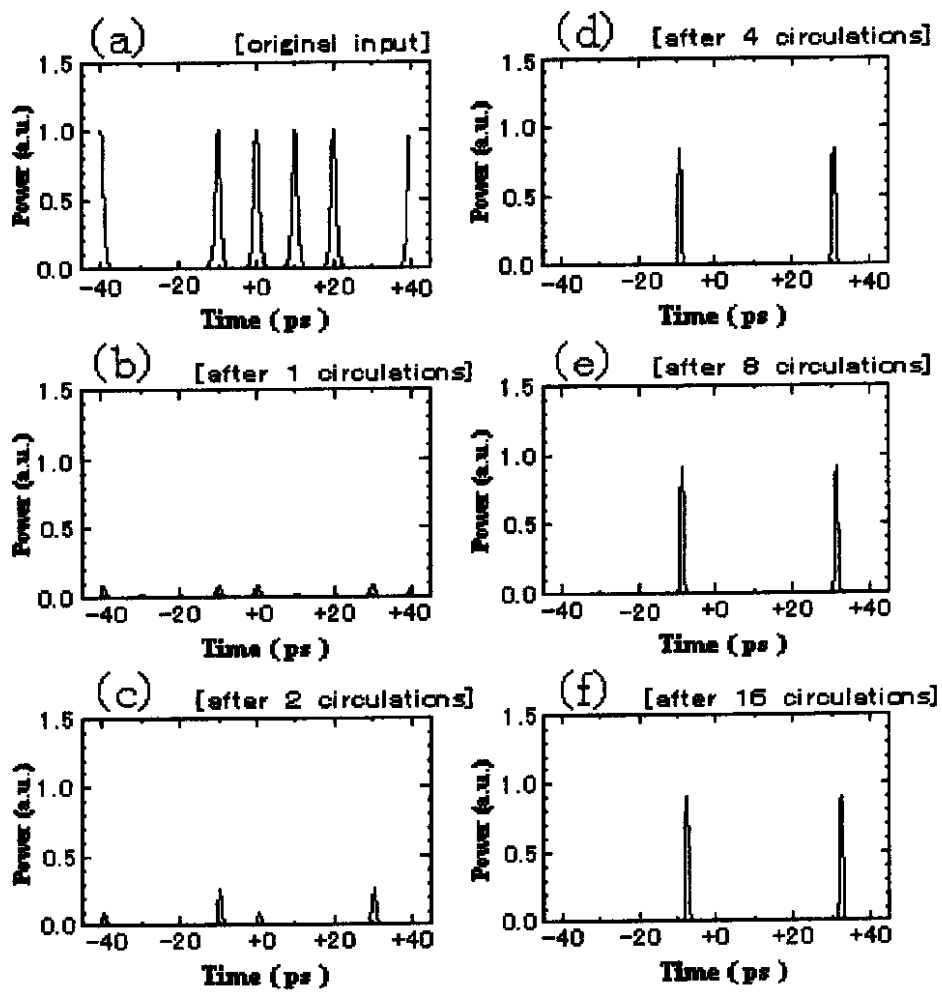
【図 17】



入力光信号: 1.5-ps 100-GHz “11110101” 固定ワード信号

出力光: 1.5-ps 50-GHz 光クロック

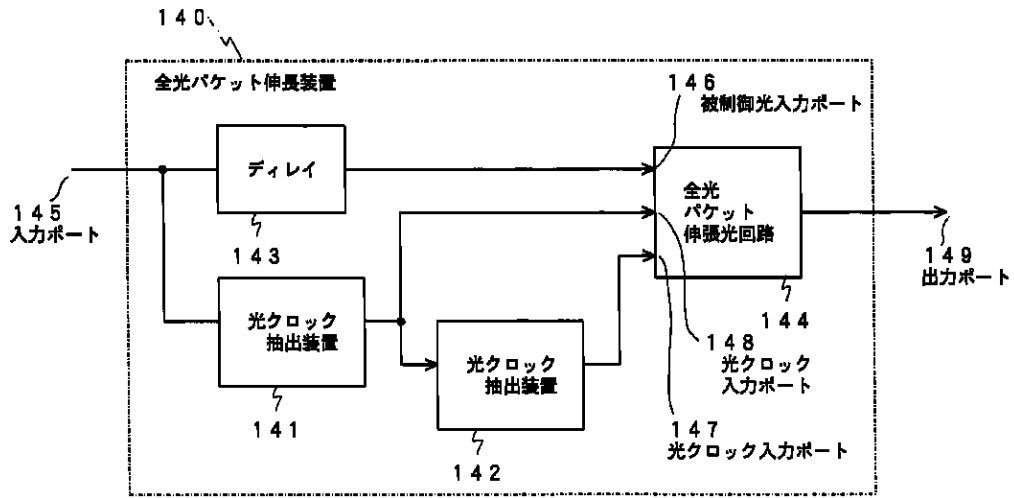
【図 18】



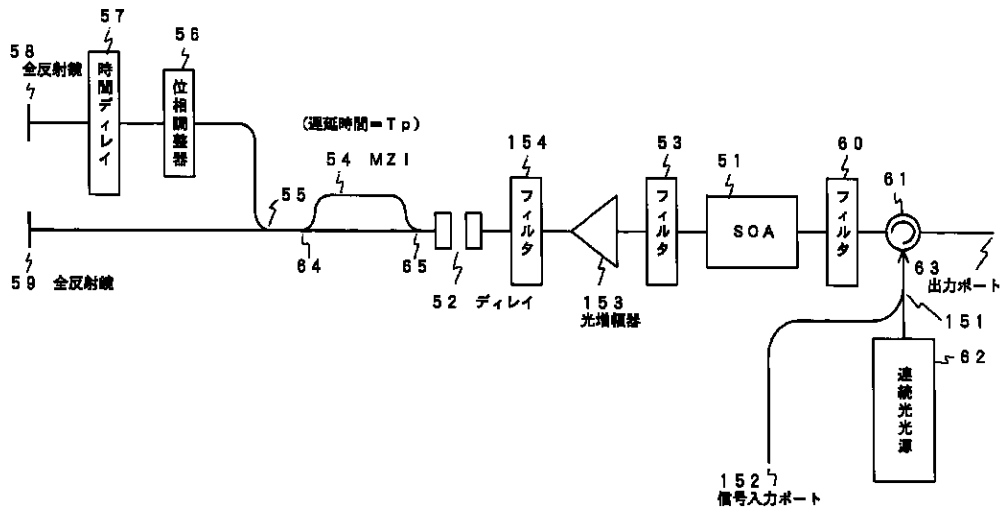
入力光信号: 1.5-ps 100-GHz “10010111” 固定ワード信号

出力光: 1.0-ps 25-GHz 光クロック

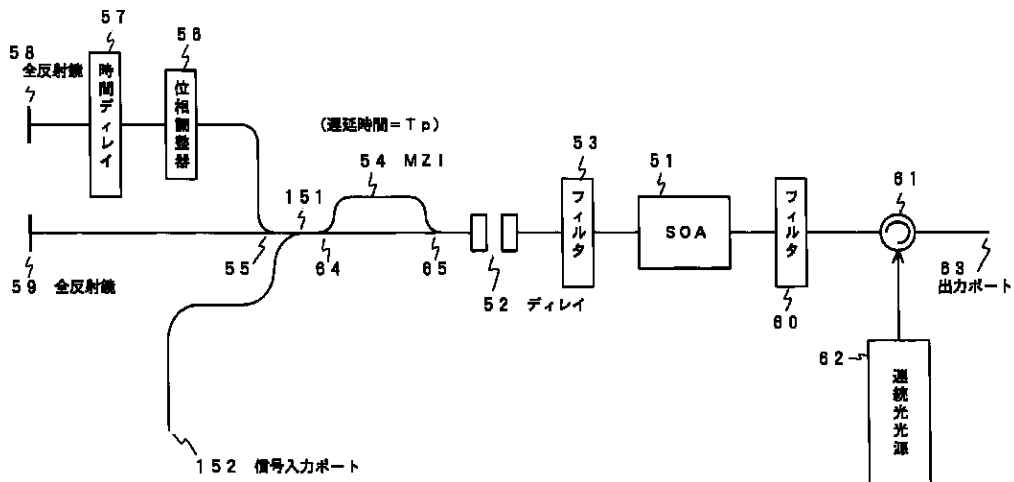
【図 2 1】



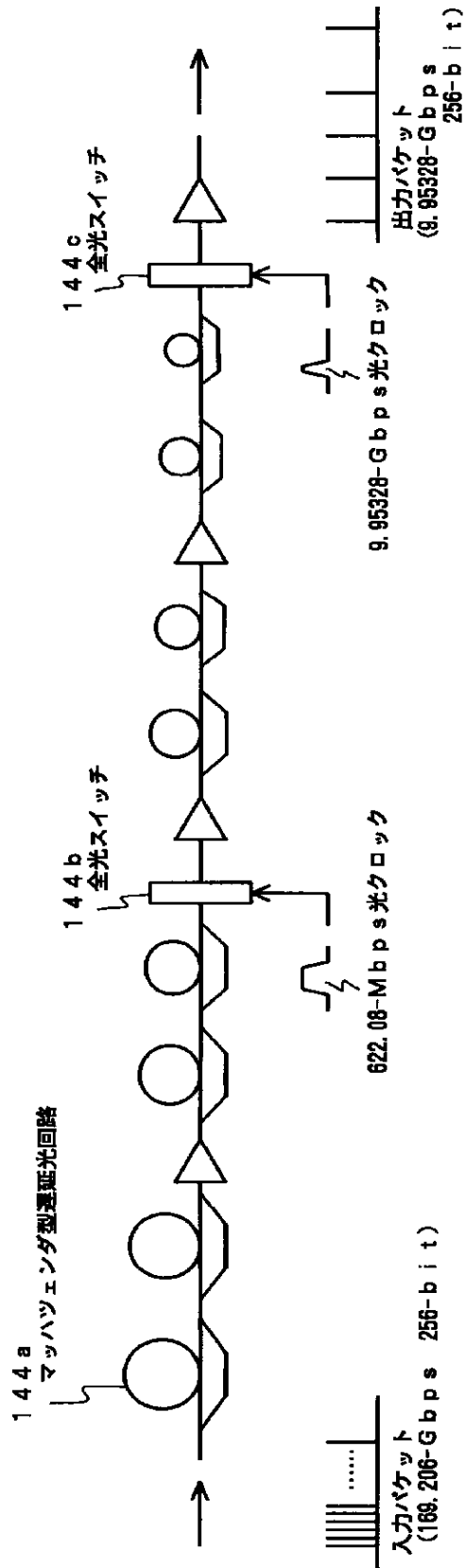
【図 2 3】



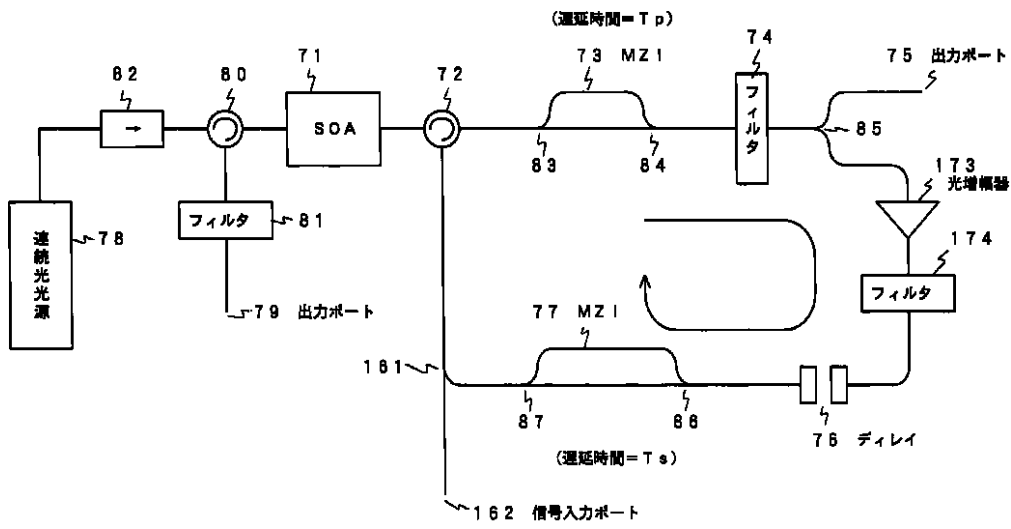
【図 2 4】



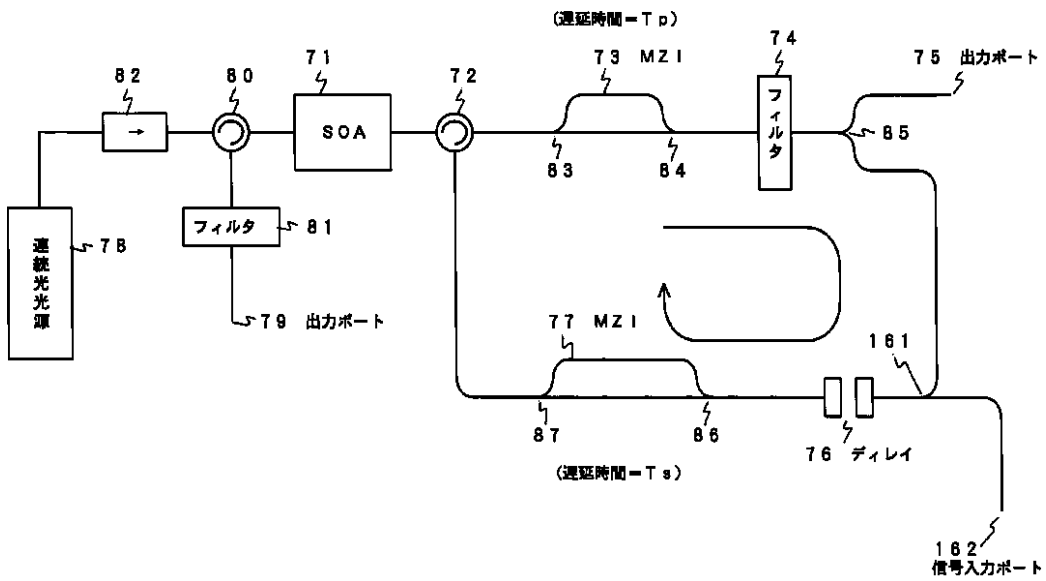
【図 2 2】



【図 2 5】



【図 2 6】



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, D B名)

- G02F 1/01
- H01S 5/50
- H04B 10/00
- H04J 14/08