

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-47781
(P2006-47781A)

(43) 公開日 平成18年2月16日(2006.2.16)

(51) Int. Cl.

G02F 1/035 (2006.01)

F I

G02F 1/035

テーマコード(参考)

2H079

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2004-229822 (P2004-229822)
(22) 出願日 平成16年8月5日(2004.8.5)

(71) 出願人 000183266
住友大阪セメント株式会社
東京都千代田区六番町6番地28
(71) 出願人 504132881
国立大学法人東京農工大学
東京都府中市晴見町3-8-1
(74) 代理人 100116687
弁理士 田村 爾
(72) 発明者 日隈 薫
東京都千代田区六番町6番地28 住友大
阪セメント株式会社内
(72) 発明者 森 慎吾
東京都千代田区六番町6番地28 住友大
阪セメント株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源

(57) 【要約】

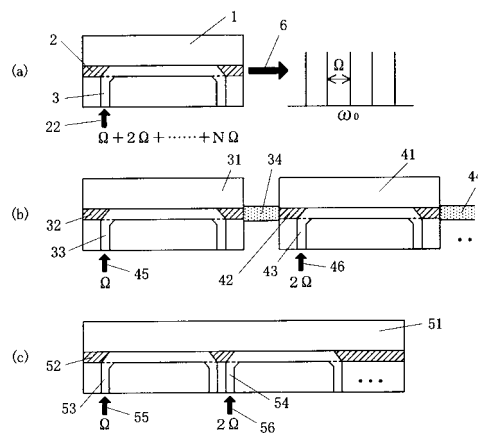
【課題】

光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源において、発生する光波の波長安定性に優れ、利用可能な波長の広帯域化を図ると共に、光出力が平坦化した多波長光を発生することが可能な光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源を提供すること。

【解決手段】

特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも1つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、該位相変調器は、複数の位相変調素子を特定波長光の伝播方向に対して直列に配置し、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とを各々の位相変調素子に印加することを特徴とする。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも 1 つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、

該光変調器は、複数の位相変調素子を特定波長光の伝播方向に対して直列に配置し、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とを各々の位相変調素子に印加することを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 2】

特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも 1 つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、

該光変調器は、同一基板上に形成された複数の位相変調部を、特定波長光の伝播方向に対して直列に配置しており、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とが各々の位相変調部に印加されることを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 3】

特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも 1 つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、

該光変調器は、2 つの分岐導波路を持つマツハツェンダ型導波路と、各分岐導波路に独立した電界を作用させる複数の変調電極とを有し、各変調電極には該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とに係る変調信号が印加され、かつ各分岐導波路を伝搬する光の位相差を調整するための調整手段を備えていることを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 4】

請求項 1 乃至 3 のいずれかに記載の光周波数コム発生装置において、該光変調器を伝搬する光に対する該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を 0.6 以下とするよう調整されていることを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の光周波数コム発生装置において、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度の調整が、各変調信号の信号出力又は各変調信号と光変調器を伝搬する光との作用長の少なくとも一方を調整することを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 6】

特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも 1 つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、

該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とを重畳して該光変調器に印加すると共に、該光変調器を伝搬する光に対する該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を 0.6 以下となるように、各変調信号の信号出力を調整することを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 7】

請求項 4 又は 6 に記載の光周波数コム発生装置において、各変調信号の変調強度の総和に対する該基本周波数変調信号の変調強度が、0.4 ~ 0.6 であることを特徴とする光周波数コム発生装置。

【請求項 8】

請求項 1 乃至 7 のいずれかに記載の光周波数コム発生装置を用いた多波長光源において、該光周波数コム発生装置に入射する特定波長光を発生する光源と、

10

20

30

40

50

該光周波数コム発生装置から出射する多波長の光を各波長毎に分離する分離手段とを有することを特徴とする多波長光源。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の多波長光源において、該光周波数コム発生装置と該分離手段との間に、光増幅器又は光等価器を介在させることを特徴とする多波長光源。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、波長分割多重方式(WDM)の光通信などで利用される光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源に関し、特に位相変調器などの光変調器を用いて形成する特定波長光の側帯波を利用した光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源に関する。

10

【背景技術】

【0002】

現在、光通信システムにおいては、光通信の高速化や大容量化が求められており、これを解決する手法の一つとして、多波長の光波を利用する波長分割多重方式(WDM)が利用されている。また光計測分野においても、光周波数の測定などにおいて、所定周波数の間隔で多波長の光波を発生する多波長光源が利用されている。

【0003】

従来が多波長光源では、特許文献 1 に示すように、異なる波長光を発生する複数のレーザ光源を利用し、位相変調器により各波長光の側帯波を発生させる方式が利用されている。

20

この方式は、共振型の光位相変調器にレーザ光を入射すると共に、周波数 f_m の変調信号で光位相変調器を駆動することにより、レーザ光の周波数を中心に低周波側と高周波側に周波数 f_m 間隔毎にレーザ光の側帯波を発生させる、所謂、光周波数コム発生装置が利用されている。そして、異なる波長光を発生する複数のレーザ光源を用い、各レーザ光毎に側帯波を発生させることにより、広帯域化を実現している。

【特許文献 1】特開平 8 - 166610 号公報

【0004】

特許文献 1 のように、複数のレーザ光源を利用するものにおいては、多波長の光波を安定的に維持するため、レーザ光源自体の発光波長や発光光量を安定に維持するだけでなく、各レーザ光源間の波長間隔も一定に保持する必要がある。このため、全てのレーザ光源の光量及び波長を精度良く制御するには、レーザ光源装置の高性能化や複雑な光源駆動回路を必要とし、装置全体が高コスト化する。

30

【0005】

他方、単一の光波を利用するが、側帯波をより多く発生させることにより、広帯域化を実現する試みもなされている。特許文献 2 では、光周波数オフセットロック制御系などの光計測分野に利用される多重光周波数コム発生器において、側帯波を発生させる光位相変調器に、基本周波数の変調信号と該基本周波数の自然数倍の周波数成分を有する高調波の変調信号とを重畳して印加し、側帯波の発生範囲を広くすることが開示されている。

40

【特許文献 2】特開平 9 - 258286 号公報

【0006】

特許文献 2 では、側帯波の発生範囲を拡大することに成功しているが、各側帯波の光出力は、低周波側又は高周波側に延びるに従い急激に減少しており、WDM 光通信などの多波長光源として利用するには、利用帯域幅が狭いという欠点がある。これを解消するには、共振型光位相変調器に入射するレーザ光の出力や該位相変調器に印加する変調信号の出力を増加させ、更に、光減衰器により、レーザ光の波長を中心に多波長光の光量を減衰させることにより、利用する多波長光の光出力を平坦化する必要がある。このため、レーザ光源や位相変調器の駆動回路などを高出力及び高性能化することが必要であり、しかも各機器の消費電力が増大するため、装置全体が高コストなものとなる。

50

【0007】

さらに、変調信号を位相変調器などの光変調器に印加する際に、光変調器を伝搬する光に対する該変調信号による変調効果は、該変調信号の周波数に大きく依存する傾向を示すため、複数の周波数成分を有する変調信号を利用する際には、特定周波数成分又は印加する周波数の中心成分などで最も高い変調効果が得られるように設定されているため、それ以外の周波数成分を有する変調信号は、十分な変調効果を達成することができないという不具合を生じていた。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明は、上述した問題を解決し、光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源において、発生する光波の波長安定性に優れ、利用可能な波長の広帯域化を図ると共に、光出力が平坦化した多波長光を発生することが可能な光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源を提供する。しかも、光周波数コム発生装置を構成する光変調器に印加される変調信号の各周波数に渡り変調効果を高め、装置全体を複雑化させず、さらに低コストな光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0009】

請求項1に係る発明では、特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも1つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、該光変調器は、複数の位相変調素子を特定波長光の伝播方向に対して直列に配置し、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とを各々の位相変調素子に印加することを特徴とする。

【0010】

また、請求項2に係る発明では、特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも1つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、該光変調器は、同一基板上に形成された複数の位相変調部を、特定波長光の伝播方向に対して直列に配置しており、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とが各々の位相変調部に印加されることを特徴とする。

【0011】

また、請求項3に係る発明では、特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも1つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、該光変調器は、2つの分岐導波路を持つマツハツェンダ型導波路と、各分岐導波路に独立した電界を作用させる複数の変調電極とを有し、各変調電極には該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とに係る変調信号が印加され、かつ各分岐導波路を伝搬する光の位相差を調整するための調整手段を備えていることを特徴とする。

【0012】

また、請求項4に係る発明では、請求項1乃至3のいずれかに記載の光周波数コム発生装置において、該光変調器を伝搬する光に対する該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を0.6以下とするよう調整されていることを特徴とする。

【0013】

また、請求項5に係る発明では、請求項4に記載の光周波数コム発生装置において、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度の調整が、各変調信号の信号出力又は各変調信号と光変調器を伝搬する光との作用長の少なくとも一方を調整することを特徴とする。

【0014】

10

20

30

40

50

また、請求項 6 に係る発明では、特定波長光を光変調器に入射すると共に、基本周波数を有する基本周波数変調信号と、該基本周波数の自然数倍の周波数を有する少なくとも 1 つの高調波変調信号とで該光変調器を駆動することにより多波長の光を発生する光周波数コム発生装置において、該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とを重畳して該光変調器に印加すると共に、該光変調器を伝搬する光に対する該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を 0.6 以下となるように、各変調信号の信号出力を調整することを特徴とする。

【0015】

また、請求項 7 に係る発明では、請求項 4 又は 6 に記載の光周波数コム発生装置において、各変調信号の変調強度の総和に対する該基本周波数変調信号の変調強度が、0.4 ~ 0.6 であることを特徴とする。

10

【0016】

また、請求項 8 に係る発明では、請求項 1 乃至 7 のいずれかに記載の光周波数コム発生装置を用いた多波長光源において、該光周波数コム発生装置に入射する特定波長光を発生する光源と、該光周波数コム発生装置から出射する多波長の光を各波長毎に分離する分離手段とを有することを特徴とする。

【0017】

また、請求項 9 に係る発明では、請求項 8 に記載の多波長光源において、該光周波数コム発生装置と該分離手段との間に、光増幅器又は光等価器を介在させることを特徴とする。

20

【発明の効果】

【0018】

請求項 1 に係る発明により、光変調器を複数の位相変調素子で構成すると共に、該位相変調素子を特定波長光の伝播方向に対して直列に配置し、基本周波数変調信号と高調波変調信号とを各々の位相変調素子に印加するため、印加する変調信号の周波数に応じた最適な位相変調素子が選択でき、光変調器に係る変調効率を向上させることが可能となる。具体的には、変調信号の周波数が高くなるに従い、変調信号としてマイクロ波の伝搬速度が低下することを防止するため、各位相変調素子毎に変調電極の高さを調整する方法や、変調電極の終端を開放した共振型変調電極を利用し、共振部分の変調電極の長さを変調信号の周波数毎に調整する方法などがある。

30

【0019】

請求項 2 に係る発明により、光変調器を同一基板上に形成された複数の位相変調部で構成し、該位相変調部を特定波長光の伝播方向に対して直列に配置し、基本周波数変調信号と高調波変調信号とが各々の位相変調部に印加されているため、各位相変調部の導波路の形状や変調電極の形状・配置など、各周波数に対応して最適な構造を選択することが可能となり、光変調器に係る変調効率を向上させることが可能となると共に、これらの位相変調部を同一基板上に形成するため、装置全体の構成の単純化も図ることが可能となる。

【0020】

請求項 3 に係る発明により、光変調器は、2 つの分岐導波路を持つマツハツェンダ型導波路と、各分岐導波路に電界を作用させる 2 つの変調電極で構成され、各変調電極には基本周波数変調信号と高調波変調信号とに係る変調信号を印加すると共に、各分岐導波路を伝搬する光の位相差を調整するための調整手段を備えているため、該調整手段を適切に調整することで、例えば、基本周波数変調信号に対し基本周波数の 2 倍の高調波変調信号を逆相状態で重畳した 2 つの変調信号を各変調電極に印加する（あるいは、基本周波数変調信号と高調波信号とを同一分岐導波路上の別々な変調電極に印加しても良い）共に、各分岐導波路を伝搬する光の位相差を調整することで、側帯波の偶数次成分のみを抑圧することが可能となり、基本周波数の 2 倍の周波数間隔の側帯波（多波長光）を発生させることが可能となる。このため、基本周波数の周波数を下げることができ、より低価格な低周波のマイクロ波発生器を利用することが可能となる。

40

50

【0021】

請求項4に係る発明により、光変調器を伝搬する光に対する基本周波数変調信号と高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を0.6以下とするよう調整されているため、WDM通信などで利用する際に許容される光出力の範囲、例えば、5dB以下の範囲における多波長光の本数をより多くし、多波長光における光量の平坦化及び広帯域化を実現することが可能となる。

【0022】

請求項5に係る発明により、基本周波数変調信号と高調波変調信号とによる変調強度の調整が、各変調信号の信号出力又は各変調信号と光変調器を伝搬する光との作用長の少なくとも一方を調整することで行われるため、装置全体の構造の複雑化を抑制すると共に、

10

低コスト化を図ることが可能となる。

【0023】

請求項6に係る発明により、基本周波数変調信号と高調波変調信号とを重畳して光変調器に印加すると共に、該光変調器を伝搬する光に対する該基本周波数変調信号と該高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を0.6以下となるように、各変調信号の信号出力が調整されているため、従来の光周波数コム発生装置に各変調信号の信号出力を調整する手段を組み込むだけで、多波長光における光量の平坦化及び広帯域化を実現でき、装置全体の構造の複雑化を抑制し、低コスト化も図ることができる。

【0024】

請求項7に係る発明により、各変調信号の変調強度の総和に対する基本周波数変調信号の変調強度が、0.4~0.6であるため、請求項4又は6に係る効果に加え、多波長光における許容光出力範囲内で連続する本数を、常に最適化することが可能となる。

20

【0025】

請求項8に係る発明により、請求項1乃至7のいずれかに記載の光周波数コム発生装置を用いた多波長光源であるため、多波長光における光量の平坦化及び広帯域化を実現すると共に、装置全体の複雑化や高コスト化を抑制した多波長光源を提供することが可能となる。

【0026】

請求項9に係る発明により、光周波数コム発生装置と分離手段との間に、光増幅器又は光等価器を介在させるため、分離手段から多波長光全体の光出力や波長毎の光出力を適切に調整することが可能となる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0027】

本発明に係る光周波数コム発生装置及びそれを利用した多波長光源について、以下に詳細に説明する。

図1は、本発明の光周波数コム発生装置に利用される光変調器である位相変調器の概略図である。

位相変調器は、電気光学効果を有する基板1上に、光導波路2を形成し、さらに、該導波路に電界を印加するための変調電極3及び接地電極(不図示)が配置されている。位相変調器には、レーザ光源などの定常光を発生する光源から出射された特定波長(基本周波数 ω_0)を有する光波5が入射され、他方、変調信号回路4を用いて変調電極3に所定周波数の変調信号を印加することにより、該変調信号に応じて導波路2を伝播する光波の位相変調を行う。位相変調された光波6は、位相変調器の導波路2の他端から出射される。

40

【0028】

電気光学効果を有する基板としては、例えば、ニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム、PLZT(ジルコン酸チタン酸鉛ランタン)、及び石英系の材料から構成され、具体的には、これら単結晶材料の、Xカット板、Yカット板、及びZカット板から構成され、特に、光導波路デバイスとして構成されやすく、かつ異方性が大きいという理由から、ニオブ酸リチウム(LN)を用いることが好ましい。また、図1ではZカット板を利用する例

50

を示す。

【0029】

基板上の導波路は、Tiなどを熱拡散法やプロトン交換法などで基板表面に拡散させることにより形成することができる。また、変調電極や変調電極を取り巻く接地電極などは、Ti・Auの電極パターンの形成及び金メッキ方法などにより形成することが可能である。さらに、必要に応じて光導波路形成後の基板表面に誘電体SiO₂等のバッファ層を設けることや、変調電極が形成する電界が効率的に導波路に印加されるようにリッジ構造を設けることも可能である。

【0030】

特許文献1又は2のように、従来の光周波数コム発生装置で用いる位相変調器は、図1の位相変調器の入射光側と出射光側とにハーフミラーを配置する、所謂、共振型の光位相変調器が利用されている。本発明では、このような共振型の光位相変調器を利用することも可能であるが、ハーフミラーを配置しない図1のような位相変調器でも、WDM光通信に十分利用可能な多波長光を発生することができる。

【0031】

図2は、本発明に係る光周波数コム発生装置で用いる変調信号回路を示すブロック図である。

信号発生器10からは基本周波数 f_0 を有するマイクロ波の電気信号が出力されており、該電気信号は分波器11により2つの電気信号18, 19に分けられる。電気信号18は、増幅器12及びパワー調整用減衰器13を経て、基本周波数 f_0 を有する電気信号20として、合波器17に入力される。

【0032】

他方、電気信号19は、通倍器14により、基本周波数 f_0 の自然数N倍の高調波に変換され、増幅器15及びパワー調整用減衰器16を経て、高調波周波数 Nf_0 を有する電気信号21として、合波器17に入力される。基本的には、自然数Nは2以上の任意の値を採用することが可能である。

なお、増幅器12, 15が精度良く増幅率を制御できる場合には、パワー調整用減衰器13, 16は特に設ける必要はない。

【0033】

また、複数の高調波を発生させるには、例えば、分波器11により分波される電気信号の数を3以上とすると共に、上述の高調波への変換を行う回路(上述の通倍器、増幅器、及びパワー調整用減衰器の組合せを「高調波変換回路」という)と同様な回路を2つ以上並列で配置し、分波された各電気信号を各々の高調波変換回路に導入することで、複数の異なる高調波を発生させることが可能となる。これに限らず、図2の通倍器14又は増幅器15の後段に別途の分波器を挿入し、該分波器で分波された電気信号を上述の高調波変換回路を用いて、他の周波数に再変換することも可能である。

【0034】

図2では、基本周波数 f_0 を有する電気信号20と、高調波周波数 Nf_0 を有する電気信号21とを合波器17により重畳し、重畳された電気信号を変調信号22として、図1に示す位相変調器に印加する。位相変調器にこのような変調信号が印加されると、図3(a)に示すように、位相変調器の導波路2の他端から出射する出射光6は、図3(a)の右側に示すような、基本周波数 f_0 に相当する周波数間隔を有する側帯波となる。

【0035】

本発明に係る光周波数コム発生装置において、基本周波数変調信号及び高調波変調信号を、位相変調器に印加する方法としては、上述したような方法に限らず、例えば、図3(b)(c)及び図4のように、多様な形態を採用することが可能である。

【0036】

図3(b)では、複数の位相変調素子を光波の伝播方向に対して直列に配置したものであり、各位相変調素子は、図1と同様に、電気光学効果を有する基板31, 41、導波路32, 42、変調電極33, 43を有している。さらに、各位相変調素子間は、光ファイ

10

20

30

40

50

バなどの光学素子 3 4 , 4 4 により接続されている。そして、各位相変調素子の変調電極には、基本周波数変調信号 4 5 (図 2 の符号 2 0)、高調波変調信号 4 6 (図 2 の符号 2 1) などが印加されている。

【 0 0 3 7 】

一般に、位相変調器などの光変調器においては、変調信号の周波数が変化すると、変調電極が形成する電界が導波路を伝搬する光波に及ぼす作用の強度(変調強度という)が変化する傾向にある。したがって、このように、光変調器を複数の位相変調素子で構成することにより、印加する変調信号の周波数に応じた最適な位相変調素子(導波路の形状や変調電極の形状・配置など)が選択でき、光変調器に係る変調効率を向上させることが可能となる。

10

具体的には、変調信号の周波数が高くなるに従い、変調信号としてマイクロ波の伝搬速度が低下することを防止するため、各位相変調素子毎に変調電極の高さを調整する方法や、変調電極の末端を開放した共振型変調電極を利用し、共振部分の変調電極の長さを変調信号の周波数毎に調整する方法などを利用して、各周波数に適合した位相変調素子を構成する。

【 0 0 3 8 】

図 3 (c) では、光変調器を同一基板 5 1 上に形成された複数の位相変調部(導波路 5 2 と変調電極 5 3 , 5 4 との作用部)で構成し、各位相変調部を光波の伝播方向に対して直列に配置し、基本周波数変調信号 5 5 と高調波変調信号 5 6 とが各々の位相変調部に印加されている。この構成により、各位相変調部の導波路の形状や変調電極の形状・配置など、各周波数に対応して最適な構造を選択することが可能となり、光変調器に係る変調効率を向上させることが可能となると共に、これらの位相変調部を同一基板上に形成するため、装置全体の構成の単純化を図ることも可能となる。

20

【 0 0 3 9 】

また、本発明では、以下で説明するように、光変調器を伝搬する光に対する基本周波数変調信号と高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を 0 . 6 以下、好ましくは、0 . 4 ~ 0 . 6 とすることにより、側帯波の光出力を平坦化及び広帯域化することを可能としたものであり、特に、図 3 (b) 又は図 3 (c) に示すように、基本周波数変調信号と高調波変調信号とを別々の変調電極に印加する場合には、例えば、変調電極と導波路との作用部の長さ(作用長という)を各位相変調素子又は各位相変調部毎に変更し、結果として、基本周波数変調信号が光波に及ぼす変調強度と、高調波変調信号が光波に及ぼす変調強度とを、上記関係に対応して調整することも可能である。

30

【 0 0 4 0 】

図 4 では、光変調器を、基板 6 1 上に 2 つの分岐導波路 6 3 , 6 4 を持つマツハツェンダ型導波路(6 2 ~ 6 5) と、各分岐導波路に電界を作用させる 2 つの変調電極 6 6 , 6 7 で構成している。そして、各変調電極には基本周波数変調信号と高調波変調信号とを重畳した変調信号 6 8 , 6 9 を印加すると共に、各分岐導波路を伝搬する光の位相差を調整するための調整手段を備えている。調整手段としては、変調信号 6 8 に重畳される DC バイアスを調整することにより、容易に実現することが可能である。なお、基本周波数変調信号と高調波変調信号とを同一分岐導波路上の別々の変調電極に印加する方法や、DC バイアスを印加する電極を、変調電極 6 6 とは別に設けることも可能である。

40

【 0 0 4 1 】

例えば、一方の変調電極には、基本周波数 を有する基本周波数変調信号に高調波周波数 2 を有する高調波変調信号を正の状態と重畳すると共に、DC バイアスを加えた変調信号を印加し、他方の変調電極には、基本周波数変調信号に高調波周波数 2 を有する高調波変調信号を負の状態(逆相状態)で重畳した変調信号を印加する。そして、調整手段である DC バイアスを適切に調整することで、例えば、図 4 の右側に示すように、側帯波の偶数次成分のみを抑圧し、基本周波数の 2 倍の周波数間隔を有する側帯波を発生させることが可能となる。このため、基本周波数の周波数を、必要とされる周波数間隔の半分の

50

周波数に下げることができ、より低価格なマイクロ波発生器を信号発生器 10 として利用することも可能となる。

【0042】

次に、図3(b)に示すように、光変調器を2つの位相変調素子のカスケード接続で構成し、各位相変調素子に、基本周波数変調信号と、基本周波数の2倍の高調波変調信号を印加した場合の実験例を示す。

実験条件としては、光変調素子として住友大阪セメント株式会社製の位相変調器を用い、レーザ光源には、波長が1550nm、光強度が0dBmを利用し、さらに、基本周波数変調信号には、周波数が8GHz、信号出力が28.14dBmを、高調波変調信号には、周波数が16GHz、信号出力が24.528dBmを利用した。

10

位相変調器から出射する多波長光を、光スペクトル分析器(アンリツ株式会社製)により計測した結果を、図5に示す。

【0043】

次に、上記実験結果を検証するため、図3(b)に示すように、光変調器を2つの位相変調素子のカスケード接続で構成し、各位相変調素子に、基本周波数変調信号と、基本周波数の2倍の高調波変調信号を印加した場合の位相変調器から出力される多波長光のスペクトル分布をシミュレーションした。

【0044】

シミュレーションの条件としては、特定波長(周波数 ω_0)の光波を、2つの周波数 ω_1 、 ω_2 で位相変調を行う場合の、光強度の周波数分布を求めた。ただし、 $\omega_1 = m\omega_0$ (高調波周波数、 m は自然数)、 $\omega_2 = 2\omega_0$ とし、 ω_0 は基本周波数を示す。また、各変調信号の出力に対応するパラメータとして、周波数 ω_1 (高調波周波数)の変調強度 ϕ_1 、周波数 ω_2 の変調強度 ϕ_2 を用い、2つの変調信号の位相差を θ とする。

20

これらの条件により、位相変調器から出力される光強度は、式(1)により与えられる。

【0045】

【数1】

$$\begin{aligned} & \exp\left[j\left\{\omega_0 t + \phi_1 \sin \Omega_1 t + \phi_2 \sin(\Omega_2 t + \theta)\right\}\right] \\ & = \exp[j\omega_0 t] \times \exp(j\phi_1 \sin \Omega_1 t) \times \exp\{j\phi_2 \sin(\Omega_2 t + \theta)\} \quad \dots (1) \end{aligned}$$

30

【0046】

式(1)をフーリエ変換すると、式(2)が得られる。

【0047】

【数2】

$$2\pi\delta(\omega - \omega_0) * \left[\sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(\phi_1) \delta(\omega - p\Omega_1) \right] * \left[\sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(\phi_2) e^{jq\theta} \delta(\omega - q\Omega_2) \right] \quad \dots (2)$$

40

【0048】

ここで、 $\omega_1 = m\omega_0$ 、 $\omega_2 = 2\omega_0$ と、 $mp + q = s$ とすると、式(3)が得られる。式(3)を基に、シミュレーションを行った結果を以下に示す。

【0049】

【数 3】

$$2\pi \sum_{s=-\infty}^{\infty} \left[\left\{ \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(\phi_1) J_{s-mp}(\phi_2) e^{-jimp\theta} \right\} e^{js\theta} \cdot \delta(\omega - \omega_0 - s\Omega_1) \right] \cdots (3)$$

【0050】

図5の実験結果と比較するため、シミュレーションの各パラメータの条件として、 $\omega_0 = c / \lambda_0$ (c は光速、 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$)、 $\Omega_1 = 8 \text{ GHz}$ 、 $m = 2$ 、 $P_1 = 128 \text{ mW}$ 、 $P_2 = 316 \text{ mW}$ 、 $\theta = 0$ を代入した結果を、図6に示す。 10

図6のシミュレーション結果は、図5の実験結果と比較して、かなり近似しており、本シミュレーションが、多波長光源のスペクトル分布を予測する上で、有効に機能していることが理解される。

【0051】

つぎに、多波長光の光出力の平坦化を実現するための最適条件を見出すため、基本周波数変調信号の出力に比例するパラメータである P_2 と、高調波変調信号の出力に比例するパラメータである P_1 との比を変更した場合における、光出力のスペクトル分布のピーク値から 5 dB 以内に含まれる側帯波の本数を計測した。

この場合の条件として、 $\omega_0 = c / \lambda_0$ (c は光速、 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$)、 $\Omega_1 = 8 \text{ GHz}$ 、 $m = 2$ 、 $\theta = 0$ とし、 $P_1 + P_2 = 1000 \text{ mW}$ を満たすように、 P_2 を 0 ~ 1000 mW の範囲で変化させた。 20

【0052】

図7には、 $P_2 = 501 \text{ mW}$ とした場合の光強度のスペクトル分布を示す。この場合には、37本の側帯波が光強度のピーク値から 5 dB 以内の範囲に含まれている。

次に、 P_2 を変化させた場合の 5 dB 以内に含まれる側帯波の本数がどのように変化するかを調べたところ、 $P_1 + P_2$ の値に対して P_2 が減少するに従い、5 dB 以内に含まれる側帯波の本数が増加する傾向にあることを、本発明の研究者は見出した。つまり、位相変調器を伝搬する光に対する基本周波数変調信号と高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を低下させるに 30 従い、多波長光の光出力の平坦化を効果的に実現することができる。

【0053】

さらに、上記シミュレーション結果を分析したところ、図8に示すように、 $P_2 = 316 \text{ mW}$ の場合には、グラフ中に矢印で示す部分の側帯波が、隣接する側帯波の光強度と比較し、極端に落ち込んでいることが理解される。このような部分は、WDM通信で使用しないか、あるいは、他の側帯波の光強度を減衰器などにより若干抑制することで、他の側帯波と同様に使用可能となるものである。

このため、このような光強度の歯抜け状態が発生し易い条件を見出すため、5 dB 以内に含まれる連続する側帯波の本数を計測したところ、図9に示す結果が得られた。

【0054】

図9を見ると、 P_2 が $P_1 + P_2$ の値に対して 0.6 ~ 0.4 の範囲にある場合には、比較的安定して、多くの側帯波が連続して 5 dB 以内に存在することが理解される。

つまり、光変調器を伝搬する光に対する基本周波数変調信号と高調波変調信号とによる変調強度が、各変調信号の変調強度の総和に対し、該基本周波数変調信号の変調強度を、0.6 ~ 0.4 の範囲とすることにより、多波長光における許容光出力範囲内で連続する本数を、より多く安定に確保することが可能となる。

【0055】

次に、上記光周波数コム発生器を用いた多波長光源の例を、図10に示す。

特定波長光を発生する光源として分岐帰還型半導体レーザ (DFB-LD) 81 を用い、該半導体レーザ 81 は、発光波長を安定化させるための絶対波長ロッカー 82 で制御さ 50

れている。80は、本発明に係る光周波数コム発生装置であり、光変調器83と変調信号を印加するRF回路84から構成されている。

【0056】

光源から出射する特定波長の光は偏波保持ファイバ87を利用して光周波数コム発生器80に入射し、コム光として該光周波数コム発生器から出射する。該出射光は光増幅器85によって増幅されたのち、必要に応じて各コム光の強度を均一化するための光等価器88を通った後、波長分離手段である分波器86に入射する。光等価器としてはファイバブラッググレーティングが用いられる。

また分波器としては、通常の回折格子やアレイ導波路格子が用いられる。また光等価器を分波器の後ろに配置してもよく、このときには分波した各チャンネルごとに光等価器として可変減衰器をつける構成もある。なお、分波器の透過周波数は固定されているため、分波器通過後の光パワーが変動しないよう、先に述べたような絶対波長ロッカーで光源の周波数を安定化させる必要がある。

【0057】

次に、1550nmで発振するDFBレーザーを、ガスセルを用いた波長ロッカーを用いて周波数20MHz以下に安定化させたのち、この光を、図4に示すマツハツェンダ型導波路の光変調器を有する光周波数コム発生器に入射した。この光周波数コム発生器には25GHzと50GHzの周波数のマイクロ波を重畳して印加すると共に、DCバイアスを調整した。該光周波数コム発生器から出射した50GHz間隔のコム光をEDFA(エルビウム・ドープ・ファイバー)を用いて23dB増幅した後、50GHz間隔で20チャンネルのアレイ導波路格子に入射して分波した。この分波した光をチャンネルごとに付けた可変減衰器で出力を 3 ± 1 dBm以内に均一化して、20チャンネルの多波長光源を得た。

【産業上の利用可能性】

【0058】

以上のように、本発明に係る光周波数コム発生装置により、光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源において、発生する光波の波長安定性に優れ、利用可能な波長の広帯域化を図ると共に、光出力が平坦化した多波長光を発生することが可能な光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源を提供することが可能となる。しかも、光周波数コム発生装置を構成する位相変調器に印加される変調信号の各周波数に渡り変調効果を高め、装置全体を複雑化させず、さらに低コストな光周波数コム発生装置及びそれを用いた多波長光源を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0059】

【図1】位相変調器の概略図である。

【図2】本発明に係る光周波数コム発生装置に利用される変調信号回路を示すブロック図である。

【図3】位相変調器の応用例を示す図である。

【図4】位相変調器の他の応用例を示す図である。

【図5】本発明に係る実験結果を示すグラフである。

【図6】図5の実験結果に対応するシミュレーション結果(光強度のスペクトル分布)を示すグラフである。

【図7】本発明に係るシミュレーション結果(光強度のスペクトル分布。 $P_2 = 501$ mW)を示すグラフである。

【図8】本発明に係るシミュレーション結果(光強度のスペクトル分布。 $P_2 = 316$ mW)を示すグラフである。

【図9】基本周波数変調信号と高調波変調信号との変調強度を変化させた場合の連続する側帯波の平坦化状態を示すグラフである。

【図10】本発明に係る光周波数コム発生装置を用いた多波長光源の例を示す。

【符号の説明】

10

20

30

40

50

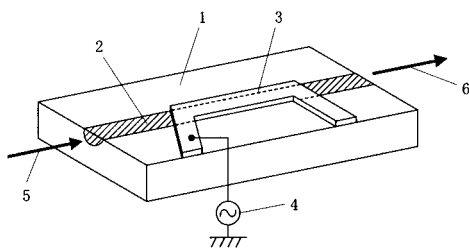
【 0 0 6 0 】

- 1 基板
- 2 導波路
- 3 変調電極
- 4 変調信号回路
- 5 入射光
- 6 出射光
- 1 0 信号発生器
- 1 1 分波器
- 1 4 通倍器
- 1 2 , 1 5 増幅器
- 1 3 , 1 6 パワー調整用減衰器
- 1 7 合波器
- 8 0 光周波数コム発生装置
- 8 1 光源
- 8 2 波長ロッカー
- 8 3 位相変調器
- 8 4 R F 回路
- 8 5 光増幅器
- 8 6 波長分離手段
- 8 7 偏波保持ファイバー
- 8 8 光等価器

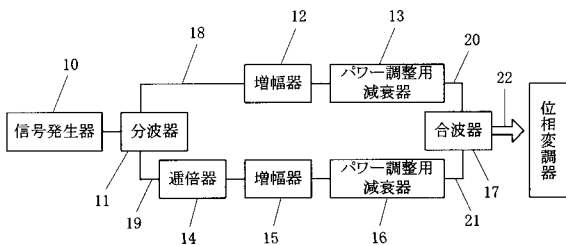
10

20

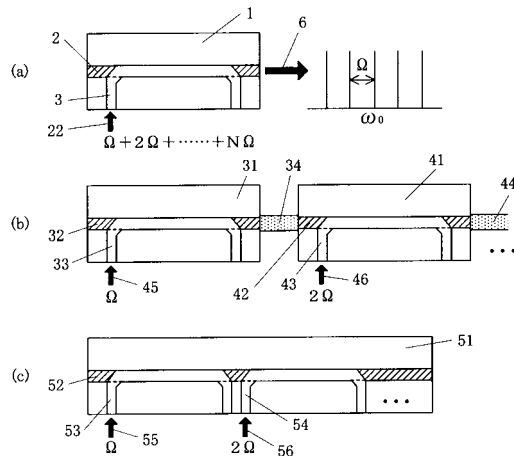
【 図 1 】



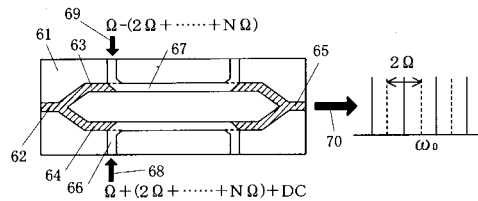
【 図 2 】



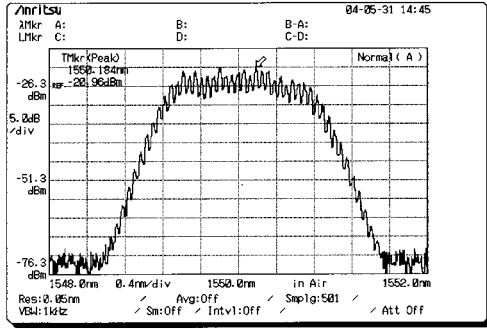
【 図 3 】



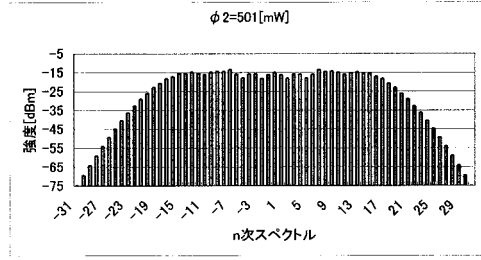
【 図 4 】



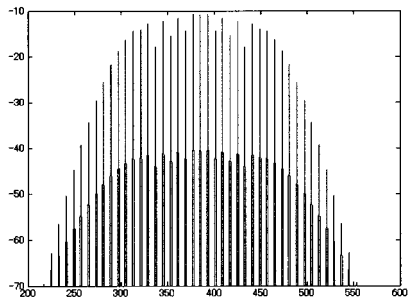
【 図 5 】



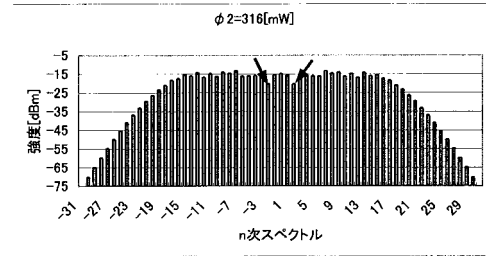
【 図 7 】



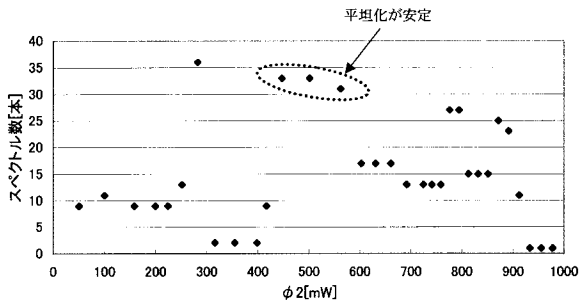
【 図 6 】



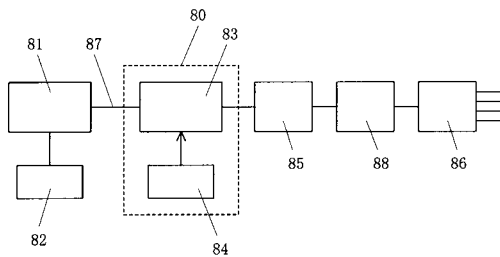
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



フロントページの続き

(72)発明者 黒川 隆志

東京都府中市晴見町3丁目8番地の1 国立大学法人東京農工大学内

Fターム(参考) 2H079 AA02 AA12 BA03 CA04 DA03 DA22 EA03 EA05 EB04 FA03
GA01 JA03