

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6286089号
(P6286089)

(45) 発行日 平成30年2月28日 (2018. 2. 28)

(24) 登録日 平成30年2月9日 (2018. 2. 9)

(51) Int. Cl. F I
G O 2 F 1/37 (2006. 01) G O 2 F 1/37

請求項の数 20 外国語出願 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2017-94700 (P2017-94700)	(73) 特許権者	515288122
(22) 出願日	平成29年5月11日 (2017. 5. 11)		ルーメンタム オペレーションズ エルエ
(65) 公開番号	特開2017-219834 (P2017-219834A)		ルシー
(43) 公開日	平成29年12月14日 (2017. 12. 14)		L u m e n t u m O p e r a t i o n s
審査請求日	平成29年6月27日 (2017. 6. 27)		L L C
(31) 優先権主張番号	15/177, 140		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95
(32) 優先日	平成28年6月8日 (2016. 6. 8)		035 ミルピタス ノース マッカーシ
(33) 優先権主張国	米国 (US)		ー ブルーヴァード 400
早期審査対象出願		(74) 代理人	100147485
			弁理士 杉村 憲司
		(74) 代理人	230118913
			弁護士 杉村 光嗣
		(74) 代理人	100174001
			弁理士 結城 仁美
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 カスケード光高調波発生

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザ光源により供給された光ビームからのカスケード高調波発生のためのカスケード高調波発生器であって、

前記光ビームに関連した残留ビームに基づく第2高調波光ビームを発生する第2高調波発生器と、

前記第2高調波光ビーム及び前記光ビームに基づく第3高調波光ビームを発生する第3高調波発生器であり、前記第2高調波発生器から上流の光路に位置決めされる第3高調波発生器と

を備え、前記光路に関連した高調波発生器遅延時間が、レーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍であるカスケード高調波発生器。

10

【請求項 2】

請求項1に記載のカスケード高調波発生器において、前記光路の光路長が、前記レーザ光源に関連したラウンドトリップ光路の光路長と整合するカスケード高調波発生器。

【請求項 3】

請求項1に記載のカスケード高調波発生器において、前記光路の光路長を調整する調整可能な機械コンポーネントをさらに備えたカスケード高調波発生器。

【請求項 4】

請求項1に記載のカスケード高調波発生器において、前記光路の長さが固定されているカスケード高調波発生器。

20

【請求項 5】

請求項 1 に記載のカスケード高調波発生器において、

前記第 3 高調波光ビーム及び第 2 基本光ビームに基づく第 4 高調波光ビームを発生する第 4 高調波発生器であり、前記第 3 高調波発生器から上流の前記光路に位置決めされる第 4 高調波発生器

をさらに備えたカスケード高調波発生器。

【請求項 6】

請求項 1 に記載のカスケード高調波発生器において、前記第 3 高調波発生器で、前記光ビームの第 1 パワー変動が前記第 2 高調波光ビームの第 2 パワー変動とほぼ同期するカスケード高調波発生器。

10

【請求項 7】

請求項 1 に記載のカスケード高調波発生器において、前記レーザ光源は固体レーザであるカスケード高調波発生器。

【請求項 8】

高調波発生器であって、

低次高調波光ビーム及びレーザ光源により供給された光ビームに基づく高次高調波光ビームを発生する高次高調波発生器と、

前記光ビームに関連した残留ビームに基づく前記低次高調波光ビームを発生する低次高調波発生器であり、前記高次高調波発生器から下流の光路にある低次高調波発生器とを備え、前記高調波発生器は、レーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である前記光路に関連した高調波発生器遅延時間を有する高調波発生器。

20

【請求項 9】

請求項 8 に記載の高調波発生器において、前記光路の光路長が、前記レーザ光源に関連したラウンドトリップ光路の長さとはほぼ等しい高調波発生器。

【請求項 10】

請求項 8 に記載の高調波発生器において、前記光路の光路長を調整するコンポーネントをさらに備えた高調波発生器。

【請求項 11】

請求項 8 に記載の高調波発生器において、前記光路の長さが調整不可能である高調波発生器。

30

【請求項 12】

請求項 8 に記載の高調波発生器において、前記低次高調波発生器は第 2 高調波結晶であり、前記高次高調波発生器は第 3 高調波結晶である高調波発生器。

【請求項 13】

請求項 8 に記載の高調波発生器において、前記低次高調波発生器は第 2 高調波結晶及び第 3 高調波結晶を含み、前記高次高調波発生器は第 4 高調波結晶である高調波発生器。

【請求項 14】

請求項 8 に記載の高調波発生器において、前記高次高調波発生器で、前記光ビームの第 1 パワー変動が前記低次高調波光ビームの第 2 パワー変動とほぼ同期する高調波発生器。

40

【請求項 15】

請求項 14 に記載の高調波発生器において、前記高次高調波光ビームの第 3 パワー変動が前記第 1 パワー変動及び前記第 2 パワー変動とほぼ同期する高調波発生器。

【請求項 16】

カスケード高調波発生器により光路に沿って光ビームを第 3 高調波発生器に伝播させるステップであり、前記光ビームはレーザ光源により供給されるステップと、

前記カスケード高調波発生器により前記光路に沿って光ビームを第 2 高調波発生器に伝播させて、前記光ビームに基づく第 2 高調波光ビームを発生させるステップであり、前記光ビームは、前記第 3 高調波発生器を伝播した後に前記第 2 高調波発生器を伝播するステップと、

前記カスケード高調波発生器により前記光路に沿って前記第 2 高調波光ビームを前記第

50

3 高調波発生器に伝播させるステップであり、前記第 2 高調波光ビームは、前記第 3 高調波発生器内で前記光ビームに重なって前記第 3 高調波発生器に前記第 3 高調波光ビームを発生させるステップと

を含み、前記光路に関連した遅延時間が、前記レーザ光源に関連したラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である方法。

【請求項 17】

請求項 16 に記載の方法において、前記光路の光路長が、前記レーザ光源に関連したラウンドトリップ光路の長さとはほぼ等しい方法。

【請求項 18】

請求項 16 に記載の方法において、

前記光路の光路長を、前記レーザ光源に関連したラウンドトリップ光路の光路長と整合するように調整するステップ
をさらに含む方法。

【請求項 19】

請求項 16 に記載の方法において、前記レーザ光源は、安定した不変の偏光軸で動作するように設計されたファイバレーザである方法。

【請求項 20】

請求項 16 に記載の方法において、前記第 3 高調波発生器で、前記光ビームの第 1 パワー 変動が前記第 2 高調波光ビームの第 2 パワー 変動及び前記第 3 高調波光ビームの第 3 パワー 変動とほぼ同期する方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、光源に関し、特にカスケード光高調波発生のための装置及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

光高調波を用いて、レーザ光をある波長からより短い波長、すなわちより高い周波数に変換することができる。例えば、周波数 2 倍化又は第 2 高調波発生（「SHG」）を用いて、近紫外光から可視光を得ることができる。さらに、第 3 高調波発生（「THG」）とも称する周波数 3 倍化を用いて、近紫外光から青色光、紫色光、及び紫外光（UV）を得ることができる。2 倍周波数光及び 3 倍周波数光を、続いて分光法、材料加工、光ポンピング等に用いることができる。

【0003】

カスケード非線形光学結晶を用いて、レーザ光の光周波数を 3 倍化することができる。図 1 を参照すると、従来技術のカスケード高調波 3 倍器 10 が例として示されている。カスケード高調波 3 倍器 10 は、順次配置された第 2 高調波結晶 12 及び第 3 高調波結晶 13 と、ダイクロイックミラー（又はフィルタ）15 とを含む。動作の際、光周波数 ω の基本光ビーム 11 が第 2 高調波結晶 12 に入射する。非線形変換効率が 100% 未満なので、基本光ビーム 11 の一部のみが周波数 2 倍化されることにより、第 2 高調波周波数 2ω の第 2 高調波ビーム 14 が基本光ビーム 11 の未変換部分 11A と共に第 2 高調波結晶 12 から出る。第 2 高調波ビーム 14 及び基本光ビーム 11 の未変換部分 11A は、第 3 高調波結晶 13 に入射し、第 3 高調波結晶 13 は、これらのビームの一部を第 3 高調波周波数 3ω の第 3 高調波ビーム 19 に変換する。したがって、3 つのビーム、つまり基本光ビーム 11 の未変換部分 11A の未変換部分 11B、第 2 高調波ビーム 14 の未変換部分 14A、及び第 3 高調波ビーム 19 が、第 3 高調波結晶 13 から出る。ダイクロイックミラー 15 は、基本ビーム部分 11B 及び第 2 高調波ビーム部分 14A を方向変換し、第 3 高調波ビーム 19 を所望の出力として透過させる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

従来技術のカスケード高調波3倍器10の1つの欠点は、妥当な変換効率を得るために、通常は基本ビーム11A及び第2高調波ビーム14を第3高調波結晶13に厳密に集束させる必要があることである。厳密な集束の1つの欠点は、基本ビーム11A及び第2高調波ビーム14の小さなスポット径が、ビームウォークオフ効果に起因してビーム品質を損なわせ得ることである。別の欠点は、 200 MW/cm^2 範囲のUVピークパワー密度及びワット範囲以上の平均パワーでの数十時間又は数百時間の露光後に、第3高調波結晶13の出力面の紫外線による劣化が生じ得ることである。

【課題を解決するための手段】

【0005】

いくつかの可能な実施態様によれば、レーザ光源により供給された光ビームからのカスケード光高調波発生のためのカスケード高調波発生器が、光ビームに関連した残留ビームに基づく第2高調波光ビームを発生する第2高調波発生器と、第2高調波光ビーム及び光ビームに基づく第3高調波光ビームを発生する第3高調波発生器であり、第2高調波発生器から上流の光路に位置決めすることができる第3高調波発生器とを含むことができ、光路に関連した高調波発生器遅延時間が、レーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である。

【0006】

いくつかの可能な実施態様によれば、高調波発生器が、低次高調波光ビーム及びレーザ光源により供給された光ビームに基づく高次高調波光ビームを発生する高次高調波発生器と、光ビームに関連した残留ビームに基づく低次高調波光ビームを発生する低次高調波発生器であり、高次高調波発生器から下流の光路にあることができる低次高調波発生器とを含むことができ、高調波発生器は、レーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である光路に関連した高調波発生器遅延時間を有することができる。

【0007】

いくつかの可能な実施態様によれば、方法が、カスケード高調波発生器により光路に沿って光ビームを第3高調波発生器に伝播させるステップであり、光ビームはレーザ光源により供給され得るステップと、カスケード高調波発生器により光路に沿って光ビームを第2高調波発生器に伝播させて、光ビームに基づく第2高調波光ビームを発生させるステップであり、光ビームは、第3高調波発生器を伝播した後に第2高調波発生器を伝播することができるステップと、カスケード高調波発生器により光路に沿って第2高調波光ビームを第3高調波発生器に伝播させるステップであり、第2高調波光ビームは、第3高調波発生器内で光ビームに重なって第3高調波発生器に第3高調波光ビームを発生させることができるステップとを含むことができ、光路に関連した遅延時間が、レーザ光源に関連したラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】従来技術のカスケード3倍器の概略ブロック図を示す。

【図2】本開示のカスケード第3高調波発生器の概略ブロック図を示す。

【図3】図3Aは、図2のカスケード高調波発生器の基本光ビームの光路を示す。図3Bは、図2のカスケード高調波発生器の第2高調波ビームの光路を示す。図3Cは、図2のカスケード高調波発生器の第3高調波ビームの光路を示す。

【図4】図2のカスケード第3高調波発生器を組み込んだ本開示のカスケード第4高調波発生器の概略ブロック図を示す。

【図5】図5Aは、図4のカスケード高調波発生器の基本光ビームの光路を示す。図5Bは、図4のカスケード高調波発生器の第2高調波ビームの光路を示す。図5Cは、図4のカスケード高調波発生器の第3高調波ビームの光路を示す。図5Dは、図4のカスケード高調波発生器の第4高調波ビームの光路を示す。

【図6】カスケード高調波発生器の概略ブロック図を示す。

【図 7】基本光のパルス光源を含む図 6 のカスケード高調波発生器の概略ブロック図を示す。

【図 8】傾斜した第 3 高調波結晶を用いたカスケード第 3 高調波発生器の一実施形態の概略ブロック図を示す。

【図 9】図 9 A は、図 1 の周波数 3 倍器の計算変換効率図を示す。図 9 B は、図 9 A との比較のための、図 2 の第 3 高調波カスケード発生器の計算変換効率図を示す。

【図 10】本開示によるカスケード光高調波発生の方法の実施形態のフローチャートを示す。

【図 11】本開示によるカスケード光高調波発生の方法の実施形態のフローチャートを示す。

10

【図 12】図 12 A は、レーザ光源のラウンドトリップタイムとほぼ等しくなくそのほぼ整数倍でもない遅延時間を有するカスケード光高調波発生器の、光信号の非整列波形の一例を示すグラフ図である。図 12 B は、レーザ光源のラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である遅延時間を有するカスケード光高調波発生器の、光信号の整列波形の一例を示すグラフ図である。

【図 13】非線形光ループ長の例示的範囲におけるカスケード光高調波発生器の例示的変換効率を示すグラフ図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

本教示をさまざまな実施形態及び例と共に説明するが、本教示をそのような実施形態に限定することは意図されない。それとは逆に、当業者には理解されるように、本教示はさまざまな代替形態及び等価物を包含する。

20

【0010】

図 2 を参照すると、第 3 高調波発生器 20 が、第 2 高調波光ビームを発生する第 2 高調波結晶 26、第 3 高調波光ビームを発生する第 3 高調波結晶 28、第 1 ビームコンバイナ 25、及び第 1 ビームスプリッタ 27 を含み得る。第 1 ビームコンバイナ 26 は、2 つのダイクロイックミラー 25 A を含み得る。ダイクロイックミラー 25 A は、図 2 に「1 T 2 R フィルタ」で示されており、これは便宜上、基本（「1」）光周波数 ω を透過させ（「T」）且つ 2 倍（「2」）光周波数 2ω を反射する（「R」）ことを表す。第 1 ビームスプリッタ 27 は、上側ダイクロイックミラー 27 A 及び下側ダイクロイックミラー 27 B を含み得る。同様に、上側ダイクロイックミラー 27 A は、「1 R 2 R 3 T フィルタ」で示されており、これは、基本（「1」）光周波数 ω を反射し（「R」）、2 倍（「2」）光周波数 2ω を反射し（「R」）、且つ 3 倍（「3」）光周波数 3ω を透過させる（「T」）ことを表す。下側ダイクロイックミラー 27 B は、「1 R 2 T フィルタ」で示されており、これは、基本（「1」）光周波数 ω を反射し（「R」）且つ 2 倍（「2」）光周波数 2ω を透過させる（「T」）ことを表す。明細書及び図面の残りの部分全体にわたって、上記ミラー表記法に従う。

30

【0011】

第 1 ビームコンバイナ 25 では、2 つの同様のダイクロイックミラー 25 A である上側及び下側ダイクロイックミラー 25 A を用いて、基本光周波数 ω の第 1 基本光ビーム 21 を 2 倍光周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 22 と合成することができる。第 3 高調波結晶 28 を第 1 ビームコンバイナ 25 の上側ダイクロイックミラー 25 A に結合して、基本光周波数 ω の第 1 基本光ビーム 21 及び 2 倍光周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 22 から 3 倍光周波数 3ω の第 3 高調波光ビーム 23 を発生することができる。3 倍光周波数 3ω の第 3 高調波光ビーム 23 の発生時に、基本光周波数 ω の残留基本光ビーム 21 A が第 3 高調波結晶 28 から出て、第 1 ビームスプリッタ 27 の上側フィルタ 27 A を介して第 1 ビームスプリッタ 27 の下側フィルタ 27 B へ、またさらに第 2 高調波結晶 26 を通して指向されることができ、第 2 高調波結晶 26 において、残留基本光ビーム 21 A を用いて第 2 高調波光ビーム 22 を発生することができる。残留基本光ビーム 21 A の残留ビーム 21 B を、第 1 ビームコンバイナ 25 の下側ダイクロイックミラー 25 A を通して指向させ

40

50

、任意の光ビームダンプ 29 A (図 2 の左下) により吸収させることができる。2 倍光周波数 2ω の第 3 高調波結晶 28 からの残留第 2 高調波ビーム 22 A を上側ダイクロイックミラー 27 A により反射させて、下側ダイクロイックミラー 27 B を通して別の任意の光ビームダンプ 29 B (図 2 の右下) へ伝播させることができる。第 2 高調波結晶 26 の左の第 2 高調波光ビーム 22 を第 1 ビームコンバイナ 25 に結合し、本段落の最初で述べたように、第 1 ビームコンバイナ 25 を用いて、第 1 基本光ビーム 21 を第 2 高調波光ビーム 22 と合成して第 3 高調波光ビーム 23 を発生することができる。

【0012】

基本光周波数 ω の第 1 基本光ビーム 21、2 倍光周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 22、及び 3 倍光周波数 3ω の第 3 高調波光ビーム 23 の光路は、図 3 A ~ 図 3 C を参照することによってより容易に辿ることができる。図 3 A において、基本光周波数 ω の第 1 基本光ビーム 21 が順に、第 3 高調波結晶 28 を伝播し、続いて残留基本光ビーム 21 A として第 2 高調波結晶 26 を伝播し、続いて残留基本光ビーム 21 A の残留ビーム 21 B として左側の光ビームダンプ 29 A へ指向される。図 3 B において、2 倍光周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 22 が、第 2 高調波結晶 26 で発生し、第 3 高調波結晶 28 を伝播し、残留第 2 高調波光ビーム 22 A として右側の光ビームダンプ 29 B へ指向される。図 3 C において、第 3 高調波光ビーム 23 が、第 3 高調波結晶 28 で発生し、第 3 高調波発生器 20 の出力へ指向される。

【0013】

基本的に、上記プロセスは、少なくとも以下の理由で図 1 の従来技術の周波数 3 倍器 10 よりも高い変換効率を提供することができる。第 3 高調波変換効率は、基本光周波数 ω 及び 2 倍光周波数 2ω の入力パワー密度の積にほぼ依存する。図 1 の従来技術の周波数 3 倍器 10 では、第 3 高調波結晶 13 に対する全パワー入力が第 3 高調波発生器に対する全パワー入力 P に限定されるが、その理由は、第 2 高調波結晶 12 が ω の入力パワー P の一部を 2ω に変換するが、全パワーは実質的に不変のままだからである。通常、 ω 及び 2ω から 3ω への最適変換を行うことができるのは、 ω のパワーが約 $0.4P$ 、 2ω のパワーが約 $0.6P$ 、且つ積が $0.24P^2$ の場合である。図 2 の第 3 高調波発生器 20 では、第 3 高調波結晶 28 における入力が ω での $1.0P$ と通常は 2ω での約 $0.6P$ とからなることにより、積は約 $0.6P^2$ となることができ、これは従来技術の第 3 高調波 3 倍器 10 よりも 2.5 倍大きい。 ω のパワーの大半を 2 回、つまり第 1 に THG プロセスで、第 2 に SHG プロセスで用いることができるので、第 3 高調波結晶 28 に対する全光パワー入力は実際には P よりも大きい。その結果、パワー密度、したがって変換効率を従来技術の第 3 高調波 3 倍器 10 よりもはるかに高くすることができる。

【0014】

図 3 A ~ 図 3 C を一時的に再度参照すると、例えば下側ダイクロイックミラー 25 A の使用により、又は何らかの他の適当なフィルタにより、残留基本光ビーム 21 B が第 3 高調波結晶 28 に再進入するのを防止して、潜在的な光干渉効果を回避することができる。同様に、例えば下側フィルタ 27 B の使用により、又は何等かの他の適当なフィルタにより、残留第 2 高調波光ビーム 22 A が第 2 高調波結晶 26 に再進入するのを防止することができる。換言すれば、基本光ビーム 21 及び第 2 高調波光ビーム 22 の光路は、個々の光周波数で閉ループを形成しないように、すなわち開ループを形成する (an open loop) ように、又は個々の光周波数で光学キャビティを形成しないように構成することができる。個々の光周波数での閉ループ又は光学キャビティの回避により、第 2 及び第 3 高調波発生プロセスの安定性を促進することができる。

【0015】

第 2 高調波結晶 26 及び第 3 高調波結晶 28 は、波長、パワーレベル、又は他のパラメータに応じて異なる材料を含むことができる。SHG 及び THG に関する位相整合には、多くの種類、タイプ I 又はタイプ II、臨界又は非臨界、コリニア又はノンコリニアがあり得る。例えば周期的分極材料を用いた擬似位相整合も選択肢であり得る。ダイクロイック又はトリクロイック薄膜フィルタ、偏光フィルタ、吸収フィルタ、プリズム、格子、又

10

20

30

40

50

は他のフィルタ若しくはミラーといった、各種ミラー又は光学フィルタを用いて、ビーム 2 1、2 2、及び 2 3 を分離又は合成することができる。フィルタ、結晶、ミラー等のさまざまな順序及び組み合わせを用いることができる。波長板、非平面ビーム経路、又はレンズを適当な場所に含めて、変換構成の詳細に応じて所望の偏光状態又はビームサイズ若しくはプロファイルを提供することができる。反射防止コーティング又はブリュースター角表面を第 2 高調波結晶 2 6 又は第 3 高調波結晶 2 8 上に実装して、表面反射に起因したパワー損失を低減することができる。

【0016】

図 2 の第 3 高調波発生器 2 0 の 1 つの魅力的な特徴は、基本光周波数 ω の第 1 基本光ビーム 2 1 及び 2 倍光周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 2 2 が第 3 高調波結晶 2 8 へ別個に送り出されるので、個々のダイクロイックミラー 2 5 A の単純な調整によりビーム 2 1 及び 2 2 の位置及び角度を特定の変換構成に最適化できることである。したがって、例えば、複屈折又は分散ウォークオフ板がウォークオフ補償に必要なくなり得る。同様に、ノンコリニア位相整合に関して、基本光周波数 ω の第 1 基本光ビーム 2 1 と 2 倍光周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 2 2 との間に所望の角度を形成するのに、プリズム又は他の分散素子が不要となり得る。

【0017】

ダイクロイックミラー 2 5 A、2 7 A、及び 2 7 B により形成され且つ第 2 高調波結晶 2 6 及び第 3 高調波結晶 2 8 を含むループ (図 2) を巡って光が進むのに要する時間により、第 2 高調波光ビーム 2 2 は、第 1 基本光ビーム 2 1 に対して遅れて第 3 高調波結晶 2 8 に到達する。したがって、概してこの構成は、光がループを巡って進むのに要する時間よりも持続時間が長い入力パルスでの動作に適合可能であり得る。第 2 高調波結晶 2 6 及び第 3 高調波結晶 2 8 を含むこうしたループの通常の最小寸法は、数センチメートル、例えば 3 cm となり、これは約 100 ピコ秒の最小有効パルス持続時間に対応する。したがって、上述の逆順高調波変換技法は、ナノ秒以上のパルスを発生するレーザシステム、例えば Q スイッチ固体レーザ及び連続発振 (CW) レーザに適するものであり得る。ミリメートル以下のサイズのマイクロオプティクスを用いて、例えばモードロックレーザからのピコ秒パルスを扱うより小さなループを構築することができる。

【0018】

ループラウンドトリップタイムがパルス分離時間とほぼ等しいか又はパルス分離時間の倍数となるように選択される場合、図 2 の第 3 高調波発生器 2 0 の構成を、それぞれがループラウンドトリップタイムよりも短い複数のパルスと共に用いることもできる。後者の場合、第 3 高調波結晶 2 8 に対する入力、新たな IR パルスと以前の IR パルスから生成された第 2 高調波パルスとを含む。例えば、CW モードロックレーザが、数十 MHz ~ 1 GHz の範囲の繰返し率で約 10 ピコ秒以下の持続時間のパルスを継続的に送出することができる。例えば 200 MHz モードロックレーザでは、第 3 高調波発生器 2 0 と同様の逆順第 3 高調波発生器が、150 cm の全光路長に対応する 5 ナノ秒のラウンドトリップタイムのループで、先行パルスからの SGH 光を用いた各パルスの 3 倍化を可能にする。この構成は、単一のより長いパルスの場合と同じ変換効率の改善という利益をもたらす。2 つのパルスのみからなるパルスバーストに関して、2 つの入力パルスが効果的に合成されて 1 つの THG パルスとなり、所与のピーク入力パワーに対してより大きな出力ピークパワーが生成され得るので利益がある。

【0019】

次に、図 2 をさらに参照しつつ図 4 を参照すると、第 4 高調波発生器 4 0 が、図 2 の第 3 高調波発生器 2 0 を含むことができる。ダイクロイックミラー 4 5 A 及び 3 つの折返しミラー (turning mirrors) 4 5 B を含む第 2 ビームコンバイナ 4 5 を設けて、第 2 基本光ビーム 4 1 を第 3 高調波結晶 2 8 が発生した第 3 高調波光ビーム 2 3 と合成することができる。第 4 高調波結晶 4 6 (「FHG」又は第 4 高調波発生) を第 2 ビームコンバイナ 4 5 に結合して、第 2 基本光ビーム 4 1 及び第 3 高調波光ビーム 2 3 から 4 倍光周波数 4ω の第 4 高調波光ビーム 2 4 を発生することができる。第 4 高調波光ビーム 2 4 の発生時

10

20

30

40

50

に、第1基本光ビーム21が第4高調波結晶46を出ると共に第3高調波光ビーム23の残留ビーム23Aが第4高調波結晶46を出て、残留ビーム23Aは、上側ダイクロイックミラー25A又は別の適切なスプリッタにより上部光ビームダンプ49へ指向させることができる。本質的に、この実施形態では、第1基本光ビーム21は、第2基本光ビーム41の残留基本光ビームである。図2の第3高調波発生器20と同様に、第1基本光ビーム21は、第3高調波光ビーム23及び第2高調波光ビーム22を発生するために第4高調波発生器40で用いられる。第2高調波スプリッタ(1T3T4Rダイクロイックミラー)47を第4高調波結晶46に結合して、第1基本光ビーム21を第4高調波光ビーム24から分離し、且つ第1基本光ビーム21を第3高調波発生器20の第1ビームコンバイナ25に結合することができる。

10

【0020】

第1基本光ビーム21、第2基本光ビーム41、第2高調波光ビーム22、及び第3高調波光ビーム23の光路は、図5A~図5Dを参照することによってより容易に辿ることができる。図5Aにおいて、第2基本光ビーム41が第4高調波結晶46を伝播する。上述のように第2基本光ビーム41の残留基本ビームである第1基本光ビーム21が順に、第3高調波結晶28を伝播し、残留基本光ビーム21Aとして第2高調波結晶26を伝播し、残留基本光ビーム21Aの残留ビーム21Bとして左側の光ビームダンプ29Aへ指向され得る。図5Bにおいて、第2高調波光ビーム22が第2高調波結晶26で発生し、第3高調波結晶28を伝播し、残留第2高調波光ビーム22Aとして右側の光ビームダンプ29Bへ指向される。図5Cにおいて、第3高調波光ビーム23が第3高調波結晶28で発生し、第4高調波結晶46へ指向され、続いて残留第3高調波光ビーム23Aとして上部光ビームダンプ49へ指向される。最後に、図5Dにおいて、第4高調波ビーム24が発生して第4高調波発生器40の出力へ指向される。

20

【0021】

1つ又は複数の逆順ステージを組み込んだ同様のカスケード構成を、第5高調波発生以降で実施することができる。図2及び図4をさらに参照しつつ図6を参照すると、主光ビーム61、例えば第1基本光ビーム21(図2)又は第2基本光ビーム41(図4)からのカスケード光高調波発生用のカスケード高調波発生器60(図6)が、主光ビーム61の経路内に配置された「高次高調波光ビーム」63を発生する「高次高調波発生器」68を含むことができる。「低次高調波発生器」66を、主光ビーム61の経路内、すなわち高次高調波発生器68の下流の残留主光ビーム61Aの経路内に配置して、残留主光ビーム61Aから「低次高調波光ビーム」62を発生することができる。「高次」高調波発生器68及び「低次」高調波発生器66は、例えば、図2の第3高調波発生器20の第3高調波結晶28及び第2高調波結晶26それぞれであり得る。別の例は、図4の第4高調波発生器40の第4高調波結晶46を「高次高調波発生器」68として、また第3高調波発生器20全体を「低次高調波発生器」66として含むことができる。

30

【0022】

高調波分離器67を高次高調波発生器68と低次高調波発生器66との間の主光ビーム61の経路内に配置して、高次高調波発生器68を伝播した残留主光ビーム61Aから高次高調波光ビーム63を分割することができる。図6に示すように、高調波コンバイナ65を低次高調波発生器66の下流の残留主光ビーム61Aの残留ビーム61Bの経路内に配置して、低次高調波発生器66が発生した低次高調波光ビーム62及び主光ビーム61を、高調波光ビーム63を発生する高次高調波発生器68に結合する一方で、残留ビーム61Bを任意に処分することができる。したがって、カスケード高調波発生器60内の主光ビーム61又は低次高調波光ビーム62の経路が光学的閉ループにならないようにビームコンバイナ25、45、及び/又は高調波スプリッタ47を構成して、正の光帰還に起因した不安定性を回避することができる。

40

【0023】

次に図6をさらに参照しつつ図7を参照すると、カスケード高調波発生器70が、図6のカスケード高調波発生器60と、主光ビーム61を供給するパルス光源71とを含む。

50

図 2 の第 3 高調波発生器 20 の場合と同様に、低次高調波発生器 66 及び高次高調波発生器 68 を含む光ループ 69 での光ラウンドトリップタイムが実質的にパルス分離時間の整数倍であるように、カスケード高調波発生器 60 の主光ビーム 61 をパルス化することができる。

【0024】

次に、図 2 及び図 6 をさらに参照しつつ図 8 を参照すると、第 3 高調波発生器 80 が図 2 の第 3 高調波発生器 20 の変形形態であり、これを図 6 のカスケード高調波発生器 60 の一例として見るることができる。図 8 の第 3 高調波発生器 80 は、第 2 高調波結晶 86 を低次高調波発生器 66 として含み、第 3 高調波結晶 88 を高次高調波発生器 68 として含むことができる。図 8 の第 3 高調波発生器 80 の 1 つの目立った特徴は、第 3 高調波結晶 88 が、基本光ビーム 21 の入力に対して好ましくはブリュースター角だけ傾斜した入力光学面 88A 及び出力光学面 88B を含むことができることである。別の特徴は、第 1 ビームコンバイナ 85 が上側及び下側折返しミラー 85A を含むことができ、第 1 ビームスプリッタ 87 が上側及び下側折返しミラー 87A を含むことができることである。上側及び下側折返しミラー 85A、87A はダイクロイックミラーでなくてもよく、すなわち上側及び下側折返しミラー 85A、87A は通常のミラーとすることができ、その場合、ビーム合成及び分割機能が空間多重により提供され、すなわち 1 つのビームがミラーにより反射される一方で第 2 ビームは空間的にミラーを迂回する。代替的に、ビーム合成及び分割機能を偏光合波により提供することができ、その場合、ビームの偏光がそれぞれ異なり、ミラーは一方の偏光を透過し他方の偏光を反射する。

【0025】

第 3 高調波結晶 88 は、第 1 基本光ビーム 21 及び第 2 高調波光ビーム 22 が非垂直（鋭角）の入射角で第 3 高調波結晶 88 の入力光学面 88A に入射するような向きであることが好ましい。さらに、第 1 基本光ビーム 21 及び第 2 高調波光ビーム 22 は、相互に対して非ゼロの角度（鋭角）を形成することができる。第 1 基本光ビーム 21 は図 8 の平面内で偏光させることができる。第 2 高調波結晶 26 の SHG はタイプ I とすることができ、図 8 に対して垂直に偏光された 2 倍周波数 2ω の第 2 高調波光ビーム 22 を発生する。第 3 高調波結晶 88 の THG はタイプ II とすることができ、平面内で偏光された第 1 基本光ビーム 21 と図 8 の平面に対して垂直に偏光された第 2 高調波光ビーム 22 とを合成して、図 8 の平面内で偏光された 3 倍周波数 3ω の第 3 高調波光ビーム 23 を発生する。

【0026】

マイクロメートル波長域及び約 1 kW を超えるピーク入力パワーでは、第 2 高調波結晶 86（図 8）は、好ましくは約 150° で非臨界位相整合するホウ酸リチウムバリウム（lithium barium borate）（LBO）とすることができ、第 3 高調波結晶 88（図 8）は、図 8 に対して垂直に偏光された臨界及びコリニア又はノンコリニア位相整合する LBO とすることができ、第 3 高調波結晶 88 はブリュースター入射角及び出射角を有するので、第 3 高調波結晶 88 の分光、すなわち屈折率の波長依存性は、第 3 高調波結晶 88 の入力面 88A 及び出力面 88B での光ビームの角度分離をもたらすことができる。

【0027】

この構成の 1 つの利点は、第 3 高調波光ビーム 23 から残留出力ビーム 21B 及び 22A を分離し且つ偏光を回転させるのに波長板もダイクロイックミラーも不要なことである。実際に、第 1 ビームコンバイナ 85 の上側折返しミラー 85A は、第 2 高調波光ビーム 22 及び残留光ビーム 21B を第 3 高調波結晶 88 に結合することができる。第 1 ビームスプリッタ 87A の上側折返しミラー 87A は、残留基本光ビーム 21A を分割することができる。第 1 基本光ビーム 21 及び第 2 高調波光ビーム 22 が第 3 高調波結晶 88 の入力面 88A に対して異なる入射角を有する場合、第 1 基本光ビーム 21 及び第 2 高調波光ビーム 22 は、第 3 高調波結晶 88 内で実質的に同一直線上にあり得る。1 mm 範囲のタイプ II LBO THG 長の例では、ビーム 21 及び 22 の角度分離は約 $1^\circ \sim 3^\circ$ であり、これはミラーエッジ又はビームブロックを用いた直接的な（straightforward）ビーム分離には十分であり得る。ブリュースター面の使用が有益であり得る理由は、残留基

本光ビーム 2 1 A 及び第 3 高調波光ビーム 2 3 の両方が低損失ブリュースター透過 (Brewster transmission) のために p 偏光されるので、第 3 高調波結晶 8 8 の出力面 8 8 B 上に反射防止 (A R) コーティングが不要であり得るからである。垂直入射面に対する面 8 8 A、8 8 B の表面積の増大と共に、これは面 8 8 A、8 8 B の UV 損傷耐性を著しく改善する。入力面 8 8 A は、s 偏光第 2 高調波ビーム 2 2 及び p 偏光第 1 基本光ビーム 2 1 のために A R 被覆され得ることが好ましい。この構成の別の利点は、基本周波数 ω の残留ビーム 2 1 B が第 3 高調波結晶 8 8 内で第 2 高調波ビーム 2 2 と同一直線上にあり、したがって第 1 基本光ビーム 2 1 と同一直線上にはないので、T H G プロセスに干渉する可能性が低く、残留第 2 高調波ビーム 2 2 A と同一直線上に出射し、それから両方を第 3 高調波光ビーム 2 3 から分離し且つ図示されていない 1 つの共通の光ビームダンプ内に射出することができるからである。図 2 におけるように、結晶で適当なビームサイズ及び空間プロファイルを生成するためにレンズ又は他の光学系を追加することができる。

10

【0028】

図 1 及び図 2 をさらに参照しつつ図 9 A 及び 9 B を参照すると、図 2 の第 3 高調波発生器 2 0 の計算光変換効率 (図 9 B) が、図 1 の従来の光周波数 3 倍器 1 0 のもの (図 9 A) と比較されている。図 9 A 及び 9 B の両方において、光変換効率は、kW 単位の入力光パワーの関数として、25 kW の入力光パワーレベルまでプロットされている。

【0029】

図 1 をさらに参照しつつ特に図 9 A を参照すると、直径 70 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 1 4 (9 1)、直径 200 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 1 4 (9 2)、及び直径 350 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 1 4 (9 3) に関して、光変換効率がプロットされている。入力波長は 1064 nm であり、パルス持続時間は通常は数十ナノ秒である。S H G 結晶 1 2 及び T H G 結晶 1 3 の両方が L B O である。第 2 高調波結晶 1 2 は長さ 15 mm であり、基本ビーム 1 1 の 140 マイクロメートル直径スポットで約 150 でタイプ I 非臨界位相整合する。第 3 高調波結晶 1 3 は長さ 20 mm であり、位相整合はタイプ I I 臨界、ノンコリニア位相整合である。最高の変換効率 9 1 は、70 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 1 4 のスポット径に対応し、これは 20 kW の入力パワーで最良の変換をもたらすことができる。中間変換効率 9 2 及び最低変換効率 9 3 は、それぞれ 200 マイクロメートル及び 350 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 1 4 のスポット径に対応する。これらのスポット径は効率 9 2 及び 9 3 をもたらし、これらは、より大きなスポットサイズ、したがってビーム品質並びに結晶 1 2 及び 1 3 の寿命の改善とレードオフされる。従来技術の周波数 3 倍器 1 0 に対する 25 kW の入力パワーレベルでは、70 マイクロメートルの入力スポットサイズからは 63 % の変換効率 9 1 が得られ、200 マイクロメートルのスポットサイズからは 37 % の変換効率 9 2 が得られ、350 マイクロメートルのスポットサイズからは 20 % をわずかに下回る変換効率 9 3 が得られる。

20

30

【0030】

次に、図 2 をさらに参照しつつ特に図 9 B を参照すると、最高の光変換効率 9 4 は、図 2 の光高調波発生器 2 0 内の第 2 高調波ビーム 2 2 の 200 マイクロメートルのビーム直径に対応する。2 番目に高い変換効率 9 5 は、図 2 の光高調波発生器 2 0 内の第 2 高調波ビーム 2 2 の 350 マイクロメートルのビーム直径に対応する。

40

【0031】

図 9 A と図 9 B との比較により、図 1 の従来技術の光周波数 3 倍器 1 0 と比べて図 2 の光高調波発生器 2 0 の変換効率ははるかに高いことが明らかとなる。例えば、図 2 の第 3 高調波発生器 2 0 に対する 25 kW の入力パワーレベルでは、200 マイクロメートルのスポットサイズからは 81 % の変換効率 9 4 が得られ、350 マイクロメートルのスポットサイズからは 65 % の変換効率 9 5 が得られる。したがって、本開示の第 3 高調波発生器 2 0 は、直径 70 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 1 4 での従来の周波数 3 倍器 1 0 よりも高い変換効率を直径 200 マイクロメートルの第 2 高調波ビーム 2 2 でもたらすことがで

50

きる。

【0032】

図2及び図6をさらに参照しつつ図10を参照すると、主光ビーム61(図6)からのカスケード光高調波発生の方法100(図10)が、低次高調波光ビーム62を発生する低次光高調波発生器66と、高調波光ビーム63を発生する高次光高調波発生器68とを用意するステップ101を含むことができる。次のステップ102において、主光ビーム61を順に、高次高調波発生器68に伝播させ、続いて低次高調波発生器66に伝播させることにより低次高調波光ビーム62を発生するように低次高調波発生器66に伝播させて、低次高調波発生器66で低次高調波光ビーム62が主光ビーム61と重なるようにすることができる。次のステップ103において、低次高調波発生器66が発生した低次高調波光ビーム62を高次高調波発生器68に伝播させて、高次高調波発生器68で低次高調波光ビーム62が主光ビーム61と重なるようにすることで、高次高調波光ビーム63を発生するようにする。さらに、任意のステップ104において、低次高調波発生器66から出る残留主光ビーム62A及び/又は他の残留ビームを低次高調波光ビームから分離し且つ光ダンプ29A、29B内にダンプすることができる。

10

【0033】

図8の光高調波発生器80と同様に、高次高調波発生器68に入射する低次高調波光ビーム62は、高次高調波発生器68において同一直線上で伝播するように、高次高調波発生器68に入射する主光ビーム61と鋭角を形成することができる。さらに、低次高調波発生器66及び高次高調波発生器68を含む光ループ69での光ラウンドトリップタイムが実質的にパルス分離時間の整数倍であるように、主光ビームをパルス化することができる。

20

【0034】

図10の方法100は、高次カスケードの高次高調波発生、例えば第4高調波発生(図4)、第5高調波発生等に関して一般化することができる。図11を参照すると、主光ビームからのカスケード光高調波発生の方法110は、少なくとも1つの第m高調波発生器を含む複数の高調波発生器を用意するステップ111を含み、ここで $m = 2, \dots, M$ であり、Mは3以上の整数である。次のステップ112において、第M高調波発生器から開始して第2高調波発生器で終了するmの降順で複数の高調波発生器に主光ビームを伝播させることができる。例として、図5Aを一時的に再度参照すると、第4高調波光ビーム41は、第4高調波結晶46、第3高調波結晶28、及び第2高調波結晶26を伝播する。

30

【0035】

次のステップ113において、各第n高調波光ビームを主光ビームと重なるように第(n+1)高調波発生器に伝播させることができ、ここで $n = 2, \dots, M - 1$ とする。例えば、図5B及び図5Cを再度参照すると、第2高調波光ビーム22が第3高調波結晶28(図5B)を伝播し、第3高調波光ビーム23が第4高調波結晶46(図5C)を伝播する。最後に、ステップ114において、第M高調波光ビームを出力させる。例として、図5Dを再度参照すると、第4高調波結晶46から第4高調波ビーム24を出力することができる。一実施形態では、主光ビームの光路が閉光ループを形成しないように、すなわち開ループになるように主光ビームを伝播させる。

40

【0036】

いくつかの実施態様では、カスケード高調波発生器の遅延時間(本明細書では高調波発生器遅延時間と称する)を、レーザ光源のラウンドトリップタイム(本明細書ではレーザ光源ラウンドトリップタイムと称する)とほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍であるように設計することができる。例えば、第3高調波発生器20の遅延時間は、第1基本光ビーム21を供給するレーザ光源のレーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はその整数倍であるように設計することができる。特に、遅延時間設計に関連した以下の技法は第3高調波発生器20及び第1基本光ビーム21のレーザ光源の状況で説明されているが、これらの技法は、第4高調波発生器40、カスケード高調波発生器60、カスケード高調波発生器70、第3高調波発生器80、及びそれらの各レーザ光源にも等しく当てはめ

50

ることができる。

【0037】

高調波発生器の遅延時間は、ビームが高調波発生器内を進む時間量として定義することができる。遅延時間は、高調波発生器内でビームが進む光路長と考えることもできる。進む光路長は、第3高調波発生器20のコンポーネントの物理的分離と、ビームが通過する材料の屈折率とに關係する。ラウンドトリップタイムは、遅延時間に対して始点及び終点と同じ点であるようなより具体的な場合である。図2を例として用いると、第3高調波発生器20を通るビームのラウンドトリップタイムは、ビーム21が上側1T2Rフィルタ25Aを通過したときから、このビーム21から生じた第2高調波光ビーム22が同じ上側1T2Rフィルタ25Aに到達したときまでの時間量として定義することができる。第2高調波光ビーム22（又は22A）が基本光ビーム21（又は21A）に重なる光路内の他の点を用いて、システム内のビームのラウンドトリップタイムを定義することができる。

10

【0038】

レーザ光源ラウンドトリップタイムは、最初と同じ方向に進むことになるように光ビームがレーザ光源のキャビティを完全に横断する時間量として定義することができる。例えば、リニアキャビティでは、レーザ光源ラウンドトリップタイムは、レーザ利得媒質を同じく2回横断するプロセスにおいて、ビームがキャビティ内の特定の点から進み、一方のキャビティ端ミラーから反射し、他方のキャビティ端ミラーから反射し、キャビティ内の同じ特定の点に戻る時間量となる。典型的な場合には、レーザ光源の変動がレーザ光源に関連した連続ラウンドトリップでほぼ繰り返す。

20

【0039】

いくつかの実施態様では、第1基本光ビーム21のレーザ光源はマルチ縦モード（multiple longitudinal modes：縦多モード）で動作することができる。このような場合、レーザ光源のパワーはモードビーティングに起因して変動し得る。概して、固体レーザ光源では、こうした変動はピコ秒時間スケールで起こり、ピコ秒時間スケールでパワー出力がゼロ近傍から平均パワー出力の数倍まで変わり得る。レーザ光源ラウンドトリップタイムは数ナノ秒であり得るので、レーザ光源の所与のラウンドトリップ中に、レーザ光源による光ビーム出力にノイズを導入する数千回の変動があり得る。

30

【0040】

標準的な非線形変換方式（例えば、図1の従来技術のカスケード高調波3倍器10に関連して説明したようなもの）は、特に変換下限でこれらの変動から利益を得ることができる。例えば、基本光ビーム11の高パワー変動は、第2高調波ビーム14に強く変わり、高パワーの基本光ビーム11及び高パワーの第2高調波ビーム14の変動は、第3高調波ビーム19に強く変わる。ここで、第2高調波ビーム14は、第3高調波結晶13で第2高調波ビーム14と混合されるのと同じ基本光ビーム11から生じるので、第3高調波結晶13に入る基本光ビーム11及び第2高調波ビーム14は同期した（すなわち時間的に整列した）変動を有する。第2高調波発生器12で基本光ビーム11が第2高調波ビーム14を発生させるので、基本光ビーム11及び第2高調波ビーム14の変動は同期し、これらは同じ光路を進んでまとめて第3高調波発生器13に入る。この結合の非線形性は、平均パワー変換の高パワー変動による増加が、比較的低パワーの変動による減少よりも大きいことを意味する。

40

【0041】

例えば図2の第3高調波発生器20に関連して説明した逆順方式では、第3高調波結晶28は、1T2Rフィルタ25Aから受け取った第1基本光ビーム21及び第2高調波光ビーム22の合成に基づく第3高調波光ビーム23を発生する。ここで、第2高調波光ビーム22は第3高調波結晶28に入る前に基本光ビーム21とは異なる光路を進むので、第1基本光ビーム21の変動及び第2高調波光ビーム22の変動は第3高調波結晶28に入る際に同期し得ない（すなわち、時間的に非整列であり得る）ことで、変動からのパワー変換の向上が阻止される。換言すれば、第3高調波発生器28は、第1基本光ビーム2

50

1をレーザ光源から直接受け取り、第2高調波結晶26から発生した第2高調波光ビーム22を受け取る。したがって、第3高調波発生器28が受け取った基本光ビーム21及び第2高調波ビーム22は非同期であり得る可能性があり、これにより第3高調波ビーム23の発生を減らすことができる。

【0042】

しかしながら、上記のように、レーザ光源の変動は、レーザ光源に関連した連続ラウンドトリップでほぼ繰り返す。ここで、変動の波形が（例えば、数十～数百のラウンドトリップのタイムスケールで）徐々に変化し得る一方で、1つのレーザ光源ラウンドトリップ（例えば、第1ラウンドトリップ）から時間的に近いラウンドトリップ（例えば、第2ラウンドトリップ、第3ラウンドトリップ、又は第4ラウンドトリップ）までの変動の波形の変化は小さく、これが波形をほぼ周期的にする。したがって、第3高調波発生器20の遅延時間（例えば、 T_{HG} ）をレーザ光源ラウンドトリップタイム（例えば、 T_{source} ）とほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍となるように設計することにより、パワー変換向上を得ることができる。ここで、第1基本光ビーム21及び第2高調波光ビーム22は、第3高調波結晶28に入る際に正確に揃うことができないが、変動波形の近周期性に起因して変動はほぼ同期し得る。

【0043】

図12Aは、レーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しくなくそのほぼ整数倍でもない遅延時間を有するカスケード光高調波発生器の、光信号の時間的に非整列な波形の一例を示すグラフ図である。これに対して、図12Bは、レーザ光源のラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍である遅延時間を有するカスケード光高調波発生器の、光信号の整列波形の一例を示すグラフ図である。図12A及び図12Bの縦目盛は同一の大きさである。図12A及び図12Bに示すように、第1基本光ビーム21、第2高調波光ビーム22、及び第3高調波光ビーム23の変動の波形は、ノイズが多いが（例えば、図12A及び図21Bに示す3つの例示的な周期内で）ほぼ周期的であり得る。

【0044】

図12Aに示すように、非整列の場合（例えば、 T_{HG} が T_{source} とほぼ等しくなく T_{source} のほぼ整数倍でもない場合）、第2高調波光ビーム22の変動は、第1基本光ビーム21の変動からずれていることで、図12A内の最下部の点線で示すように、（例えば、第1基本光ビーム21及び第2高調波光ビーム22を用いて形成された）第3高調波光ビーム23の平均パワーを（例えば、後述する整列の場合と比べて）比較的低くし得る。

【0045】

しかしながら、図12Bに示すように、整列の場合（例えば、 T_{HG} が T_{source} とほぼ等しいか又は T_{source} のほぼ整数倍である場合）、第2高調波光ビーム22の変動及び第1基本光ビーム21の変動は、変動の1つ又は複数の周期だけ相互に変位し得る。換言すれば、第2高調波光ビーム22の変動は、第1基本光ビーム21の変動とほぼ整列（すなわち、同期）することができる。結果として、図12Bの最下部の点線で示すように、第3高調波光ビーム23は、正の変動が起こるピークを含むことで、（例えば上述した非整列の場合と比べて）高い平均出力パワーをもたらすことができる。

【0046】

特に、図12Aと図12Bとを比較すると、第3高調波光ビーム23が比較的高い平均パワーを有するように第2高調波光ビーム22の変動と整列するための、第1基本光ビーム21の変動のシフトが示されている。しかしながら、実際には、本明細書に記載の技法を用いて、第3高調波光ビーム23が比較的高い平均パワーを有するように基本光ビーム21の変動と整列するために、第2高調波光ビーム22の変動をシフトさせる。換言すれば、第2光ビーム22の変動を第1基本光ビーム21の変動と整列させるために、第3高調波発生器20の遅延時間が設計される。図12Bは、遅延時間の設計に起因して、第3高調波光ビーム23が平均パワーを増加させつつ基本光ビーム21及び第2高調波光ビーム22のものと同様の波形を維持し得ることを示すための、単なる例である。

【 0 0 4 7 】

上記のように、図 1 2 A 及び図 1 2 B は単に例として提供されたものである。他の例も可能であり、図 1 2 A 及び図 1 2 B に関して説明したものと異なってもよい。

【 0 0 4 8 】

いくつかの実施態様では、第 3 高調波発生器 2 0 の遅延時間は、第 3 高調波発生器 2 0 のレイアウトに基づいて設計することができる。例えば、第 3 高調波発生器 2 0 の 1 つ又は複数のコンポーネント（例えば、第 1 ビームコンバイナ 2 5、ダイクロイックミラー 2 5 A、第 3 高調波結晶 2 8、第 1 ビームスプリッタ 2 7、上側フィルタ 2 7 A、下側フィルタ 2 7 B、又は第 2 高調波結晶 2 6）は、第 3 高調波発生器 2 0 のコンポーネントに関連した非線形光ループから得られた遅延時間がレーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍であるように配置することができる。特定の例として、第 3 高調波発生器 2 0 の 1 つ又は複数のコンポーネントは、1 つ又は複数のコンポーネント間の距離が非線形光ループ長をレーザ光源のラウンドトリップ光路長と整合させる（すなわち、レーザ光源のラウンドトリップ光路長とほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍であるようにする）ことにより、第 3 高調波発生器 2 0 の遅延時間をレーザ光源ラウンドトリップタイムと略等しいか又はそのほぼ整数倍にするように配置（例えば、接着、はんだ付け、ボルト締め）することができる。換言すれば、第 3 高調波発生器 2 0 の遅延時間は、第 3 高調波発生器 2 0 の 1 つ又は複数のコンポーネントの位置決めに基づいて設計することができる。

10

【 0 0 4 9 】

いくつかの実施態様では、第 3 高調波発生器 2 0 の遅延時間設計は、直線的構築プロセス（linear build process）を用いて実施することができる。直線的構築プロセスは、レーザ光源を製造した後に（例えば、レーザ光源及び第 3 高調波発生器 2 0 を収容するパッケージ内に）第 3 高調波発生器 2 0 のコンポーネントを配置することを含み得る。例えば、レーザ光源の製造後に（例えば、レーザ光源の寿命を通して）レーザ光源のモードビーティング周期をロックすることができる一方で、（例えば、別の時点で製造された）別のレーザ光源のモードビーティング周期をそのレーザ光源のものと異ならせることができる。換言すれば、レーザ光源毎にモードビーティング周期がわずかに異なり得る。したがって、レーザ光源のラウンドトリップ光路長は、レーザ光源毎に異なり得る。

20

【 0 0 5 0 】

ここで、レーザ光源を一旦製造したら、直線状構築プロセスは、レーザ光源のラウンドトリップ光路長を求めること、（例えば、第 3 高調波発生器 2 0 のコンポーネントの材料の回折率（indices of diffraction）を考慮に入れた場合に）レーザ光源のラウンドトリップ光路長と整合する非線形光路長を求めること、及び第 3 高調波発生器 2 0 の非線形光路長がレーザ光源のラウンドトリップ光路長と整合するように第 3 高調波発生器 2 0 のコンポーネントを配置及び／又は製造することにより、第 3 高調波発生器 2 0 の遅延時間をレーザ光源ラウンドトリップタイムとほぼ等しくするか又はそのほぼ整数倍にすることをさらに含むことができる。この場合、第 3 高調波発生器 2 0 のコンポーネントは、第 3 高調波発生器 2 0 の非線形光路及び遅延時間が調整不可能である（すなわち固定である）ように所定位置に固定される（例えば、コンポーネントを所定位置に接着、所定位置にはんだ付け、所定位置にボルト締めすること等ができる）。

30

40

【 0 0 5 1 】

付加的又は代替的に、第 3 高調波発生器 2 0 の遅延時間設計は、マイクロメータ、回転ステージ、又は調整可能なミラーマウント等の調整可能な機械コンポーネントを用いて実施することができ、調整可能なミラーマウントは、非線形光路内の 1 つ又は複数の光学コンポーネント、例えばミラー又はプリズムを移動させることにより非線形光路の遅延時間の調整を可能にする。調整可能なコンポーネントを含めることで、レーザ光源及び第 3 高調波発生器 2 0 を収容するパッケージ内での組立後に非線形光路長を変更することが可能となり得る。こうした場合、レーザ光源及び第 3 高調波発生器 2 0 は、レーザ光源のラウンドトリップ光路長を求める前にパッケージ内で組み立てることができる。ここで、組立

50

て後に、レーザ光源のラウンドトリップ光路長を求めることができ、レーザ光源のラウンドトリップ光路長と整合する非線形光路長を求めることができ、且つ調整可能なコンポーネントを用いて第3高調波発生器の非線形光路長を適宜調整することができる。

【0052】

図13は、特定のモードピーティング周期を有する特定のレーザ光源に関する例示的な第3高調波発生器20に関連した、ある範囲内の非線形光路長の変換パワー量のグラフ図である。特に、図13は例示的な第3高調波発生器20に関連したものだが、別のタイプのカスケード光高調波発生器（例えば、第4高調波発生器40、カスケード高調波発生器60、カスケード高調波発生器70、第3高調波発生器80等）が、図13に関連した例示的な第3高調波発生器20に関して説明したのと同様の効果を示す結果をもたらすことができる。

10

【0053】

図13において、基本光ビームのレーザ光源は、レーザ光源ラウンドトリップタイムが4.23ナノ秒（ns）であるQスイッチマルチ縦モードネオジウムイットリウムアルミニウムガーネット（Nd：YAG）レーザ光源である。したがって、レーザ光源のラウンドトリップ光路長は、約1268ミリメートル（mm）（例えば、 2.99792458×10^8 メートル（m）/秒（s） $\times 1000$ mm/m $\times 1.00 \times 10^{-9}$ s/ns $\times 4.23$ ns = 1268mm）である。図13において、レーザ光源の光路長と整合するカスケード光高調波発生器の非線形光路長が、（例えばレーザ光源に関連した1つ又は複数の材料の屈折率に起因して）1212mmであると仮定する。非線形光路長は、ビームが経る光路長を増加させる第3高調波発生器20の光学素子の屈折率を考慮に入れないので、光路長よりも短い場合がある。

20

【0054】

図13に示すように、非線形光路長の長さが1212mmと等しいとき、カスケード光高調波発生器により変換されるパワー量が約22ワット（W）のピークにある。さらに図示するように、非線形光路長の長さが1212mmから離れると（すなわち、非線形光路長の長さが1212mmよりも短い又は長いとき）、変換パワー量が減少する。例えば、非線形光路長が1198mmと等しい場合、変換パワー量は約15Wである。換言すれば、カスケード光高調波発生器の非線形光路長が1212mmである場合、カスケード光高調波発生器により変換されるパワー量は、1198mmのループ長と比べて約47%向上する（例えば、 $(22\text{W} - 15\text{W}) / 15\text{W} \times 100\% = 47\%$ ）。

30

【0055】

ここで、変換の増加に関連した向上は、幅約8mmであり（例えば、図13に点線で示すように、約1207mmのループ長から約1215mmのループ長まで）、レーザ光源のモードピーティングピークが約30ピコ秒（ps）の持続時間である（例えば、 $(1\text{s} / 2.99792458 \times 10^8\text{m}) \times 1 \times 10^{12}\text{ps/s} \times 0.001\text{m/mm} \times 8\text{mm} = 30\text{ps}$ ）であることを意味する。これは、1064nmのNd：YAGレーザ光源に特有である約0.1ナノメートル（nm）波長のレーザ線幅に対応する。したがって、変換向上は、理論予想と一貫した挙動をする。

【0056】

上記のように、図13は単に一例として提供されている。他の例も可能であり、図13に関して説明したものと異なってもよい。

40

【0057】

本明細書に記載の実施態様は、カスケード高調波発生器の遅延時間がカスケード光高調波発生器に結合されたレーザ光源のレーザ光源ラウンドトリップタイプとほぼ等しいか又はそのほぼ整数倍であるように、カスケード光高調波発生器の遅延時間を設計することに関連する。これにより、レーザ光源の大きなパワー変動に起因してカスケード光高調波発生器により達成されるパワー変換の向上を得ることが可能となり、それによりカスケード光高調波発生器の変換効率が改善される。

【0058】

50

上記開示は、図示及び説明を提供するものであるが、網羅的であることも開示された通りの形態に実施態様を限定することも意図していない。変更及び変形は、上記開示に照らして可能であるか又は実施態様の実施から得ることができる。例えば、カスケード光高調波発生器の遅延時間の設計に関連した例示的な技法は、Nd:YAGレーザ光源の状況で説明したが、これらの技法は、ネオジムドープオルトバナジン酸イットリウムレーザ光源等の別のタイプのレーザ光源、別のタイプの固体レーザ光源、ファイバレーザ光源、又は別のタイプのレーザ光源に適用することができる。ファイバレーザは特に、2つの偏光状態で同時にレーザ発光する能力に関して並外れたモードビーティング特性を有することができる。二重偏光ファイバレーザ共振器を備えたレーザシステムで本発明を実施するために、ファイバレーザは、安定した不変偏光軸で動作するように設計されるべきであり、カスケード高調波発生器は、ファイバレーザ共振器の実質的に1つの偏光状態のみで動作するように設計されるべきである。

10

【0059】

特徴の特定の組み合わせが特許請求の範囲に記載され且つ/又は明細書に開示されているが、これらの組み合わせは、可能な実施態様の開示を限定するためのものではない。実際には、これらの特徴の多くを具体的に特許請求の範囲に記載され且つ/又は明細書に開示されていない方法で組み合わせることができる。以下に記載の各従属請求項は、1つの請求項のみに直接従属し得るが、可能な実施態様の開示は、その請求項の組の他の全請求項と組み合わせた各従属請求項を含む。

【0060】

20

本明細書で用いられるいかなる要素、行為、又は指示も、その旨の明記がない限り重要又は必須であると解釈されるべきではない。また、本明細書で用いられる場合、冠詞「a」及び「an」は、1つ又は複数の事項を含むことを意図したものであり、「1つ又は複数」と交換可能に用いることができる。さらに、本明細書で用いられる場合、「組」という用語は、1つ又は複数の事項（例えば、関連事項、非関連事項、関連事項及び非関連事項の組み合わせ等）を含むことを意図したものであり、「1つ又は複数」と交換可能に用いることができる。1つの事項のみが意図される場合、「1つの」という用語又は同様の文言が用いられる。また、本明細書で用いられる場合、「有する」という用語は、オープンエンドな用語であることが意図される。さらに、「基づく」という語句は、別段の明記のない限り、「少なくとも部分的に基づく」ことを意味することを意図したものである。

30

【符号の説明】

【0061】

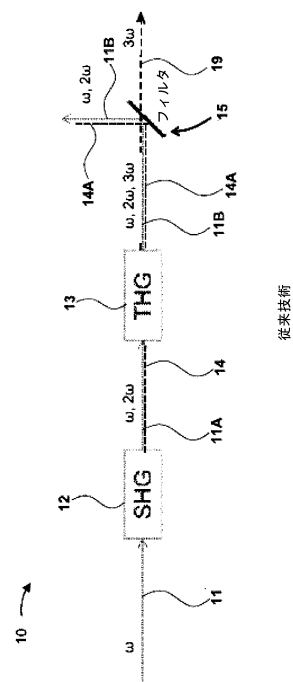
- 10 カスケード高調波3倍器
- 11 基本光ビーム
- 12 第2高調波結晶
- 13 第3高調波結晶
- 14 第2高調波ビーム
- 15 ダイクロイックミラー
- 19 第3高調波ビーム
- 20 第3高調波発生器
- 21 第1基本光ビーム
- 21A 残留基本光ビーム
- 21B 残留ビーム
- 22 第2高調波光ビーム
- 22A 残留第2高調波ビーム
- 23 第3高調波光ビーム
- 24 第4高調波光ビーム
- 25 第1ビームコンバイナ
- 25A ダイクロイックミラー
- 26 第2高調波結晶

40

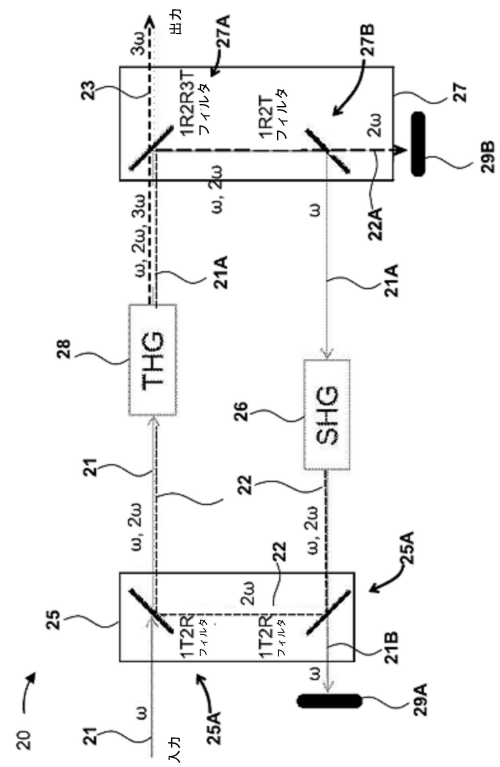
50

2 7	第 1 ビームスプリッタ	
2 7 A	上側ダイクロイックミラー	
2 7 B	下側ダイクロイックミラー	
2 8	第 3 高調波結晶	
2 9 A	光ビームダンプ	
2 9 B	光ビームダンプ	
4 0	第 4 高調波発生器	
4 1	第 2 基本光ビーム	
4 5	第 2 ビームコンバイナ	
4 5 A	ダイクロイックミラー	10
4 5 B	折返しミラー	
4 6	第 4 高調波結晶	
4 7	第 2 高調波スプリッタ	
4 9	上部光ビームダンプ	
6 0	カスケード高調波発生器	
6 1	主光ビーム	
6 1 A	残留主光ビーム	
6 1 B	残留ビーム	
6 2	低次高調波光ビーム	
6 3	高調波光ビーム	20
6 5	高調波コンバイナ	
6 6	低次高調波発生器	
6 7	高調波分離器	
6 8	高次高調波発生器	
6 9	光ループ	
7 0	カスケード高調波発生器	
7 1	パルス光源	
8 0	第 3 高調波発生器	
8 5	第 1 ビームコンバイナ	
8 5 A	折返しミラー	30
8 6	第 2 高調波結晶	
8 7	第 1 ビームスプリッタ	
8 7 A	折返しミラー	
8 8	第 3 高調波結晶	
8 8 A	入力光学面	
8 8 B	出力光学面	

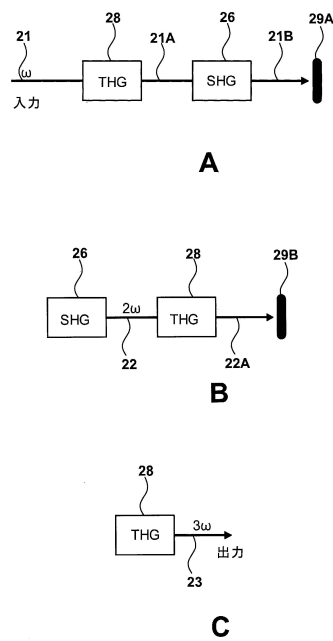
【図 1】



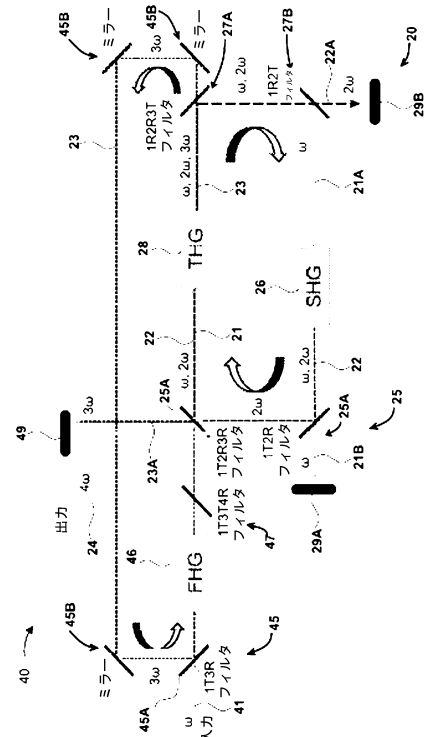
【図 2】



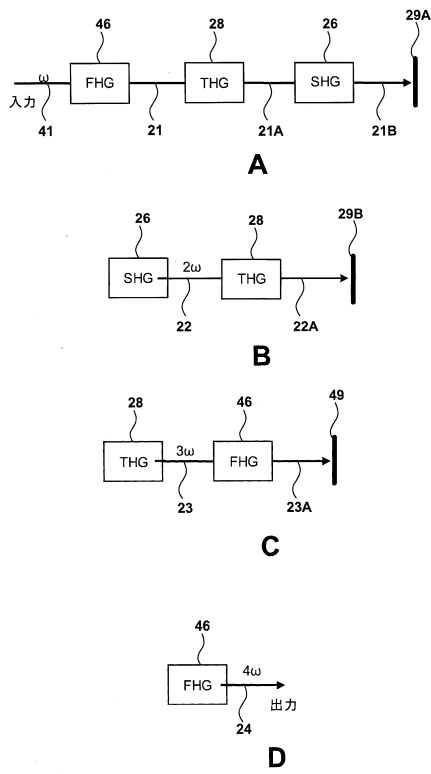
【図 3】



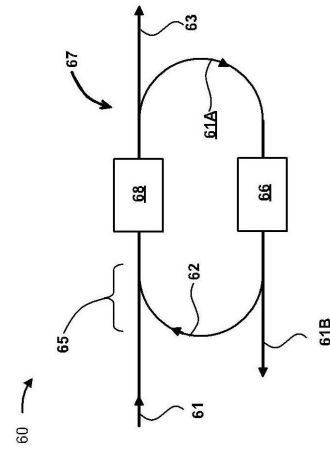
【図 4】



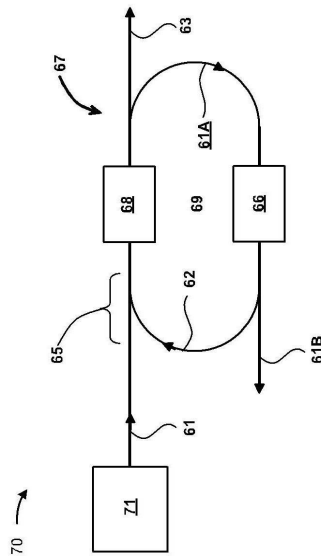
【図 5】



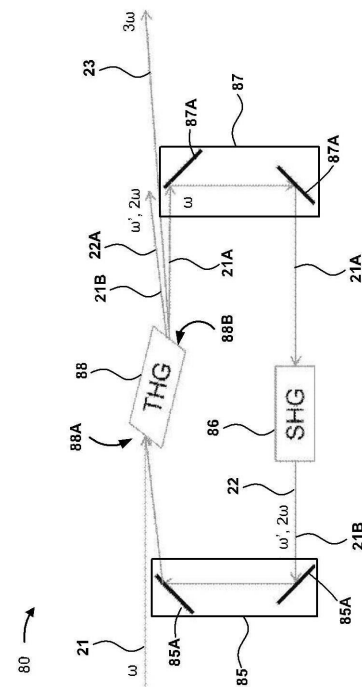
【図 6】



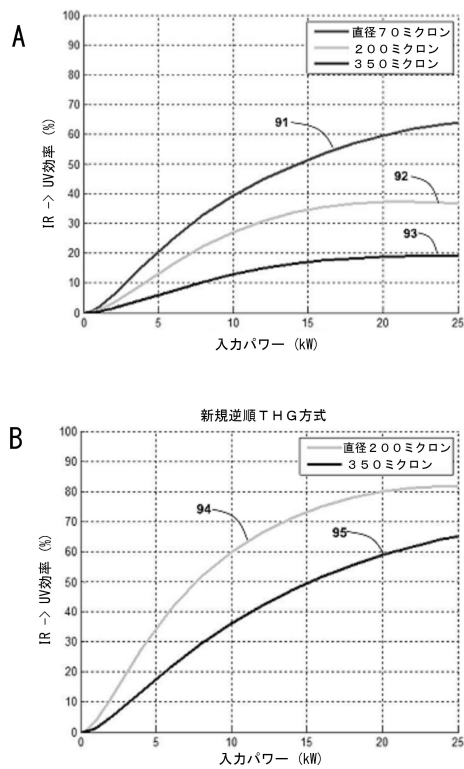
【図 7】



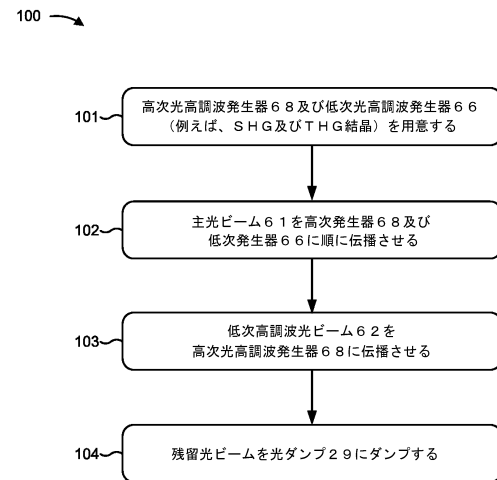
【図 8】



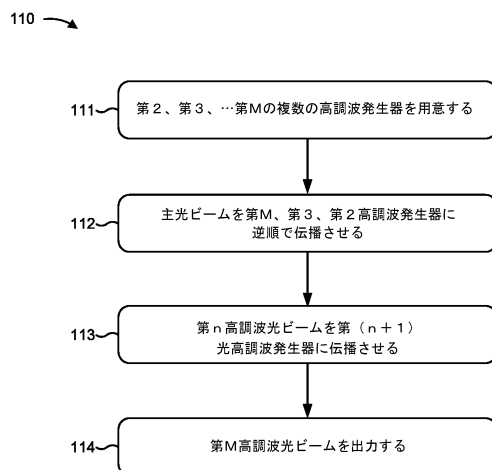
【図 9】



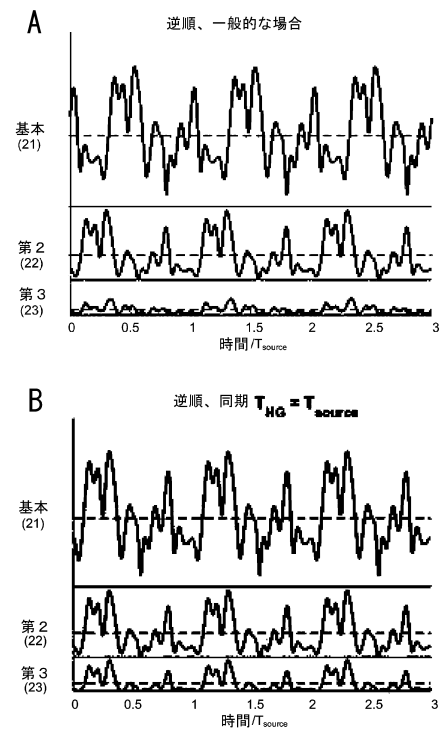
【図 10】



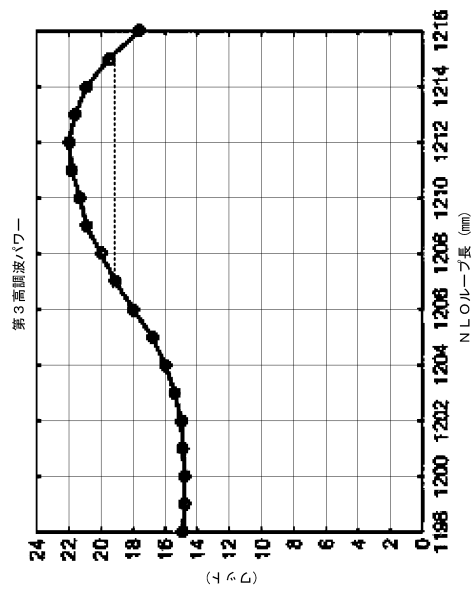
【図 11】



【図 12】



【図 13】



フロントページの続き

- (72)発明者 ジェームズ ジェー モアヘッド
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 0 3 5 ミルピタス ノース マッカーシー ブルーヴァード 4 0 0
- (72)発明者 ローレン エイ エイラス
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 0 3 5 ミルピタス ノース マッカーシー ブルーヴァード 4 0 0
- (72)発明者 パートラム シー ジョンソン
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 0 3 5 ミルピタス ノース マッカーシー ブルーヴァード 4 0 0
- (72)発明者 マーティン エイチ ミュンデル
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 0 3 5 ミルピタス ノース マッカーシー ブルーヴァード 4 0 0
- (72)発明者 デレク エイ タッカー
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 0 3 5 ミルピタス ノース マッカーシー ブルーヴァード 4 0 0

審査官 林 祥恵

- (56)参考文献 米国特許第05850407(US, A)
特表2013-515357(JP, A)
特表2005-521910(JP, A)
特開2002-208749(JP, A)
国際公開第2009/093289(WO, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02F 1/35 - 1/39
H01S 3/00 - 3/30
JSTPlus/JST7580(JDreamIII)