(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3767927号
(P3767927)
(45)発行日　平成18年4月19日(2006.4.19)　(24)登録日　平成18年2月10日(2006.2.10)

(51)Int.Cl.　F I
G02F 1/37 (2006.01)　G02F 1/37

請求項の数 15　(全 31 頁)

(21)出願番号　特願平7-192184
(22)出願日　平成7年7月27日(1995.7.27)
(65)公開番号　特開平8-271942
(43)公開日　平成8年10月18日(1996.10.18)
審査請求日　平成14年5月20日(2002.5.20)
(31)優先権主張番号　特願平7-14636
(32)優先日　平成7年1月31日(1995.1.31)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

(73)特許権者　000000295
沖電気工業株式会社
東京都港区虎ノ門１丁目７番１２号
(74)代理人　100085419
弁理士　大垣　孝
(72)発明者　篠崎　啓助
東京都港区虎ノ門１丁目７番１２号　沖電気工業株式会社内
(72)発明者　徐　長青
東京都港区虎ノ門１丁目７番１２号　沖電気工業株式会社内
(72)発明者　佐々木　浩紀
東京都港区虎ノ門１丁目７番１２号　沖電気工業株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】波長変換方法及びそれを用いた波長変換装置

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
バルク型の波長変換素子に基本波を入射して波長変換を行うにあたり、
該波長変換素子として、擬似位相整合（ＱＰＭ）による波長変換素子を用い、
光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を用いて、基本波の一部分の位相を遅らせることにより、当該波長変換素子の擬似位相整合条件を緩和し、
前記基本波として非回折性光束を入射させる
ことを特徴とする波長変換方法。
【請求項２】
請求項１に記載の波長変換方法において、
前記波長変換素子として、光第２高調波発生（ＳＨＧ）素子を用いることにより、光第２高調波を発生させる
ことを特徴とする波長変換方法。
【請求項３】
請求項１に記載の波長変換方法において、
前記波長変換素子として、和周波発生（ＳＦＧ）素子を用いることにより、和周波を発生させる
ことを特徴とする波長変換方法。
【請求項４】
請求項１に記載の波長変換方法において、

前記波長変換素子として、差周波発生（ＤＦＧ）素子を用いることにより、差周波を発生させる
ことを特徴とする波長変換方法。
【請求項５】
非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
前記半導体レーザから出射された光から、前記波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え、
前記波長変換素子を擬似位相整合（ＱＰＭ）による波長変換素子とし、
前記非回折性光束発生手段の入力側であって、該非回折性光束発生手段に入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する、位相シフト板を具えてなる
ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項６】
請求項５に記載の波長変換装置において、
前記波長変換素子を第２高調波発生（ＳＨＧ）素子とした
ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項７】
請求項５に記載の波長変換装置において、
前記波長変換素子を和周波発生（ＳＦＧ）素子とした
ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項８】
請求項５に記載の波長変換装置において、
前記波長変換素子を差周波発生（ＤＦＧ）素子とした
ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項９】
請求項５に記載の波長変換装置において、
前記非回折性光束発生手段の入力側に、前記波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する光学手段を具えてなる
ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項１０】
非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
前記半導体レーザから出射された光から、前記波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え
前記波長変換素子として、周期的分極反転構造を設けた擬似位相整合（ＱＰＭ）による光第２高調波発生（ＳＨＧ）素子を具え、
前記非回折性光束発生手段として、アキシコンレンズを具え、
前記周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（１）を満足し、
前記アキシコンレンズの入射端側であって、当該アキシコンレンズに入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を具えてなる
ことを特徴とする波長変換装置。

$$\Lambda = 2lc / \cos\theta \quad \cdots (1)$$

但し、lc は、擬似位相整合による前記光第２高調波発生素子のコヒーレンス長を表し、θは、前記非回折性光束発生手段から出射された波数ｋの光束が光軸となす角である。
【請求項１１】
請求項１０に記載の波長変換装置において、
前記アキシコンレンズの入射端側に、前記波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造を具えてなる

ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項１２】
非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
前記半導体レーザから出射された光から、前記波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え、
前記波長変換素子として、周期的分極反転構造を設けた擬似位相整合（ＱＰＭ）による和周波発生（ＳＦＧ）素子を具え、
前記非回折性光束発生手段として、アキシコンレンズを具え、
前記周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（２）を満足し、且つ、
擬似位相整合による前記和周波発生素子の位相不整合Δｋが下記の式（３）を満足し、
前記アキシコンレンズの入射端側であって、当該アキシコンレンズに入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を具えてなる
ことを特徴とする波長変換装置。

$$\Lambda = (2\pi / \Delta k) / \cos\theta \quad \cdots (2)$$

$$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 \quad \cdots\cdots (3)$$

但し、k_1は、第１の基本波の波数を表し、
k_2は、第２の基本波の波数を表し、
k_3は、和周波の波数を表す。
また、θは、k_1 およびk_2 が、光軸となす角度を表す。
【請求項１３】
請求項１２に記載の波長変換装置において、
前記アキシコンレンズの入射端側に、前記波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造を具えてなる
ことを特徴とする波長変換装置。
【請求項１４】
非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
前記半導体レーザから出射された光から、前記波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え
前記波長変換素子として、周期的分極反転構造を設けた擬似位相整合（ＱＰＭ）による差周波発生（ＤＦＧ）素子を具え、
前記非回折性光束発生手段として、アキシコンレンズを具え、
前記周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（４）を満足し、且つ、
擬似位相整合による前記差周波発生素子の位相不整合Δｋが下記の式（５）を満足し、
前記アキシコンレンズの入射端側であって、当該アキシコンレンズに入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を具えてなる
ことを特徴とする波長変換装置。

$$\Lambda = (2\pi / \Delta k) / \cos\theta \quad \cdots (4)$$

$$\Delta k = k_1 - k_2 - k_3 \quad \cdots\cdots (5)$$

但し、k_1 は、第１の基本波の波数を表し、
k_2 は、第２の基本波の波数を表し、
k_3 は、差周波の波数を表す。
また、θは、k_1 およびk_2 が光軸となす角度を表す。
【請求項１５】
請求項１４に記載の波長変換装置において、
前記アキシコンレンズの入射端側に、前記波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造を具えてなる

ことを特徴とする波長変換装置。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【産業上の利用分野】
この発明は、半導体レーザ（ＬＤ；Ｌａｓｅｒ　Ｄｉｏｄｅ）を光源とした基本波の波長を変換するための波長変換方法およびそれを用いた波長変換装置に関する。
【０００２】
【従来の技術】
従来の波長変換装置の一例として、文献１：「Ｏ　ｐｌｕｓ　Ｅ，１９９４年４月号，ｐｐ．６０～６５」に、光導波路を具え、擬似位相整合（ＱＰＭ；Ｑｕａｓｉ－Ｐｈａｓｅ　Ｍａｔｃｈｉｎｇ）を利用した光第２高調波発生（ＳＨＧ；Ｓｅｃｏｎｄ－Ｈａｒｍｏｎｉｃ　Ｇｅｎｅｒａｔｉｏｎ）素子を用いた例が記載されている。この文献１に記載のＱＰＭによるＳＨＧ素子（以下、ＱＰＭ　ＳＨＧ素子とも略称する）の例によれば、光導波路中に基本波を伝播させることにより、高いエネルギー密度を保ったまま長い距離を基本波を波長変換素子（非線形光学結晶中）を伝播させることができる。その結果、高い変換効率を達成することができる。また、波長変換された光（例えば、光第２高調波（ＳＨ波））は、平行ビーム化および回折限界の集光が可能であるという優れた特性を有している。
【０００３】
【発明が解決しようとする課題】
しかしながら、光導波路型の波長変換素子においては、基本波を光導波路に効率よく入射させるために、精密な位置合わせが必要となる。
【０００４】
一方、光導波路を設けないバルク型の波長変換素子においては、精密な位置合わせは不要であるが、基本波を長い距離、基本波のエネルギー密度を高く保ったまま、波長変換素子中（非線形光学結晶中）を伝播させることは困難である。その結果、バルク型の波長変換素子では、光導波路型の波長変換素子に比べて、変換効率が低くなってしまうという問題点があった。
【０００５】
このため、基本波を波長変換素子に入射するための精密な位置合わせが不要であり、且つ、波長の高効率変換ができる波長変換方法および波長変換装置の実現が望まれていた。
【０００６】
また、波長変換方法および波長変換装置に用いて好適な、より高い強度の非回折性光束を発生できる非回折性光束発生装置の実現が望まれていた。
【０００７】
【課題を解決するための手段】
＜第１の発明＞
この出願に係る第１の発明の波長変換方法によれば、バルク型の波長変換素子に基本波を入射して波長変換を行うにあたり、
この基本波として非回折性光束を入射させる
ことを特徴とする。
【０００８】
また、第１の発明の波長変換方法において、波長変換素子として、光第２高調波発生（ＳＨＧ）素子を用いることにより、光第２高調波を発生させることが望ましい。
【０００９】
また、第１の発明の波長変換方法において、波長変換素子として、和周波発生（ＳＦＧ）素子を用いることにより、和周波を発生させることが望ましい。
【００１０】
また、第１の発明の波長変換方法において、波長変換素子として、差周波発生（ＤＦＧ）素子を用いることにより、差周波を発生させることが望ましい。

【００１１】
また、第１の発明の波長変換方法において、好ましくは、波長変換素子として、擬似位相整合（ＱＰＭ）による波長変換素子を用い、
光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を用いて、基本波の一部分の位相を遅らせることにより、当該波長変換素子の擬似位相整合条件を緩和すると良い。
【００１２】
＜第２の発明＞
また、この出願に係る第２の発明の波長変換装置によれば、非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
半導体レーザから出射された光から、波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具えてなる
ことを特徴とする。
【００１３】
また、第２の発明の波長変換装置において、波長変換素子を第２高調波発生（ＳＨＧ）素子とすることが望ましい。
【００１４】
また、第２の発明の波長変換装置において、波長変換素子を和周波発生（ＳＦＧ）素子とすることが望ましい。
【００１５】
また、第２の発明の波長変換装置において、波長変換素子を差周波発生（ＤＦＧ）素子とすることが望ましい。
【００１６】
また、第２の発明の波長変換装置において、波長変換素子を擬似位相整合（ＱＰＭ）による波長変換素子とすることが望ましい。
【００１７】
また、より好ましくは、ＱＰＭを利用した波長変換素子を具えた波長変換装置において、非回折性光束発生手段の入力側に、波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する光学手段を具えてなると良い。
【００１８】
また、より好ましくは、ＱＰＭを利用した波長変換素子を具えた波長変換装置において、非回折性光束発生手段の入力側であって、該非回折性光束発生手段に入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する、位相シフト板を具えてなると良い。
【００３３】
＜第３の発明＞
また、この出願に係る第３の発明の波長変換装置によれば、非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
半導体レーザから出射された光から、波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え
波長変換素子として、周期的分極反転構造を設けた擬似位相整合（ＱＰＭ）による光第２高調波発生（ＳＨＧ）素子を具え、
非回折性光束発生手段として、アキシコンレンズを具え、
この周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（１）を満足する
ことを特徴とする。
$$\Lambda = 2 l_c / \cos\theta \quad \cdots (1)$$
但し、l_c は、擬似位相整合による光第２高調波発生素子のコヒーレンス長を表し、θは、非回折性光束発生手段から出射された波数ｋの光束が光軸となす角である。
【００３４】

$\Lambda = 2 l_c / \cos\theta$・・・（１）
但し、l_c は、擬似位相整合による光第２高調波発生素子のコヒーレンス長を表し、θは、非回折性光束発生手段から出射された波数ｋの光束が光軸となす角である。
【００３５】
また、第３の発明の波長変換装置において、アキシコンレンズの入射端側に、波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造を具えてなることが望ましい。
【００３６】
また、第３の発明の波長変換装置において、アキシコンレンズの入射端側であって、当該アキシコンレンズに入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を具えてなることが望ましい。
【００３７】
＜第４の発明＞
また、この出願に係る第４の発明の波長変換装置によれば、非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
半導体レーザから出射された光から、波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え
波長変換素子として、周期的分極反転構造を設けた擬似位相整合（ＱＰＭ）による和周波発生（ＳＦＧ）素子を具え、
非回折性光束発生手段として、アキシコンレンズを具え、
この周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（２）を満足し、且つ、
擬似位相整合による和周波発生素子の位相不整合Δｋが下記の式（３）を満足する
ことを特徴とする。
【００３８】
$\Lambda = (2\pi / \Delta k) / \cos\theta$・・・（２）
$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$　　・・・（３）
但し、k_1 は、第１の基本波の波数を表し、
k_2 は、第２の基本波の波数を表し、
k_3 は、和周波の波数を表す。
また、θは、k_1 およびk_2 が、光軸となす角度を表す。
【００３９】
また、第４の発明の波長変換装置において、アキシコンレンズの入射端側に、波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造を具えてなることが望ましい。
【００４０】
また、第４の発明の波長変換装置において、アキシコンレンズの入射端側であって、当該アキシコンレンズに入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を具えてなることが望ましい。
【００４１】
＜第５の発明＞
また、この出願に係る第５の発明の波長変換装置によれば、非光導波路型のバルク型の波長変換素子と、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）とを具えた波長変換装置であって、
半導体レーザから出射された光から、波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具え
波長変換素子として、周期的分極反転構造を設けた擬似位相整合（ＱＰＭ）による差周波発生（ＤＦＧ）素子を具え、
非回折性光束発生手段として、アキシコンレンズを具え、
この周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（４）を満足し、且つ、

擬似位相整合による差周波発生素子の位相不整合Δｋが下記の式（５）を満足することを特徴とする。

【００４２】

Λ＝（２π／Δｋ）／ｃｏｓθ・・・（４）

Δｋ＝k_1－k_2－k_3　　・・・（５）

但し、k_1は、第１の基本波の波数を表し、

k_2は、第２の基本波の波数を表し、

k_3は、差周波の波数を表す。

また、θは、k_1およびk_2が光軸となす角度を表す。

【００４３】

また、第５の発明の波長変換装置において、アキシコンレンズの入射端側に、波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造を具えてなることが望ましい。

【００４４】

また、第５の発明の波長変換装置において、アキシコンレンズの入射端側であって、当該アキシコンレンズに入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する位相シフト板を具えてなることが望ましい。

【００５２】

【作用】

この出願に係る第１の発明の波長変換方法によれば、バルク型の波長変換素子に基本波として非回折性光束を入射させる。また、この出願に係る第２の発明の波長変換装置によれば、波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具えている。また、この出願に係る第３～５の発明の波長変換素子によれば、非回折性光束発生手段としてアキシコンレンズを具えている。

【００５３】

その結果、この出願に係る各発明においては、非回折性光束を基本波とすることにより、光導波路を用いずに、基本波を高いエネルギー密度を保ったまま、長い距離波長変換素子中（非線形光学結晶中）を伝播させることができる。このため、光導波路を用いずに、波長の高効率変換を実現することが可能となる。また、光導波路を用いないため、基本波を光導波路に効率よく入射させるための精密な位置合わせ技術が不要となる。

【００５４】

＜非回折性光束について＞

以下、図２を参照して、非回折性光束（ベッセルビームとも称する）について説明する。

【００５５】

従来、光導波路中では、光の強度分布が光の伝播方向に垂直な全ての面で等しくなるようにして光は伝播する。一方、非回折性光束は、光導波路中でなく、自由空間中を、光の強度分布が光の伝播方向に垂直な全ての面で等しくなるようにして伝播する。但し、このような光は数学的には厳密には存在しないが、レーザ光の様な可干渉性の強い光について、近似的に作り得ることが知られている。非回折性光束を発生させる方法の一例が、例えば、文献２：「Ｐｈｙｓｉｃａｌ　Ｒｅｖｉｅｗ　Ｌｅｔｔｅｒｓ　Ｖｏｌｕｍｅ　５８，Ｎｕｍｂｅｒ１５　１３Ａｐｒｉｌ　１９８７　ｐｐ．１４９９－１５０１」または文献３：「応用物理第５９巻１９９０年　ｐｐ．７４６－７５０」に開示されている。

【００５６】

非回折性光束発生手段としては、例えばアキシコンレンズや円環状のスリットを用いることができる。アキシコンレンズを用いた光学系で非回折性光束が得られるということは、文献４：「Ｏ　ｐｌｕｓ　Ｅ，１９９２年９月号　ｐｐ．８４－８９」に説明されている。特に、文献４の８７頁に詳しい解説がある。この解説によれば、アキシコンレンズを用いることにより、１００％近い効率で非回折性光束を得ることができる。さらに、条件を揃えれば、数ミリ程度の距離を直径１μｍの光スポットを保ったまま伝播させることができる。

【００５７】
また、非回折性光束発生手段として、例えば、円環状のスリットを用いることもできる。この場合は、アキシコンレンズのような特殊なレンズを使うことなく通常のレンズと円環状のスリットを用いて容易に非回折性光束を得ることができる。但し、円環状のスリットを用いた場合は、非回折性光束の光強度を強くすることが困難である。そこで、様々な非回折性光束発生手段が提案されている。例えば、文献５：「特開平４－１４５１２号公報」にも非回折性光束発生手段の例が開示されている。この出願に係る各発明では、従来の周知のいずれの非回折性光束発生手段を用いても良い。

【００５８】
ここでは、非回折性光束をアキシコンレンズを用いて発生させる場合について説明する。図２に示すように、アキシコンレンズとは、円錐形部分を有するレンズである。屈折率ｎのガラスからなる頂角２Ａのアキシコンレンズにレーザダイオードの発振光（以下、単にレーザ光とも称する）であって、コリメートされた平行光が入射する。尚、コリメートに必要な光学系は、従来周知の光学系を用いることができる。アキシコンレンズを構成するガラスの屈折率ｎおよびアキシコンレンズの頂角２Ａは、レーザ光の波長と共に（近似的）非回折性光束のビーム系や伝播長を決める因子となる。

【００５９】
ここで、図２の光軸上右向きにｚ軸をとり、このｚ軸と直交する面をｘｙ面とすると、図２の破線の領域に分布する非回折性光束の電界は、定数項を省略して、下記の（１１）式で表すことができる。

【００６０】
$E(x,y,z,t)=\exp[i(\beta z-\omega t)]\ J_0(\alpha r)$・・・（１１）
但し、$r=(x_2+y_2)^{1/2}$、$J_0(\alpha r)$は第１種０次ベッセル関数、$\alpha^2+\beta^2=(\omega/C)^2$、ωは非回折性光束（ベッセルビーム）の角周波数、Ｃは真空中の光の速度をそれぞれ表す。

【００６１】
さらに、非回折性光束の直感的な説明をすれば、非回折性光束は、波数ベクトルk_1の光ビームと波数ベクトルk_2の光ビームとの光軸（ｚ軸）上の干渉によって生ずると考えられる。両光ビームの波数ベクトルk_1およびk_2の方向とｚ軸とのなす角度をθとすれば、波数ベクトルk_1は（２π／λ）（ｃｏｓθ、ｓｉｎθ）と表され、一方、波数ベクトルk_2は（２π／λ）（ｃｏｓθ、－ｓｉｎθ）と表すことができる。但し、λは波長を表す。

【００６２】
そこで、ｚ軸上に形成される非回折性光束を、光軸（ｚ軸）上についてその位相に注目して定数項および振幅項を無視して表現すれば、下記の（１２）式で表すことができる。

【００６３】
$E(z)=\exp[i(\omega t-kz\cos\theta)]$・・・（１２）
但し、ωは角周波数、ｋ＝２πｎ／λ、ｎは屈折率を表す。

【００６４】
（１２）式は、位相速度がω／（ｋｃｏｓθ）である点を除き通常の平面波と同じである。従って、非回折性光束は、位相速度がω／（ｋｃｏｓθ）であって、ビーム径が細いままで拡がることなく伝播する平面波であると近似的に考えることができる。

【００６５】
アキシコンレンズを用いた場合、アキシコンレンズを構成するガラスの屈折率をｎ、頂角の半値をＡとすれば、ｎ＝ｃｏｓ（Θ－θ）／ｃｏｓＡであるから、θは下記の（１３）式
$\theta=\Theta-\cos^{-1}(n\cos\Theta)$・・・（１３）
で表すことができる。

【００６６】
そして、この非回折性光束を基本波として波長変換素子に入射した場合の波長変換効率は

、非回折性光束の強度が強い程高くなる。

【００６７】

ここで、図８を参照して、非回折性光束の強度と非回折性光束発生手段（非回折性光束発生装置）との関係について説明する。図８は、非回折性光束発生手段の一例を示す。この光学系においては、先ず平行ビームは第１光学系によって円環状のスポットに集光される。集光された光は第２光学系の筒状光束コリメータによって円筒状の平行光束となって、第２光学系のアキシコン光学系に入射する。そして、アキシコン光学系は非回折性光束を発生させる。

【００６８】

ところで、非回折性光束の強度は、非回折性光束の存在範囲の長さZ_{MAX}に反比例する。また、この強度は、非回折性光束発生手段（または非回折性光束発生装置とも称する）に入射する平行ビームのビーム径D_0が大きい程強くなる。また、この強度は、非回折性光束発生手段の第２光学系によって集光された非回折性光束を含むエアリーディスクの直径Wが小さい程強くなる。従って、この強度は、D_0／Wに反比例する。また、非回折性光束の強度は、非回折性光束を含むエアリーディスクの光電場の平均エネルギーの（２π／λ）ｓｉｎθに反比例する。即ち、平均エネルギーが大きい程、非回折性光束に集束する光エネルギーが小さくなる。

【００６９】

このビーム径D_0および波長λは、光源の半導体レーザによって決まる。このため、非回折性光束の強度を高くするには、存在範囲の長さZ_{MAX}を大きくすることなく、エアリーディスクの直径Wおよび、第２光学系で集束させた光ビーム（波数ベクトルk_1の光ビームと波数ベクトルk_2の光ビーム）との光軸（ｚ軸）とのなす角度θの少なくとも一方を小さくすれば良いことになる。

【００７０】

＜第１光学系について＞

そこで、第２の発明の波長変換素子において、非回折性光束発生手段の第１光学系として、軸はずれの凸レンズを、当該凸レンズのメリディオナル面と当該凸レンズの外縁部との交点を通り、光軸と平行な回転軸の周りに回転して得られる断面形状を有するトロイダルレンズを以って構成することが望ましい。但し、この断面形状とは、回転軸を含む平面で切った場合の断面形状を指す。尚、この場合の非回折性光束発生手段は、第１参考例の非回折性光束発生装置に相当する。

【００７１】

その結果、第１光学系によって焦点を結ぶ円環状のスポットの直径D_fを第１光学系の有効口径の１／２よりも小さくすることができる。スポットの直径D_fを小さくすることにより、直径Wおよび角度θを小さくすることができる。このため、光束のエネルギーを光軸近傍に集中させて、強度を高くすることができる。

【００７２】

また、この軸はずれの凸レンズを回転して得られる断面形状を有するトロイダルレンズと等価な作用を有するゾーンプレートを第１光学系として用いても、円環状のスポットの直径D_fをゾーンプレートの有効口径D_0の１／２よりも小さくすることができる。尚、このゾーンプレートを具えた非回折性光束発生手段は、第２参考例の非回折性光束発生装置に相当する。また、ゾーンプレートを用いれば、原理的に球面収差の発生を無くすることができる。

【００７３】

この点、従来の非回折性光束発生装置においては、例えば、上述の文献５に開示されているように、円環状のスポットの直径は、第１光学系のトロイダルレンズの有効口径の１／２になる。これは、このトロイダルレンズが通常の凸レンズをその外縁の一点を回転軸として回転させて得られる断面形状を有しているからである。このため、この文献５に開示の技術では、スポットの直径を１／２よりも小さくすることができない。

【００７４】

＜第２光学系について＞

また、第２の発明の波長変換素子において、非回折性光束発生手段の第２光学系として、アキシコン光学系の他に、円環状のスポットに集光された光を円筒状の平行光束にするための筒状光束コリメータを設けることが望ましい。尚、この場合の非回折性光束発生手段の構成は、第３参考例の非回折性光束発生装置に相当する。その結果、平行光束のエネルギーを平行光束の周辺部の円筒状の狭い領域に集束させることができる。即ち、円筒の壁の厚さを薄くすることができる。このため、エネルギーを高くした光をアキシコン光学系に入射することができる。このため、直径Ｗおよび角度θを小さくすることができる。

【００７５】

また、筒状光束コリメータとアキシコン光学系との間の筒状の平行光束では位相差が発生しない。従って、筒状光束コリメータとアキシコン光学系とは、原理的に一体化することができる。

【００７６】

そこで、第２の発明の波長変換素子において、非回折性光束発生手段の第２光学系として、筒状光束コリメータおよびアキシコン光学系と等価な作用を有する単一のゾーンプレートを設けることが望ましい。単一のゾーンプレートを設けることにより、バルクのレンズを設ける場合よりも第２光学系の構成を簡単にすることができる。尚、この場合の非回折性光束発生手段の構成は、第４参考例の非回折性光束発生装置に相当する。また、ゾーンプレート用いれば、原理的に球面収差の発生を無くすることができる。

【００７７】

＜存在範囲について＞

また、第２の発明の波長変換装置において、非回折性光束の発生する領域（存在範囲）の長さZ_{MAX}を、波長変換素子の素子長（有効長）と等しくすると良い。非回折性光束の強度は、この領域の長さが短い程強い。しかし、素子の有効長よりも領域の長さを短くすると、波長変換効率が低下する。従って、領域の長さを素子長とすれば、変換効率を最も高くすることができる。

【００７８】

＜位相整合について＞

・ＳＨＧの場合

この出願に係る第１および第２の発明において、バルク型の波長変換素子であって、２次の非線形相互作用により実現する光第２高調波発生（ＳＨＧ）素子に非回折性光束を入射すれば、高精度の位置合わせを行わずに、高効率の変換を行うことが可能となる。

【００７９】

ここでは、特に、周期的分極反転構造を有し、擬似位相整合（ＰＱＭ）を利用したＳＨＧについて説明する。この場合は、第３の発明の波長変換装置に相当する。

【００８０】

基本波は、上述した（１２）式で与えられる非回折性光束であり、これを実数表示すれば、下記の（１４）式で表すことができる。

$E(z)=E\cos(\omega t-k_f z\cos\theta)$・・・（１４）

但し、ωは基本波の角周波数、k_fは基本波の波数ベクトルをそれぞれ表す。

【００８１】

また、発生する光第２高調波（ＳＨ波）の電界は、下記の（１５）式で表される。

$E_{sh}(z)=E_{sh}\cos(\omega_{sh} t-k_{sh} z\cos\theta)$・・・（１５）

但し、ω_{sh}はＳＨ波の角周波数、k_{sh}はＳＨ波の波数ベクトルをそれぞれ表す。

【００８２】

そして、電場Ｅによって誘起される電気分極Ｐは、下記の（１６）式で表される。

$P=\chi_1 E+\chi_2 EE+\chi_3 EEE+$・・・（１６）

但し、χ_1、χ_2、χ_3…は、それぞれ、１次、２次、３次…の電気感受率を表す。

【００８３】

従って、２次の非線形分極P_{sh}は、下記の（１７）式で表される。

$P_{sh}=(1/2)\ \chi_2\ E^2\ \cos(\omega_{sh}t-2k_f\ z\cos\theta)$・・（１７）
この２次の非線形分極成分を下記の（１８）式の波動方程式の駆動成分として、着目する周波数（ここではω_{sh}）について解くことによって非線形光学相互作用を解析することができる。
【００８４】
【数１】

$$\nabla\times\nabla\times E+\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0 E)+\mu_0\ \varepsilon\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}E$$

$$=-\mu_0\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}P\cdots(18)$$

【００８５】
従って、下記の（１９）式を解くことになる。
$\nabla\times\nabla\times E_{sh}\cos(\omega_{sh}t-k_{sh}z\cos\theta)$
$+\omega_{sh}^2\ \varepsilon\ \mu E_{sh}\cos(\omega_{sh}t-k_{sh}z\cos\theta)$
$=-\omega_{sh}^2\ \mu P_{sh}$・・・（１９）
相互作用はコリニアに生じ、ＳＨ成分への変換が緩やかであるとすると（１９）式は、下記の（２０）式のように表せる。
【００８６】
【数２】

$$\frac{dE_{sh}}{dz}=i\frac{\omega_{sh}}{2}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_{sh}}}\chi_2\ E_f^2\exp(-i\Delta kz)\cdots(20)$$

【００８７】
ＳＨ波への変換が小さければ、基本波のエネルギーの減少分を無視することができる。その場合のＳＨ波の出力は下記の（２１）式のように表せる。

$P_{sh}=1/2\ (\varepsilon/\mu_0)^{1/2}\ E_{sh}^2\ A$
$=2\ (\varepsilon_0/\mu_0)^{3/2}\ \{(\omega^2\ \chi_2^2 l^2)/(n^2\ n_{sh})\}$
$\{P^2/A\}\ \{(\sin(\Delta k l/2))/(\Delta k l/2)^2\}$
・・・（２１）

但し、Δｋは、位相不整合成分を表し、$\Delta k=k_{sh}\cos\theta-2k_f\cos\theta$で表される。また、ｎ、$n_{sh}$はそれぞれ基本波およびＳＨ波の屈折率、Ａはベッセルビームの断面積、ｌは相互作用長を表し、μ_0は真空中の透磁率、また、ε、ε_0はそれぞれ結晶中および真空中の誘電率を表す。
【００８８】
従って、位相不整合量Δｋは、下記の（２２）式のように表せる。

$\Delta k=k_{sh}\cos\theta-2k_f\cos\theta$
$=(4\pi/\lambda)\ n_{sh}\cos\theta-2\ (2\pi/\lambda)\ n\cos\theta$
$=(4\pi/\lambda)\ (n_{sh}-n)\cos\theta$・・・（２２）

従って、擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満たすための周期的分極反転構造の周期Λは、非線形光学結晶のコヒーレンス長をl_Cとすると、下記の（２３）式のように表せる。
【００８９】

$\Lambda=2l_C\ (1/\cos\theta)$
$=(\lambda/2)/[(n_{sh}-n)\cos\theta]$・・・（２３）

上記（２３）式を通常のコリメート光を基本光とする擬似位相整合によるＳＨＧ（いわゆる従来のＱＰＭ　ＳＨＧ）と比較すると、非回折性光束を基本波とした場合は、従来のＱＰＭ　ＳＨＧと周期Λが（１／ｃｏｓθ）倍になる点が異なるだけであることが分かる

。
【００９０】
・ＳＦＧの場合
また、この出願に係る第１および第２の発明において、バルク型の波長変換素子であって、２次の非線形相互作用により実現する和周波発生（ＳＦＧ）素子に非回折性光束を入射すれば、高精度の位置合わせを行わずに、高効率の変換を行うことが可能となる。
【００９１】
ここでは、特に、周期的分極反転構造を有し、擬似位相整合（ＰＱＭ）を利用したＳＦＧについて説明する。この場合は、第４の発明の波長変換装置に相当する。
【００９２】
上述したＳＨＧ素子を用いた説明において、上記の（２２）式において、バルクの非線形光学結晶の位相不整合を表す$\Delta k = k_{sh} - 2k_f$ を、下記の（２４）式のように表し、
$\Delta k = k_{sh} - k_f - k_f$ ・・・（２４）
k_f の代わりに、それぞれ和周波の第１の基本波（波長λ_1）の波数k_1と第２の基本波（波長λ_2）の波数k_2を代入すれば、ＳＦＧのための位相不整合は、下記の（２５）式のように表せる。
【００９３】
$\Delta k_S = k_3 - k_2 - k_1$ ・・・（２５）
但し、k_3 は和周波（波長λ_3）の波数を表す。
【００９４】
従って、ＳＦＧのための周期Λは、下記の（２６）式
$\Lambda = (2\pi / \Delta k_S) / \cos\theta$ ・・・（２６）
で表せる。
【００９５】
・ＤＦＧの場合
また、この出願に係る第１および第２の発明において、バルク型の波長変換素子であって、２次の非線形相互作用により実現する差周波発生（ＤＦＧ）素子に非回折性光束を入射すれば、高精度の位置合わせを行わずに、高効率の変換を行うことが可能となる。
【００９６】
ここでは、特に、周期的分極反転構造を有し、擬似位相整合（ＱＰＭ）を利用したＤＦＧについて説明する。この場合は、第５の発明の波長変換装置に相当する。
【００９７】
この場合は、上記の（２４）式中のk_f の代わりに、それぞれ和周波の第１の基本波（波長λ_1）の波数$-k_1$と第２の基本波（波長λ_2）の波数k_2を代入すれば、ＳＦＧのための位相不整合は、下記の（２７）式のように表せる。
$\Delta k_D = k_1 - k_2 - k_3$ ・・・（２７）
但し、k_3 は、差周波（波長λ_3）の波数を表す。
【００９８】
従って、ＳＦＧのための周期Λは、下記の（２７ａ）式
$\Lambda = (2\pi / \Delta k_D) / \cos\theta$ ・・・（２７ａ）
で表せる。
【００９９】
＜ブラッグロッキングについて＞
擬似位相整合（ＱＰＭ）を利用した波長変換素子を用いる場合、周期的分極反転構造の周期がＱＰＭ条件を厳密に満足している限り、所定の変換効率が達成される。この周期Λは上記の（２３）式に示すように波長λに依存する。ところで、基本波の光源としてＬＤを用いた場合、ＬＤの発振波長は、周囲の温度や駆動電流により簡単に変動し、これをＱＰＭ条件を安定的にしかも正確に満足する値に規定することは一般的に困難である。そこで、光導波路を具えたＱＰＭ　ＳＨＧ素子を用いた波長変換装置において、ＬＤの波長変動の問題を解決するための方法が、例えば、下記の文献６～９に種々提案されている。文

献６：「米国特許第５，２４７，５２８号」、文献７：「特開平５－６６４４０号公報」、文献８：「特開平５－１１２９７号公報」、文献９：「特開平５－２５７１８４号公報」これらの文献に開示の技術は、いずれも波長変換素子から何らかの方法でブラッグ反射が起こって、その反射光をＬＤに帰還させることにより、ＬＤの発振波長を安定化（ブラッグロッキング）するものである。

【０１００】

そこで、この出願に係る各発明では、非回折性光束発生手段の入力側に、波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する光学手段（例えば、多層膜反射構造や回折格子）を設ければ、バルク型の波長変換素子を用いた場合にも、ＬＤの発振波長を安定化させて、変換効率の向上を図ることができる。

【０１０１】

＜位相シフト板について＞

ＱＰＭを利用した場合の波長変換素子は、通常、規則正しい周期構造を有する。そのために、位相整合条件が厳しく、即ち波長変換する基本波光の波長許容幅が狭いために、実用上の障害の一つとなっていた。

これは、以下に説明するように、波長変換素子の周期誤差Δτが生じ得るためである。

【０１０２】

位相不整合をΔｋと表すと、通常、周期的分極反転構造の周期Λは、下記の（２８）式

$$\Lambda = 4\pi / \Delta k \quad \cdots (28)$$

で表される。

【０１０３】

しかし、通常上記の（２８）式は厳密に満たされることは少なく、下記の（２８ａ）式のように周期誤差Δτ（正、負いずれの場合もある）を持つ。

$$\Lambda = \Lambda + \Delta\tau \quad \cdots (28a)$$

この原因は、波長変換素子の形成の時点で入り込む因子の他、素子の温度によってもその屈折率が変化するために生じ得るものである。

【０１０４】

今、仮に、例えばＳＨＧ素子の素子長をＬとし、$\Delta k = (4\pi/\lambda)(n_{sh} - n)\cos\theta$）として、下記の（２９）式即ち（３０）式で与えられる範囲以上に素子長Ｌを長くしても変換効率は却って低下してしまう。

【０１０５】

$$(L/\lambda)\Delta\tau < (\lambda/4) / [(n_{sh} - n)\cos\theta] \quad \cdots (29)$$

即ち、

$$L < (\lambda/4)(\Lambda/\Delta\tau) / [(n_{sh} - n)\cos\theta] \quad \cdots (30)$$

なぜならば、Δτは、ＱＰＭ条件を満足させるために設けられた周期構造１周期あたりの寸法誤差であり、Ｌ／Λは、全素子長にわたった周期の数であるから、（Ｌ／Λ）Δτは、全素子長にわたった寸法誤差となる。即ち、周期的分極反転構造を作りつけられた結晶（波長変換素子）内において、この寸法誤差が基本波と波長変換された発生波（例えば第２高調波）との相互コヒーレンス長を越えてしまうためである。

【０１０６】

そこで、この出願の各発明において、非回折性光束発生手段の入力側であって、該非回折性光束発生手段に入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する、位相シフト板を設ければ、位相整合条件の緩和を図ることができる。位相シフト板としては、例えば、アキシコンレンズの入力端側に、一様な屈折率を持つ薄膜を形成すれば良い。薄膜の屈折率および膜厚を制御することにより、位相の遅れ量を適切に調節して位相整合条件の緩和を図ることができる。位相シフト板（薄膜）は、例えば、光軸を中心とした円形状としても良く、また、光軸から離れた周辺部に、光軸を中心とした同心円状に設けても良い。

【０１０７】

位相シフト板により基本波の位相を遅らせれば、Δτによる位相ずれを補償して、ＱＰＭ

条件を緩和することが可能となる。その結果、素子長を長くすることができるので、より変換効率を向上させることが可能となる。

【０１０８】

例えば、下記の（３１）式に示す距離だけ、基本波がＱＰＭ　ＳＨＧ素子を伝播した場合、基本波の位相とＳＨ波の位相との位相差が丁度πとなる。

【０１０９】

$$L=(\lambda/4)(\Lambda/\Delta\tau)/[(n_{sh}-n)\cos\theta] \quad \cdots (31)$$

そこで、位相シフト板により、位相を例えばπだけ遅らせると、素子長を２倍程度にすることができる。変換効率は素子長の２乗に比例するので、この場合、変換効率は最大４倍とすることができる。

【０１１０】

尚、ＳＨＧ素子を用いた場合は、位相不整合Δｋは、下記の（３２）として表したが、ＳＦＧの場合は下記の（３３）式、ＤＦＧの場合は下記の（３４）式とすることにより、ＳＨＧと数学的に同様に扱うことができる。

【０１１１】

$$\Delta k = k_{sh} - k_f - k_f \quad \cdots (32)$$

$$\Delta k_S = k_3 - k_2 - k_1 \quad \cdots (33)$$

$$\Delta k_D = k_1 - k_2 - k_3 \quad \cdots (34)$$

従って、ＳＦＧおよびＤＦＧの場合においても、位相シフト板を設ければ、ＳＨＧと同様にＱＰＭ条件を緩和して変換効率の向上を図ることができる。

【０１１２】

また、位相をシフトさせる手段としては、位相シフト板の他に、例えば、第２光学系を構成するゾーンプレートに位相シフト板と等価な作用を持たせることもできる。

【０１１３】

＜限界集光手段について＞

第２の発明の波長変換装置において、波長変換素子によって波長変換された出射光を限界集光するための限界集光手段として、出射光を一旦筒状の平行光束にするためのコリメータと、円筒状の平行光束を集光するための集光手段を設けることが望ましい。

【０１１４】

波長変換素子からの出射光は、光軸に垂直な断面において円環状の光強度分布を有し、光軸上の光強度は０である。この出射光を一旦、アキシコンレンズを用いて平行光束にする。平行光束にすることにより、光強度分布を平行光束の周辺部に円筒状に集中させることができる。このため、出射光を光軸上の光強度を０にしたまま集光用の凸レンズに入射させることができる。その結果、光強度がガウス分布の光強度を有する通常の平行光束を集光した場合のスポットの半径よりも小さい超解像のスポットにこの出射光を限界集光することができる。

【０１１５】

また、このアキシコンレンズと凸レンズとの間の筒状の平行光束には位相差が発生しない。このため、このアキシコンレンズと凸レンズとを原理的に一体化することができる。従って、このアキシコンレンズおよび凸レンズの組合せと等価な作用を有する単一のゾーンプレートを用いても限界集光を行なうことができる。また、ゾーンプレートを用いた場合は、球面収差が生じない。

【０１１６】

さらに、好ましくは、アキシコンレンズと凸レンズとを組合せた限界集光光学系またはこのゾーンプレートを用いて限界集光を行なった光を平行光束にするためのコリメータを設ければ、ビーム半径が充分に小さい平行光束を得ることができる。この平行光束の断面強度のプロファイルは、回折効果のために、光軸上の光強度が０でない、ほぼ均一な光強度となる。

【０１１７】

【実施例】

以下、図面を参照して、この出願に係る発明の波長変換方法および波長変換装置の実施例について説明する。尚、参照する図は、これらの発明が理解できる程度に各構成成分の大きさ、形状及び配置関係を概略的に示してあるにすぎない。従って、これらの発明は、図示例にのみ限定されるものでないことは明らかである。尚、図中、図面の理解を容易にするために、断面でない部分にハッチングを付することもある。

【０１１８】

＜第１実施例＞

第１実施例においては、第１の発明の波長変換方法、第２の発明の波長変換装置の一例として、波長変換素子としてＳＨＧ素子を用いた例について説明する。また、この実施例は、第３の発明の波長変換装置の例にも相当する。

【０１１９】

図１は、第１実施例の波長変換装置の説明に供する構成図である。

この実施例の波長変換装置は、基本波光源としての半導体レーザ（ＬＤ）（図示せず）を具えている。また、非光導波路型のバルク型の波長変換素子としてＱＰＭ　ＳＨＧ素子１０を具えている。このＱＰＭ　ＳＨＧ素子は、分極反転領域（ドメイン）が薄膜状であって、この薄膜状のドメインを積層して周期的分極反転構造１２を構成している。この周期的分極反転構造の反転周期Λは、下記の式（１）を満足する。

【０１２０】

$\Lambda = 2l_c / \cos\theta$ ・・・（１）

但し、l_c は、擬似位相整合による光第２高調波発生素子のコヒーレンス長を表し、θは、アキシコンレンズ１４から出射された波数ｋの光束が光軸となす角である。

【０１２１】

そして、半導体レーザから出射された光から、波長変換素子に入射する基本波（半導体レーザ光であって、波長変換される光）としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段１４として、アキシコンレンズ１４を具えている。

【０１２２】

ＬＤから出射したレーザ光は、コリメートされて、アキシコンレンズ１４に、アキシコンレンズの入力端面１６に垂直に入射する。そして、アキシコンレンズ１４によって発生した非回折性光束１８を含むようにＳＨＧ素子１０を配置することにより、基本波としての非回折性光束１８をＳＨＧ素子１０に入射させる。

【０１２３】

尚、非回折性光束は、分極反転構造の界面に必ずしも垂直に入射させなくとも良い。分極反転構造の界面への入射角度を調整することで、実質的に分極反転構造の周期を変えることができる。このことを利用して位相整合条件を整える手段とすることもできる。

【０１２４】

＜変形例＞

また、第１実施例では、ＱＰＭ　ＳＨＧ素子を用いた例について説明したが、ＳＨＧ素子の代わりに、ＱＰＭによるＳＦＧ素子を用いることもできる。その場合、周期的分極反転構造の周期Λを下記の（２）式および（３）式を満足する値とすると良い（第４の発明に相当する。）。

【０１２５】

$\Lambda = (2\pi / \Delta k) / \cos\theta$ ・・・（２）

$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$ ・・・（３）

但し、k_1 は、第１の基本波（波長λ_1）の波数を表し、

k_2 は、第２の基本波（波長λ_2）の波数を表し、

k_3 は、和周波の波数を表す。

また、θは、k_1 およびk_2 が、光軸となす角度を表す。

【０１２６】

図３に、変形例としてのＳＦＧ素子２０を用いた波長変換装置の構成図を示す。図３に示すように、この変形例では、半透鏡（ハーフミラー）２２を用いて第１および第２の

基本波をアキシコンレンズ１４に入射して、アキシコンレンズ１４によって発生した非回折性光束をＳＦＧ素子２０に入射することにより和周波を発生させる。

【０１２７】

また、ＳＨＧ素子の代わりに、ＱＰＭによるＤＦＧ素子を用いることもできる。その場合、周期的分極反転構造の周期Λを下記の（４）式および（５）式を満足する値とすると良い（第５の発明に相当する。）。

【０１２８】

$\Lambda = (2\pi / \Delta k) / \cos\theta$ ・・・（４）

$\Delta k = k_1 - k_2 - k_3$ ・・・（５）

ＤＦＧ素子を用いた波長変化装置も、上記（４）式に示す周期Λの値の他は、図３に示した波長変換素子と同一の構成である。

【０１２９】

ＳＦＧおよびＤＦＧにおいては、素子に入射させる光が２種類であるため、導波路型の場合は位置合わせに高精度が要求されていた。この点、この実施例では、半透鏡を用いて平行な２光束を素子に入射させることができる。従って、高精度の位置合わせは必要としない。

【０１３０】

＜第２実施例＞

第２実施例の波長変換装置は、第１実施例の波長変換装置の、アキシコンレンズ１４の入力端側に、波長変換素子の擬似位相整合（ＱＰＭ）条件を満足する波長に対してブラッグ条件を満足する多層膜反射構造２４を具えている。多層膜反射構造２４により、ＬＤの発振波長を安定化させて、変換効率の向上を図ることができる。

【０１３１】

図４に第２実施例の波長変換装置の構成を示す。図４において、多層反射膜構造２４以外の構成は、第１実施例と同一である。

【０１３２】

尚、図３に示したＳＦＧ素子を用いた波長変換装置（またはＤＦＧ素子を用いた波長変換装置）おいても、第２実施例と同様に多層膜反射構造を設けることにより、ＬＤの発振波長を安定化させて、変換効率の向上を図ることができる。

【０１３３】

また、ブラッグ条件を満足させるための光学手段としては、多層膜反射構造の他に、例えば回折格子を用いても良い。

【０１３４】

＜第３実施例＞

第３実施例の波長変換装置は、第１実施例の波長変換装置のアキシコンレンズ１４に入射する光のうちの一部分の光路上に、基本波の位相を遅らせるための、光軸に関して対称な形状を有する、位相シフト板２６を具えてなる。この位相シフト板を設けることにより、ＱＰＭ条件を緩和して変換効率の向上を図ることができる。

【０１３５】

図５に第３実施例の波長変換装置の構成を示す。図５において、位相シフト板２６以外の構成は、第１実施例と同一である。

【０１３６】

位相シフト板２６をアキシコンレンズの入射端側から見た様子を図６の（Ａ）に示す。この実施例では、位相シフト板の形状をアキシコンレンズの光軸を中心とした同心円状のものを、中心部付近に設けている。また、位相シフト板は、例えば、図６の（Ｂ）に示すように、光軸を中心とした同心円状であって、且つ、光軸から離れた光路の周辺部にドーナツ状に設けることもできる。図６の（Ａ）および（Ｂ）では、位相シフト板２６および２６ａの部分にハッチングを施して示す。

【０１３７】

ＬＤ（図示せず）からのレーザ光は、通常の凸レンズ（図示せず）により平行光束にさ

れてアキシコンレンズ１４に入射する。アキシコンレンズ１４によって、入射光は光軸（ｚ軸）を含み、この光軸に平行な断面で見て、波数ベクトルｋ１ およびｋ２ の両光束が光軸上で干渉して、ゾーン１およびゾーン２の光軸上に非回折性光束を形成する。

【０１３８】

ここで、アキシコンレンズ１４の入射面の光軸の近傍のみに入射光の位相を遅らせるための、薄膜からなる位相シフト板を設ける。その結果、位相シフト板を通過しない光が到達するゾーン１には、通常の位相による非回折性光束が形成される。一方、位相シフト板を通過した光が到達するゾーン２には、位相の遅れた非回折性光束が形成される。この位相の遅れの大きさδは、位相シフト板の屈折率とその厚さで決定される。この位相の遅れについて以下に説明する。

【０１３９】

アキシコンレンズから出射した波数ベクトルk_1 およびk_2 の光束を下記の（３５）式および（３６）式で表し、光軸（ｚ軸）上の位置ベクトルｒを（３７）式で表す。

k_1 ＝ｋ（ｓｉｎθ、０、ｃｏｓθ）・・・（３５）

k_2 ＝ｋ（－ｓｉｎθ、０、ｃｏｓθ）・・・（３６）

ｒ＝（０、０、ｚ）・・・（３７）

但し、ｋ＝２π／λ（λは波数k_1 およびk_2 の光束の波長）であり、θはk_1 およびk_2 の光束が光軸となす角度である。

【０１４０】

そして、波数ベクトルk_1 の光束のうちの、位相シフト板を通過しなかった光束の位相部分は、ωｔ－ｋｃｏｓθｚと表せる。一方、位相シフト板を通過した光束の位相部分は、ωｔ－ｋｃｏｓθｚ－δと表せる。また、波数ベクトルk_2 の光束についても、ｃｏｓ関数の偶関数としての性質から、k_1 の光束と同一の式となる。

【０１４１】

従って、位相シフト板を通過しなかった光束が到達する領域１（ゾーン１）に形成される非回折性光束は、光軸（ｚ軸）上についてのみ着目して振幅部分を省略して書けば、下記の（３８）式のように表せる。

$$\exp[i(\omega t-k\cos\theta z)]+\exp[i(\omega t-k\cos\theta z)]$$
$$=2\exp[i(\omega t-k\cos\theta z)] \quad \cdots (38)$$

従って、位相部分はωｔ－ｋｃｏｓθｚのままである。

【０１４２】

一方、位相シフト板を通過した光が到達する領域２（ゾーン２）に形成される非回折性光束は、下記の（３９）式のように表せる。

$$\exp[i(\omega t-k\cos\theta z-\delta)]+\exp[i(\omega t-k\cos\theta z-\delta)]$$
$$=2\exp[i(\omega t-k\cos\theta z-\delta)] \quad \cdots (39)$$

従って、位相部分は、ωｔ－ｋｃｏｓθｚ－δと表せる。

【０１４３】

このように、領域２では、領域１に比べて位相がδだけ遅れるため、位相ずれΔτを補償してＱＰＭ条件を緩和することができる。

【０１４４】

尚、図３に示したＳＦＧ素子を用いた波長変換装置（またはＤＦＧ素子を用いた波長変換装置）においても、第３実施例同様に位相シフト板を設ければ、ＱＰＭ条件を緩和して変換効率の向上を図ることができる。

【０１４５】

＜第４実施例＞

第４実施例においては、図８を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、非回折性光束発生手段について説明する。また、この実施例における非回折性光束発生手段は、第１および第３参考例の波長変換装置の例にも相当する。

【０１４６】

図８は、第４実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。但し、図８では、光学系および円環状のスポットを斜視図で示す。

【０１４７】

この実施例における非回折性光束発生手段は、半導体レーザ（図示せず）から出射された平行光束４０を円環状のスポット（集光像）４４に集光するための第１光学系４２としての第１トロイダルレンズ４２と、このスポット４４に集光された光から非回折性光束１８を発生させるための第２光学系４６とを具えている。

【０１４８】

この第１トロイダルレンズ４２の断面形状は、軸はずれの凸レンズを、当該凸レンズのメリディオナル面と当該凸レンズの外縁部との２つの交点のうちの当該凸レンズの焦点に近い方の交点を通り、かつ、当該凸レンズの光軸と平行な回転軸の周りに回転して得られるものである。

【０１４９】

ここで、図９を参照して、このトロイダルレンズ４２と円環状スポットの直径について説明する。図９の（Ａ）に示すように、このトロイダルレンズ４２が形成する円環状のスポット４４の直径D_fは、このトロイダルレンズ４２の有効口径D_0の１／２以下にすることができる。また、図９の（Ｂ）に、従来のトロイダルレンズを示す。従来のトロイダルレンズは、通常の凸レンズ（光軸上に焦点を結ぶ凸レンズ）を当該凸レンズの外縁部の一点を通る回転軸の周りに回転させて得られる断面形状を有している。このため、この従来のトロイダルレンズが形成する円環状のスポットの直径r_1は、従来のトロイダルレンズの有効口径の１／２となる。円環上のスポットの直径が小さい程、図７に示した角度θを小さくすることができる。このため、この第１トロイダルレンズ４２を用いることにより、従来のトロイダルレンズを用いた場合よりも強い強度の非回折性光束を得ることができる。

【０１５０】

また、第２光学系は、円環状のスポットに集光された光を円筒状の平行光束５０にするための筒状光束コリメータ４８としての第２トロイダルレンズ４８、この円筒状の平行光束５０を集光して非回折性光束１８を発生するアキシコン光学系５２としてのアキシコンレンズ５２とを以って構成されている。

【０１５１】

この第１トロイダルレンズ４２と第２トロイダルレンズ４８とは、互いに共焦点となるように配置する。従って、第２トロイダルレンズ４８にとっては、円環状のスポット４４は円環状の光源とみなせる。このため、第２トロイダルレンズ４８に入射した光は、円筒状の平行光束となる。その結果、光のエネルギーを平行光束の周辺部の円筒状の領域に収束させ、エネルギー密度を高くした上で、アキシコン光学系５２に入射させることができる。その結果、アキシコン光学系５２によって収束する光によって生じる非回折性光束の強度を強くすることができる。尚、第２トロイダルレンズ４８の焦点距離はできるだけ短い方が望ましい。この焦点距離が短い程、円筒状の平行光束の円筒の厚みを薄くできるために、エネルギー密度をより高くすることができる。

【０１５２】

＜第５実施例＞

第５実施例においては、図１０を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、非回折性光束発生手段について説明する。また、この実施例における非回折性光束発生手段は、第２および第３参考例の波長変換装置の例にも相当する。

【０１５３】

図１０は、第５実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。

【０１５４】

この実施例における非回折性光束発生手段は、半導体レーザ（図示せず）から出射された

平行光束４０を円環状のスポット（集光像）４４に集光するための第１光学系５４としての第１ゾーンプレート５４と、このスポット４４に集光された光から非回折性光束１８を発生させるための第２光学系５６とを具えている。そして、この第１ゾーンプレート５４は、第４実施例の第１トロイダルレンズ４２と等価な作用を有する。また、この第２光学系５６は、第４実施例の第２トロイダルレンズ４８と等価な作用を有する第２ゾーンプレート５８と、アキシコン光学系としてのアキシコンレンズ５２と以って構成されている。

【０１５５】

また、この第１ゾーンプレート５４の位相透過関数ｔ（ρ）は、下記の（４０）式で与えられる。

【０１５６】

$$t(\rho)=\exp\{ik\phi(\rho)\} \quad \cdots (40)$$

但し、ｋは、ｋ＝２π／λを満たす波数であり、λは基本波の波長を表す。また、φは、位相差関数を表す。また、ρは、光軸からの距離を表す。また、第１ゾーンプレートの中心を原点として光軸をｚ軸とし、第１ゾーンプレートをｘｙ平面とすると、$\rho=(x^2+y^2)^{1/2}$ と表せる。

【０１５７】

この第１ゾーンプレート５４によって、円環状のスポット（集光像）を得るためには、入射平面波の第１ゾーンプレートへの同一入射面（光軸および入射光線を含むように決定される平面）内の入射位置ρにかかわりなく、円環状のスポット上の１点までの光学的距離が等しくなるように位相遅れの関数ψ（ρ）を決めれば良い。この位相遅れの関数（位相分布関数とも称する）ψ（ρ）は、下記の（４１）式で定義される。

【０１５８】

$$\psi(\rho)=(2\pi/\lambda)\phi(\rho) \quad \cdots (41)$$

そして、この光学距離を等しくするためには、下記の（４２）即ち（４３）式を満足する位相分布φ（ρ）にすれば良い。

【０１５９】

$$\{(R+r)^2+F^2\}^{1/2}=\{(\rho-r)^2+F^2\}^{1/2}+\phi(\rho) \quad \cdots (42)$$

$$\phi(\rho)=\{(R+r)^2+F^2\}^{1/2}-\{(\rho-r)^2+F^2\}^{1/2} \quad \cdots (43)$$

但し、Ｒはゾーンプレートの有効半径を表し、ｒは円環状のスポットの半径を表し、また、Ｆはゾーンプレートの焦点距離を表す。

【０１６０】

また、$\{(R+r)^2+F^2\}^{1/2}$ は、第１ゾーンプレートの外縁部を通って円環状のスポットに入射する光路における位相を表し、一方、$\{(\rho-r)^2+F^2\}^{1/2}$ は、第１ゾーンプレートの中心からρ離れた点を通って、円環状のスポットに入射する光路における位相を表している。

【０１６１】

この（４３）式の位相差関数φ（ρ）を有するゾーンプレートに平行平面波を入射させれば、このゾーンプレートから距離Ｆの位置に半径ｒの円環状のスポット（集光像）が形成される。

【０１６２】

また、一般に、Ｆ＞＞（Ｒ－ｒ）かつＦ＞＞（ρ－ｒ）であるので、（４３）式は、下記の（４４）式のように簡単化される。

【０１６３】

$$\phi(\rho)=(1/F)\{r^2-r(R+\rho)+(R^2+\rho^2)/2\} \quad \cdots (44)$$

（４４）式を（４１）式に代入すると、下記の（４５）式が得られる。

【０１６４】

$$\psi(\rho)=(2\pi/\lambda)(1/F)\{r^2-r(R+\rho)+(R^2+\rho^2)/2\} \quad \cdots (45)$$

また、第１ゾーンプレート５４の焦点距離をＦ、第２ゾーンプレート５８の焦点距離をｆとすると、第２ゾーンプレートの焦点距離は、第１ゾーンプレートの焦点距離に対して（

Ｆ／ｆ）となる。従って、第２ゾーンプレートは、下記の（４６）式の位相遅れ関数で与えられる位相分布を有すれば良い。

【０１６５】

ψ_2（ρ）＝（Ｆ／ｆ）ψ（ρ）・・・（４６）

上述した位相遅れ関数を有する第１および第２ゾーンプレートを形成するにあたっては、例えば、コンピュータによるホログラム作成法（以下、「ＣＧＨ」とも称する）によるのが最も確実である。第５実施例におけるＲ＞２ｒである条件を満たす第１ゾーンプレートは、ＣＧＨの設計のパラメータを変更することによって容易に実現することができる。

【０１６６】

＜第６実施例＞

第６実施例においては、図１１を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、非回折性光束発生手段について説明する。また、この実施例における非回折性光束発生手段は、第２及び第３参考例の波長変換装置の例にも相当する。また、第６実施例では、非回折性光束の発生領域を特に制限する場合について説明する。

【０１６７】

図１１は、第６実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。

【０１６８】

この実施例における非回折性光束発生手段は、半導体レーザ（図示せず）から出射された平行光束４０を円環状のスポット（集光像）４４に集光するための第１光学系５４としての第１ゾーンプレート５４と、このスポット４４に集光された光から非回折性光束１８を発生させるための第２光学系５６とを具えている。そして、この第１ゾーンプレート５４は、第５実施例で説明したものと同一のものである。また、この第２光学系５６は、第４実施例の第２トロイダルレンズ４８と同一の筒状光束コリメータ４８を有し、また、アキシコン光学系としてのゾーンプレート６０を以って構成されている。

【０１６９】

そして、このゾーンプレート６０には、第２トロイダルレンズ４８から円筒状の平行光束を入射させた時に、非回折性光束の発生する範囲を限定するように位相分布を持たせてある。

【０１７０】

以下、このゾーンプレート６０の位相分布について説明する。この実施例では、このゾーンプレートの中心を座標の原点として、この中心を通る光軸上にｚ軸を対応させる。

【０１７１】

先ず、アキシコン光学系の位相遅れ関数ψ（ρ）を、ゾーンプレートをＣＧＨとして形成することを前提として導く。

【０１７２】

先ず、一般の球面レンズについて検討する。一般の球面レンズの位相遅れ関数ψ（ρ）は、波長λの光に対して下記の（４７）式で与えられる。

【０１７３】

$$\begin{aligned}\psi(\rho) &= (2\pi/\lambda)\,\phi(\rho)\\ &= (2\pi/\lambda)\,\{(\rho^2+f^2)\}^{1/2}\\ &= (2\pi/\lambda)\,f\,\{1-(1/2)\,(\rho/f)^2\}^{1/2}\end{aligned}$$

・・・（４７）

但し、ρは、球面レンズ上の点の中心からの距離を表し、ｆは球面レンズの焦点距離を表す。

【０１７４】

この（４７）式の定数項を無視すると、下記の（４８）式が得られる。

【０１７５】
ψ（ρ）＝（２π／λ）（ρ^2／２ｆ）・・・（４８）
この球面レンズによって集光されるエネルギーは、エアリーディスクの中心に全エネルギーの８４％が集中する。このときのエアリーディスクの半径r_Dは、下記の（４９）式で与えられる。
【０１７６】
r_D＝２．４４λｆ／（２Ｒ）・・・（４９）
但し、Ｒは球面レンズの半径を表す。
【０１７７】
一般の球面レンズの焦点深度ｄは、焦点距離ｆが球面レンズの半径方向（中心からの距離ρ）に依存しないので、下記の（５０）式で与えられる。
【０１７８】
ｄ＝λ（ｆ／２Ｒ）^{2}・・・（５０）
一方、光学系の焦点距離が半径方向（中心からの距離ρ）に依存するゾーンプレートの場合、即ち、焦点距離がρの関数ｆ（ρ）として表される場合には、この光学系の位相遅れ関数ψ（ρ）は、上記の（４８）に代わって下記の（５１）式で与えられる。
【０１７９】
ψ（ρ）＝（２π／λ）｛ρ^2／２ｆ（ρ）｝・・・（５１）
ここで、ｆ（ρ）の簡単な例として、アキシコンレンズの場合のようにｆ（ρ）＝ａρ（但し、ａは定数を表す）を代入すると、（５１）式は、下記の（５２）式で表される。
【０１８０】
ψ（ρ）＝（２π／λ）（ρ／ａ）・・・（５２）
このゾーンプレートの焦点の範囲は、光軸（ゾーンプレートの中心を原点としたｚ軸）に沿って、０＜ｚ＜ａＲの範囲となる。また、焦点の光強度のピークの半値幅は、ａλである。そして、この光強度は全エネルギーのａλ／Ｒである。従って、ｆ（ρ）＝ａρでは、焦点に集光できるエネルギーの強度は非常に小さな値であるといえる。
【０１８１】
そこで、ｆ（ρ）を下記の（５３）式で与える場合を考える。
【０１８２】
ｆ（ρ）＝f_0＋ａρ^b（但し、f_0、ｂは定数を表す）・・・（５３）
ａが正の定数の場合は、このゾーンプレートの焦点の範囲は、光軸に沿ってf_0＜ｚ＜f_0＋ａR^bの範囲となる。また、焦点深度はδｚ＝ａR^bとなる。
【０１８３】
また、定数ｂは、光線の中心部の光強度の強度分布を与えるパラメータである。例えば、中心部の強度分布を均一にするためには、エネルギー保存則により、焦点距離ｆおよびｆ＋δｆに対応するゾーンプレートの円環領域が均一に光軸上に集光できなければならない。
【０１８４】
また、このゾーンプレートに均一強度P_0の平面波が入射する場合、ｚ軸上に均一強度P_zで集光されるとすると、下記の（５４）式が成り立つ。
【０１８５】
P_z δｚ＝２πP_0 ρδρ・・・（５４）
さらに、P_0＝（ａ／π）P_zと定義して、（５４）式に代入すると、下記の（５５）式が得られる。
【０１８６】
δｚ＝２ａρδρ・・・（５５）
（５５）式から下記の（５６）式が得られる。
【０１８７】
δｆ（ρ）＝２ａρδρ・・・（５６）
次に、（５６）式をｚ＝z_1からｚ＝z_2まで積分すると、ｆ（Ａ）＝z_1、ｆ（Ｂ）＝

z_2 であるから、ｆ（ρ）は、下記の（５７）式で与えられる。但し、Ａ＝Ｆｒ／（２ｆ＋Ｆ）およびＢ＝ｒ（Ｆ＋ｒ）／Ｆであり、Ｆは第１光学系の焦点距離を表し、ｆは第２光学系の筒状光束コリメータの焦点距離を表し、ｒは第１光学系によって収束する円環状のスポットの半径を表す。

【０１８８】

$$f(\rho) = (z_1 - z_2)\rho^2 / (A^2 - B^2) + (z_2 A^2 - z_1 B^2) / (A^2 - B^2)$$
$$= \{1 / (A^2 - B^2)\} \{(z_1 - z_2)\rho^2 + (z_2 A^2 - z_1 B^2)\} \cdots (57)$$

即ち、上記の（５３）式において、ｂ＝２とすれば、均一強度が得られることが分かる。

【０１８９】

次に、この（５７）式を上記の（５１）式に代入すると、下記の（５８）式が得られる。

【０１９０】

$$\psi(\rho) = (\pi/\lambda)(\rho^2 / f(\rho))$$
$$= (\pi/\lambda)\rho^2 (A^2 - B^2)\{(z_1 - z_2)\rho^2 + (z_2 A^2 - z_1 B^2)\}^{-1} \cdots (58)$$

従って、上記の（５８）式で与えられる位相分布を有するゾーンプレートを第２光学系のアキシコン光学系として用いれば、所望の領域（z_1 から z_2 の間）に存在範囲が制限された非回折性光束を得ることができる。

【０１９１】

特に、この存在範囲を、波長変換素子の有効長程度とした場合は、波長変換効率を極大にすることができる。これは、存在範囲が短い程、非回折性光束の光エネルギーが強くなり、一方、波長変換素子の有効長が長い程、波長変換効率を高くすることができるからである。

【０１９２】

＜第７実施例＞

第７実施例においては、図１２を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、非回折性光束発生手段について説明する。また、この実施例における非回折性光束発生手段は、第２及び第４参考例の波長変換装置の例にも相当する。また、第７実施例では、非回折性光束の発生領域を特に制限する場合について説明する。

【０１９３】

図１２は、第７実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。

【０１９４】

この実施例における非回折性光束発生手段は、半導体レーザ（図示せず）から出射された平行光束４０を円環状のスポット（集光像）４４に集光するための第１光学系５４としての第１ゾーンプレート５４と、このスポット４４に集光された光から非回折性光束１８を発生させるための第２光学系６２とを具えている。そして、この第１ゾーンプレート５４は、第５実施例で説明したものと同一のものである。

【０１９５】

そして、この実施例では、この第２光学系６２を、筒状光束コリメータおよびアキシコン光学系と等価な作用を有する単一のゾーンプレート６２を以って構成している。

【０１９６】

この単一のゾーンプレート６２は、上述した第５実施例において、位相差関数 φ_2（ρ）の（４６）式で与えられた位相分布と、上述した第６実施例において位相遅れ関数（位相

分布関数）ψ（ρ）の（５８）式で与えられた位相分布とを有する。このため、このゾーンプレート６２の位相差関数Φ（ρ）は、下記の（５９）式で与えられる。

【０１９７】

Φ（ρ）＝（２π／λ）ϕ_2（ρ）＋ψ・・・（５９）

（５９）式に、（４６）式および（５８）式を代入すると、下記の（６０）式が与えられる。

【０１９８】

Φ（ρ）＝（２π／λ）（Ｆ／ｆ）［（１／ｆ）｛r^2－ｒ（Ｒ－ρ）＋（R^2＋ρ^2）／２｝］＋ψ（ρ）・・・（６０）

このように単一のゾーンプレートを用いて簡単な構成で、範囲を限定して非回折性光束を発生させることができる。

【０１９９】

＜第８実施例＞

第８実施例においては、図１３を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、非回折性光束発生手段について説明する。また、この実施例における非回折性光束発生手段は、第２および第４参考例の波長変換装置の例にも相当する。また、第８実施例では、第２光学系に、位相シフト手段と等価な作用を付加した場合について説明する。

【０２００】

図１３は、第８実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。

【０２０１】

この実施例における非回折性光束発生手段は、半導体レーザ（図示せず）から出射された平行光束４０を円環状のスポット（集光像）４４に集光するための第１光学系５４としての第１ゾーンプレート５４と、このスポット４４に集光された光から非回折性光束１８を発生させるための第２光学系６４とを具えている。また、この第１ゾーンプレート５４は、第５実施例で説明したものと同一のものである。

【０２０２】

また、この第２光学系６４は、単一のゾーンプレート６４からなる。この単一のゾーンプレート６４は、上記の（６０）式で与えられる位相差関数Φ（ρ）に、位相をシフトする関数Δ（ρ）を付加した位相分布を有する。従って、このゾーンプレート６４の位相差関数Ψ（ρ）は下記の（６１）式で与えられる。

【０２０３】

$$\Psi(\rho)=\Phi(\rho)+\Delta(\rho)$$
$$=(2\pi/\lambda)(F/f)[(1/f)\{r^2-r(R-\rho)+(R^2+\rho^2)/2\}]+\psi(\rho)+\Delta(\rho)\cdots(61)$$

尚、Δ（ρ）は、下記の（６２）式の場合と（６３）式の場合の２通りの例が考えられる。この（６２）式の場合は、上述した第３実施例の説明において用いた図６の（Ａ）の位相シフト板の位相分布に相当する。一方、この（６３）式の場合は、図６の（Ｂ）の位相シフト板の位相分布に相当する。また、Δ（ρ）は、位相を遅らす場合または位相を進ませる場合を含む。

【０２０４】

i) $\Delta(\rho) = (2\pi/\lambda)\Delta$ （a＜ρ＜sの場合、sはa＜s＜b）
$= 0$ （s＜ρ＜bの場合）
・・・（６２）

ii) $\Delta(\rho) = 0$ （a＜ρ＜sの場合、sはa＜s＜b）
$= (2\pi/\lambda)\Delta$ （s＜ρ＜bの場合）
・・・（６３）

また、この実施例では、ゾーンプレートに位相シフト板と等価な作用も持たせたので、擬似位相整合条件を緩和することができる。その結果、波長変換素子の有効長（相互作用長）をより長くすることができる。このため、波長変換効率を向上させることができる。

【０２０５】

＜第９実施例＞

第９実施例においては、図１４を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、波長変換素子から出射した光を限界集光するための限界集光手段について説明する。

【０２０６】

図１４は、第９実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。但し、図１４では、非回折性光束発生手段の図示を省略する。非回折性光束発生手段としては、例えば、前述の各実施例で用いたいずれの手段を用いも良い。

【０２０７】

第９実施例の波長変換装置は、波長変換素子の出力端側に、当該波長変換素子によって波長変換された出射光を円筒状の平行光束にするためのアキシコンレンズ６６および、この円筒状の平行光束を限界集光するための第１凸レンズ６８を具えている。さらに、限界集光された出射光を平行光束にするためのコリメータとしての第２凸レンズ７０を具えている。

【０２０８】

第１凸レンズ６８の焦点距離をf_2とすると、第１凸レンズ６８に入射した平行光束は、第１凸レンズの後方f_2の距離に焦点を結ぶ。この実施例では、光軸上の光強度が０である円筒状の平行光束を集光するので、通常の平行光束（ガウス光束）を集光する場合よりも焦点の半径（エアリーディスク）を超解像によって小さくすることができる。尚、ガウス光束を集光する場合は、第１凸レンズの開口比（ＮＡ値）で決まる半径（エアリーディスクの半径）以下の大きさには集光することができる。

【０２０９】

さらに、第２凸レンズ７０の焦点距離f_3をf_2よりも充分小さな値とすると、半径の小さな平行光束を得ることができる。また、回折効果のため、平行光束の半径が小さい程、中心部分の光強度も０ではなくほぼ均一な断面強度のプロファイルを持つ平行光束を得ることができる。

【０２１０】

＜第１０実施例＞

第１０実施例においては、図１５を参照して、第１の発明の波長変換方法および第２の発明の波長変換装置の一例について、特に、波長変換素子から出射した光を限界集光するための限界集光手段について説明する。

【０２１１】

図１５は、第１０実施例の波長変換装置の非回折性光束発生手段の光軸に沿った断面での構成図を示す。但し、図１５では、非回折性光束発生手段の図示を省略する。非回折性光束発生手段としては、例えば、前述の各実施例で用いたいずれの手段を用いも良い。

【０２１２】

第１０実施例の波長変換装置は、波長変換素子（例えばＳＨＧ素子）の出力端側に、当該

波長変換素子によって波長変換された出射光を円筒状の平行光束にするためのアキシコンレンズおよびこの円筒状の平行光束を限界集光するための第１凸レンズと等価な作用を有する単一のゾーンプレート７２を具えている。このゾーンプレート７２の位相分布は、例えば、上述した第７実施例に用いた単一のゾーンプレート６２と同様の位相分布を有する。これは、第９実施例におけるアキシコンレンズ６６と第１凸レンズ６８との間の平行光束では位相の遅れが生じないため、アキシコンレンズと第１凸レンズとを光学的に一体化することができるためである。この実施例では、ＣＧＨによって作成した、単一のゾーンプレートを用いると良い。ＣＧＨＤによるゾーンプレートを用いれば一体化を容易に行なうことができ、さらに、構成部品数を少なくすることができるので、装置全体の小型化および信頼性の向上を図ることができる。

【０２１３】

上述した各実施例では、この出願に係る各発明を特定の材料を使用し、特定の条件で構成した例について説明したが、これらの発明を多くの変更および変形を行うことができる。例えば、上述した実施例では、周期構造を有する波長変換素子を用いたが、これらの発明においては、例えば、波長変換素子として、非線形光学結晶の複屈折を利用する角度位相整合型の波長変換素子を利用しても良い。

【０２１４】

また、上述した各実施例では、ＱＰＭを利用した波長変換装置について説明したが、第１および第２の実施例においては、必ずしもＱＰＭを利用しなくとも良い。

【０２１５】

また、バルク型の波長変換素子（例えばＳＨＧ素子）の作成方法は、文献１の第６２～６３頁に記載されているように、$LiNbO_3$（ニオブ酸リチウム）や$LiTaO_3$（タンタル酸リチウム）を用いて既に確立されている。さらに、波長変換素子の材料は、$LiNbO_3$ や$LiTaO_3$ に限られず、例えば文献１０：「Ａｐｐｌｉｅｄ　Ｐｈｙｓｉｃｓ　Ｌｅｔｔｅｒｓ，Ｖｏｌ．１７，Ｎｏ．１１（１９７０）ｐｐ．４８３－４８５」に開示されている半導体積層結晶を用いても良い。

【０２１６】

【発明の効果】

この出願に係る第１の発明の波長変換方法によれば、バルク型の波長変換素子に基本波として非回折性光束を入射させる。また、この出願に係る第２の発明の波長変換装置によれば、波長変換素子に入射する基本波としての非回折性光束を発生させる非回折性光束発生手段を具えている。また、この出願に係る第３～５の発明の波長変換素子によれば、非回折性光束発生手段としてアキシコンレンズを具えている。

【０２１７】

その結果、この出願に係る第１～第５の各発明においては、非回折性光束を基本波とすることにより、光導波路を用いずに、基本波を高いエネルギー密度を保ったまま、長い距離波長変換素子中（非線形光学結晶中）を伝播させることができる。このため、光導波路を用いずに、波長の高効率変換を実現することが可能となる。また、光導波路を用いないため、基本波を光導波路に効率よく入射させるための精密な位置合わせ技術が不要となる。

【０２１８】

また、非回折性光束を基本波として波長変換素子に入射して波長変換された出射光を、アキシコンレンズおよび凸レンズを用いれば、限界集光させることができる。また、コリメータを用いれば、限界集光させた出射光を平行光束にして利用することもできる。

【０２１９】

また、この出願に係る第１参考例の非回折性光束発生装置によれば、第１光学系として、軸はずれの凸レンズを回転させて得られる断面形状を有するトロイダルレンズを設ける。また、第２参考例の非回折性光束発生装置では、このトロイダルレンズと等価な単一のゾーンプレートを設ける。また、第３参考例の非回折性光束発生装置によれば、第２光学系として、アキシコン光学系の他に筒状光束コリメータを設ける。また、第４参考例の非回折性光束発生装置によれば、このアキシコン光学系および筒状光束コリメータと等価な

単一のゾーンプレートを設ける。

【０２２０】

このため、これら第１～第４参考例によれば、非回折性光束の光強度をより強くすることができる。そして、これら第１～第４参考例の非回折性光束発生装置を、単独でもしくは任意に組合せて、第２の発明の波長変換装置の非回折性光束発生手段として用いれば、非回折性光束の光強度を強くすることにより波長変換効率を向上させることができる。さらに、非回折性光束の発生する範囲を、波長変換素子の有効長に限定するように、非回折性光束発生手段を設けることにより、波長変換効率をより向上させることができる。

【０２２１】

さらに、位相シフト手段を設けることにより、位相整合条件を緩和することができる。その結果、波長変換素子の素子長（有効長）をより長くすることができるので、波長変換効率をより高くすることができる。また、位相整合条件を緩和することにより、波長変換装置の長期信頼性の向上および環境変化に対する装置の動作の安定性の向上が期待できる。

【０２２２】

従って、この出願に係る波長変換方法および装置は、例えば、近年の光ディスクメモリの高密度化や画像処理技術といった多くの応用分野で用いて好適である。また、特に、波長変換としてＳＨＧ素子を用いれば、例えば光ディスク装置、レーザプリンタ、その他の光応用装置の光源の短波長化に用いて好適である。

【図面の簡単な説明】

【図１】第１実施例の波長変換装置の説明に供する構成図である。

【図２】アキシコンレンズによる非回折性光束の発生の説明に供する図である。

【図３】変形例の波長変換装置の説明に供する構成図である。

【図４】第２実施例の波長変換装置の説明に供する構成図である。

【図５】第３実施例の波長変換装置の説明に供する構成図である。

【図６】位相シフト板の形状の説明に供する図である。

【図７】非回折性光束発生手段（装置）の作用の説明に供する概念図である。

【図８】第４実施例の波長変換装置における非回折性光束発生手段の説明に供する図である。

【図９】（Ａ）は、第４実施例の波長変換装置における非回折性光束発生手段の第１光学系の説明に供する図であり、（Ｂ）は、従来のトロイダルレンズの説明に供する図である。

【図１０】第５実施例の波長変換装置における非回折性光束発生手段の説明に供する図である。

【図１１】第６実施例の波長変換装置における非回折性光束発生手段の説明に供する図である。

【図１２】第７実施例の波長変換装置における非回折性光束発生手段の説明に供する図である。

【図１３】第８実施例の波長変換装置における非回折性光束発生手段の説明に供する図である。

【図１４】第９実施例の波長変換装置における限界集光手段の説明に供する図である。

【図１５】第１０実施例の波長変換装置における限界集光手段の説明に供する図である。

【符号の説明】

１０：波長変換素子（ＳＨＧ素子）

１２：周期的分極反転構造

１４：アキシコンレンズ

１６：入力端面

１８：非回折性光束

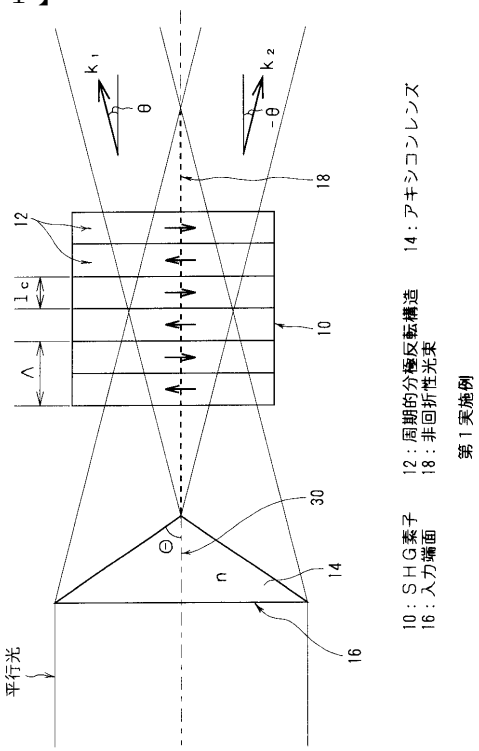
２０：ＳＦＧ素子

２２：半透鏡

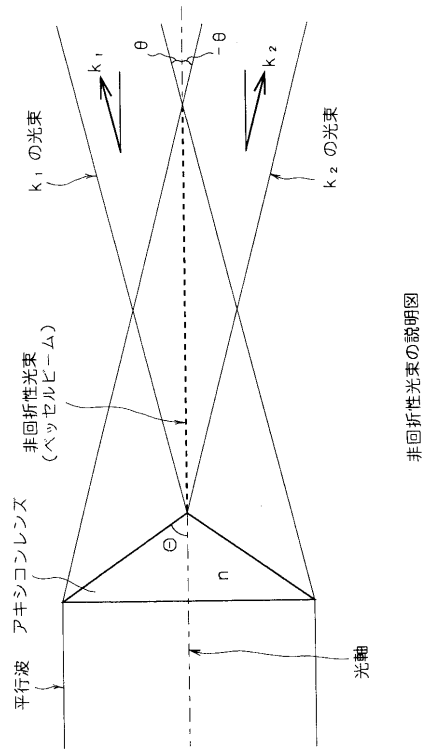
２４：多層膜反射構造

２６、２６ａ：位相シフト板
３０：光軸
４０：平行光束
４２：第１トロイダルレンズ（第１光学系）
４４：円環状スポット
４６：第２光学系
４８：第２トロイダルレンズ（筒状光束コリメータ）
５０：円筒状の平行光束
５２：アキシコンレンズ（アキシコン光学系）
５４：第１ゾーンプレート（第１光学系）
５６：第２光学系
５８：第２ゾーンプレート（筒状光束コリメータ）
６０：ゾーンプレート
６２：ゾーンプレート（第２光学系）
６４：ゾーンプレート（第２光学系）
６６：アキシコンレンズ
６８：第１凸レンズ
７０：第２凸レンズ
７２：ゾーンプレート

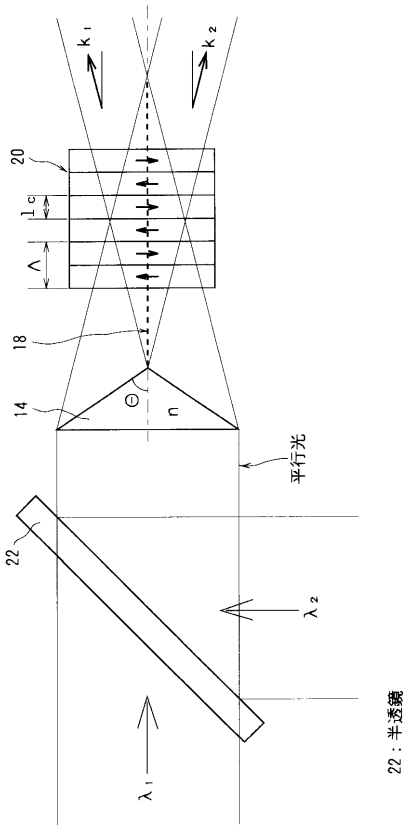
【図１】



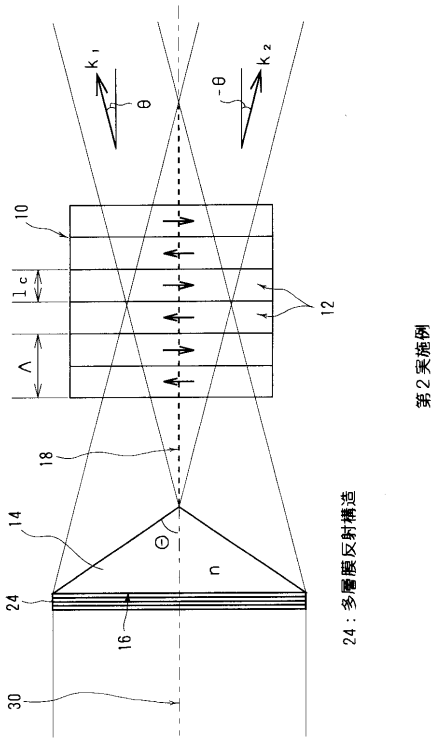
【図２】



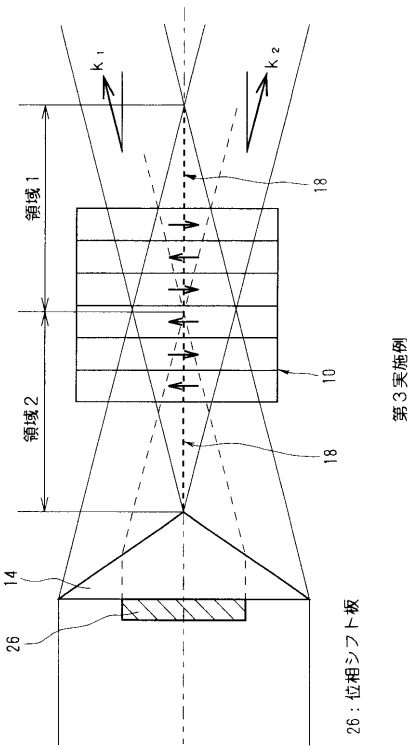
【図３】


k1
k2
20
lc
Λ
18
14
θ
n
平行光
22
λ2
λ1
22：半透鏡
変形例

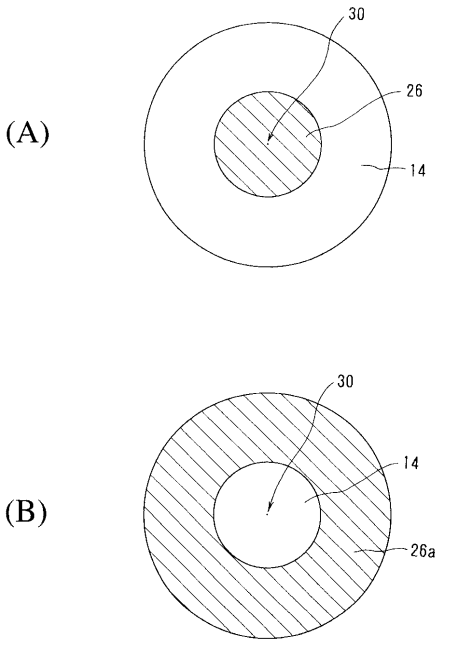
【図４】


k1
k2
θ
-θ
10
lc
Λ
12
18
14
θ
n
24
16
30
24：多層膜反射構造
第２実施例

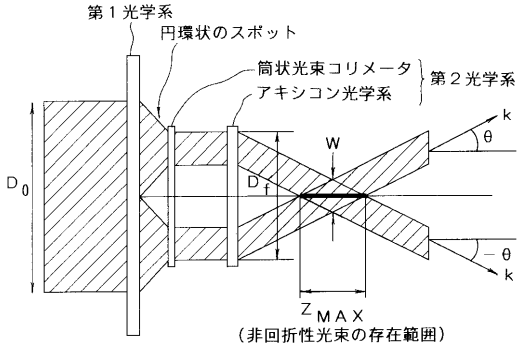
【図５】


k1
k2
領域１
領域２
18
10
18
14
26
26：位相シフト板
第３実施例

【図６】

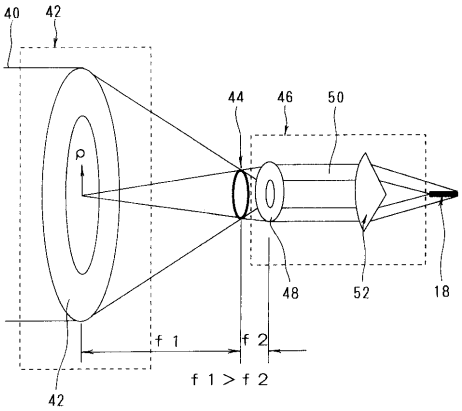

(A)
30
26
14
(B)
30
14
26a
14：アキシコンレンズ
26,26a：位相シフト板
30：光軸
位相シフト板

【図７】



非回折性光束発生手段の作用の説明

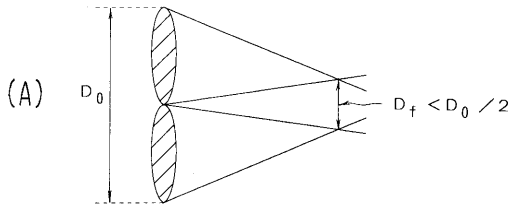
【図８】



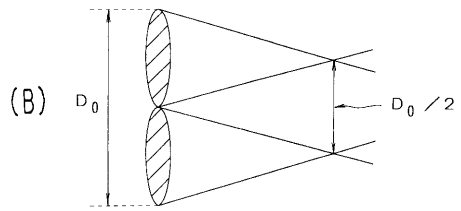
18：非回折性光束
40：平行光束
42：第１トロイダルレンズ
44：円環状スポット
46：第２光学系
48：第２トロイダルレンズ
50：円筒状の平行光束
52：アキシコンレンズ

第４実施例の非回折性光束発生手段

【図９】



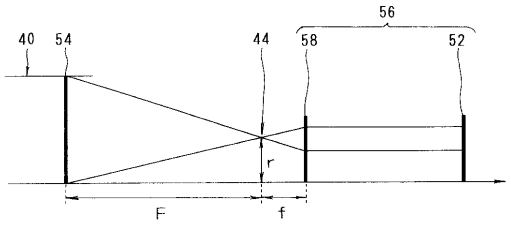
第４実施例のトロイダルレンズ



従来のトロイダルレンズ

トロイダルレンズ

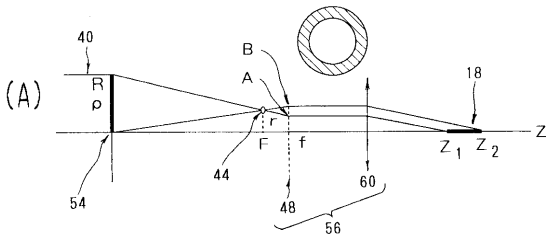
【図１０】



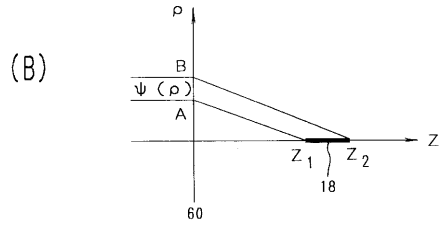
52：アキシコンレンズ
54：第１ゾーンプレート（第１光学系）
56：第２光学系
58：第２ゾーンプレート（筒状光束コリメータ）

第５実施例

【図１１】

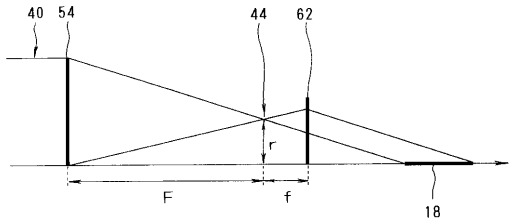


18：存在範囲が制限された非回折性光束
44：円環状スポット
48：第２トロイダルレンズ；焦点距離ｆ
60：ゾーンプレート



第６実施例

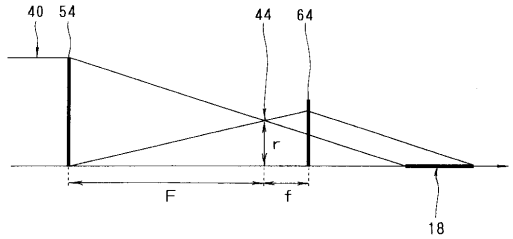
【図１２】



62：第２光学系（単一のゾーンプレート）

第７実施例

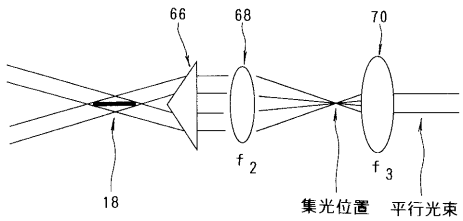
【図１３】



64：第２光学系（単一のゾーンプレート）（＋位相シフタ）

第８実施例

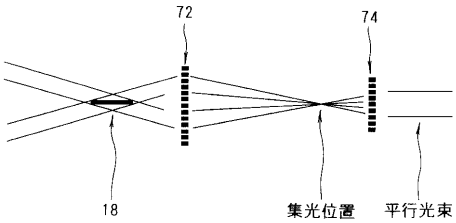
【図１４】



66：アキシコンレンズ
68：第１凸レンズ
70：第２凸レンズ

第９実施例の限界集光手段

【図１５】



72：ゾーンプレート
74：ゾーンプレート（第２凸レンズ）

第10実施例の限界集光手段

フロントページの続き

審査官　東　治企

(56)参考文献　特開平０２－１９１３８６（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－２６５９５６（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－１３２５９５（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－０４３５１０（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－０７５２６１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
G02F 1/37
JICSTファイル(JOIS)