

(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2014-175576

(P2014-175576A)

(43) 公開日 平成26年9月22日(2014.9.22)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)
H 0 1 S 3/10 (2006.01) H 0 1 S 3/10 Z 5 F 1 7 2

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 18 頁)

| | | | |
|-----------|----------------------------|----------|---------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2013-48808 (P2013-48808) | (71) 出願人 | 505374783 |
| (22) 出願日 | 平成25年3月12日 (2013.3.12) | | 独立行政法人日本原子力研究開発機構 |
| | | | 茨城県那珂郡東海村村松4番地49 |
| | | (74) 代理人 | 100097113 |
| | | | 弁理士 堀 城之 |
| | | (74) 代理人 | 100162363 |
| | | | 弁理士 前島 幸彦 |
| | | (72) 発明者 | 森 道昭 |
| | | | 京都府木津川市梅美台8丁目1番7 独立 |
| | | | 行政法人日本原子力研究開発機構 関西光 |
| | | | 科学研究所内 |
| | | (72) 発明者 | 小菅 淳 |
| | | | 京都府木津川市梅美台8丁目1番7 独立 |
| | | | 行政法人日本原子力研究開発機構 関西光 |
| | | | 科学研究所内 |

最終頁に続く

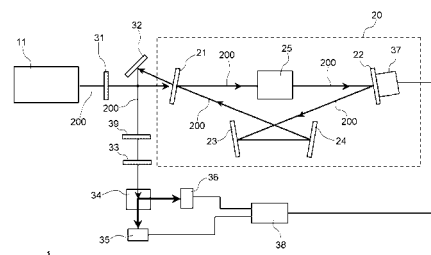
(54) 【発明の名称】 共振器及びこれを用いたレーザー装置、レーザー装置の制御方法

(57) 【要約】

【課題】共振器における閉じ込め効率を高く、かつ共振条件を精密に制御する。

【解決手段】この光蓄積装置1においては、内部に入射カプラ21、反射鏡22～24が設けられた共振器20に、レーザー発振器11で発振されたパルスレーザー光であるレーザー光200が入射する設定とされる。光検出器35、36の出力に応じてピエゾ素子37を制御する制御部38が設けられる。像反転機構25を用いて、光路中の光の垂直偏光成分における位相を、水平偏光成分の位相からだけシフトさせることができる。この構成により、光検出器35、36で検出された光強度の差 $I_a(r) - I_b(r)$ が零となるように、共振器20における光の位相ずれを最適化することが可能である。また、偏光板、あるいは像反転機構25の状態を変えずに、を調整することのみによって、共振器20内で高強度とされる偏光方向の光を切り替え、取り出すことができる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

レーザー光を入射させる入射カブラと反射鏡との間で形成された光路中に前記レーザー光を閉じ込めて強度を増強させる共振器であって、

前記共振器内における前記光路を前記レーザー光が 1 周する間に、前記レーザー光における特定の偏光方向の振動電場の位相を、前記特定の偏光方向と垂直な偏光方向の振動電場の位相から だけシフトさせる像反転機構を、具備することを特徴とする共振器。

【請求項 2】

前記像反転機構は、前記光路の光軸上の光を奇数枚の反射面を介して前記光路に戻す構成とされたことを特徴とする請求項 1 に記載の共振器。

10

【請求項 3】

前記像反転機構は、前記像反転機構が設けられた光軸の回りで回転可能な構成とされたことを特徴とする請求項 2 に記載の共振器。

【請求項 4】

共振器内においてレーザー光が閉じ込められ、前記共振器における前記レーザー光の光路を定める反射鏡の位置が制御されることによって前記共振器における光路長が制御され、前記共振器で増強された前記レーザー光が出力されるレーザー装置であって、

請求項 1 から請求項 3 までのいずれか 1 項に記載の共振器が用いられ、

前記共振器から出力されたレーザー光を透過させる / 4 板と、

前記 / 4 板を透過後のレーザー光における一方向の偏光成分の光強度を検出する第 1 の光検出器と、前記 / 4 板を透過後のレーザー光における前記一方向と垂直な方向の偏光成分の光強度を検出する第 2 の光検出器と、

20

前記第 1 の光検出器で検出された光強度と前記第 2 の光検出器で検出された光強度とに基づいて前記共振器における前記反射鏡の位置を制御する制御部と、

を具備することを特徴とするレーザー装置。

【請求項 5】

共振器内においてレーザー光が閉じ込められ、前記共振器における前記レーザー光の光路を定める反射鏡の位置を制御することによって前記共振器における光路長を制御するレーザー装置の制御方法であって、

請求項 1 から請求項 3 までのいずれか 1 項に記載の共振器が用いられ、

30

前記共振器から出力されたレーザー光を / 4 板に透過させた後のレーザー光において、一方向の偏光成分の光強度の第 1 定数倍と前記一方向と垂直な方向の偏光成分の光強度の第 2 定数倍との差分が零となるように前記共振器における前記反射鏡の位置を制御することを特徴とするレーザー装置の制御方法。

【請求項 6】

共振器内においてレーザー光が閉じ込められ、前記共振器における前記レーザー光の光路を定める反射鏡の位置を制御することによって前記共振器における光路長を制御するレーザー装置の制御方法であって、

請求項 1 から請求項 3 までのいずれか 1 項に記載の共振器が用いられ、

前記反射鏡の位置を制御することによって前記光路における位相ずれ を変動させた際の、前記共振器から出力されたレーザー光を / 4 板に透過させた後のレーザー光における、一方向の偏光成分の光強度の第 1 定数倍と前記一方向と垂直な方向の偏光成分の光強度の第 2 定数倍との差分の変化を、前記 の変化で除した値の正負を判定し、前記値の正負が切り替わるように前記反射鏡の位置を制御することによって、前記共振器内で閉じ込められる光の偏光方向を設定することを特徴とするレーザー装置の制御方法。

40

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、共振器及びこれが用いられるレーザー装置、レーザー装置の制御方法に関する。

50

【背景技術】

【0002】

高強度の短パルスレーザーを発振するためには、2枚の反射鏡の間における共振条件が成立することを利用した共振器が使用されており、こうした共振器を用いたレーザー装置は各種の物理実験や計測等に用いられている。例えば、非特許文献1に記載されるように、レーザーコンプトン線の発生器においては、加速器によって高エネルギーとされた電子がパルスレーザー光と衝突することによって、パルスレーザー光の光子が高エネルギー化された線となって出力される。この際、衝突のタイミングを最適化するためにパルスレーザー光のパルスタイミングは制御され、かつその光強度も高くされる。また、線の偏光方向を制御するために、このパルスレーザー光の偏光方向も制御される。このようなパルスレーザー光を発振するために、パルスレーザー光を共振器に蓄積することによって強度を高める光蓄積装置が用いられている。同様の光蓄積装置は、非特許文献2に記載の高次高調波生成にも有効である。

10

【0003】

ここで使用される共振器における共振条件は、共振器内の反射鏡の構成や間隔で規定された光路長で定まる。特に光蓄積装置において高強度のレーザー光を得るために用いられる共振器の共振条件は非常に狭いため、この光路長を高精度で最適化する必要がある。しかしながら、外部環境等の様々な要因により、光路長を高精度で一定とすることは実際には困難である。また、パルスレーザー発振器と光蓄積装置の両方においてそれぞれ共振器が用いられる。こうした場合には、パルスレーザーの発振器の共振器と光蓄積装置の共振器における光路長の誤差を定量的に抽出し、それを元に発振器の共振器もしくは光蓄積装置の共振器の光路長を能動的に制御する必要がある。この課題に対し、例えばパルスレーザー光における繰り返し周波数を変調し、これに応じた出力をモニターし、その結果を解析することによって光路長を最適に制御することができる。しかしながら、パルスレーザーの繰り返し周波数に高い精度が要求される用途では、このような変調を使う事が不適である。そのため、このような用途では共振器から実際に出力されたレーザー光をモニターした結果をフィードバックし、リアルタイムで光路長を最適化する方法が用いられる。

20

【0004】

図9は、この制御が行われる光蓄積装置90の構成を示す図である。ここでは、光源となるレーザー発振器11が発したレーザー光200が、共振器91内で、入射カブラ21、反射鏡22~24で形成され、矢印で示される方向で光が進行する光路中で共振条件を満たすように設定される。これにより、レーザー光200はこの光路中に蓄積されコンストラクティブ干渉によって高強度とされ、このレーザー光200の一部が入射カブラ21を透過して外部に出力される。レーザー光200は、一定の繰り返し周波数をもつパルスレーザー光である。実際には共振器91から取り出された光は、この光蓄積装置90が用いられる装置(例えばレーザーコンプトン線発生器)側に出力されるが、この装置及びこの装置との接続に用いられるビームライン等の記載は図9では省略されている。

30

【0005】

ここで、共振器91から出力されるレーザー光200の出力が極大となるように光路の調整を行うことによって、共振条件を実現できることは明らかである。しかしながら、実際にはパルス状のレーザー光200の強度変化は非常に急峻であるため、こうした制御は実際には困難である。このため、この光蓄積装置90においては、非特許文献3に記載の制御方法を用いて、高精度で共振条件が維持される。この制御方法においては、この共振器91内の光路で特定の偏光方向の光のみが閉じ込められるように設定される。共振器91から取り出されたこの光と、これと垂直な偏光方向をもち共振器91内に入射しなかった光とを両方用いて制御のための信号を生成し、この信号に応じて共振器91中の光路長を微調整している。

40

【0006】

このため、レーザー光200はまず / 2板31を通り、共振器91内の光路で閉じ込められる偏光方向をもつ成分と、これと直交する偏光方向をもつ成分と、を共にもつよう

50

な方向にレーザー光 200 の偏光方向が制御される。その後、レーザー光 200 は入射カプラ 21 を通り前記の光路に進入するが、この光路内には偏光子（偏光板）92 が設けられており、この偏光子 92 で定められる偏光方向の光のみがこの光路内に閉じ込められる。ただし、この光の一部は入射カプラ 21 から図中左上側に取り出され、さらに共振器 91 から取り出された光と合流する。

【0007】

一方、この光路内で閉じ込められる偏光方向と直交する偏光方向をもつ光は、入射カプラ 21、折り返しミラー 32 で順次反射される。その後、fast axis が偏光子 92 と並行となる条件を満たす / 4 板 33 をこれらの光が通ることによってそれぞれ位相シフトを受け、グラントムソンプリズム 34 によって、これを透過する偏光成分と反射される偏光成分に分離され、前記の偏光成分の光は光検出器（第 1 の光検出器）35 で、後者の偏光成分の光は光検出器（第 2 の光検出器）36 で検出される。非特許文献 3 に記載されるように、前者の検出強度を I_a 、後者の検出強度を I_b とすると、 $I_a - I_b$ は、共振器 91 における位相ずれの関数となる。このため、制御部（例えばマイクロコンピュータ）93 が $I_a - I_b$ を認識し、この値に基づいて共振器 91 における反射鏡 22 に固定された piezo 素子 37 をフィードバック制御することにより、共振条件が成立するようにを制御することができる。これにより、何らかの要因によって光路長が変化しても、共振器 91 の共振条件を常に維持することができる。

【0008】

上記の構成においては、共振器 91 内の光路中に偏光子 92、外部に折り返しミラー 32、 / 4 板 33、グラントムソンプリズム 34 等の光学素子を設けている。これらの光学素子は単純で安価であるため、上記の構成を容易に実現することができる。また、この方式ではパルスレーザー光の繰り返し周波数が一定の状態上記の動作を行うことができるため、繰り返し周波数が一定である通常のパルスレーザー発振器を用いた場合に適用することが可能であり、かつこの共振器 91 を使用するレーザー装置を使用している間においても、リアルタイムでこの制御を行うことができ、これにより共振条件を維持することができる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献 1】「Nondestructive Assay of Plutonium and Minor Actinide in Spent Fuel Using Nuclear Resonance Fluorescence with Laser Compton Scattering - rays」、T. Hayakawa、N. Kikuzawa、R. Hajima、T. Shizuma、N. Nishimori、M. Fujiwara and M. Seya、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A、Vol. 621、p695（2010 年）

【非特許文献 2】「High Harmonic Frequency Combs for High Resolution Spectroscopy」、A. Ozawa、J. Rauschenberger、Ch. Gohle、M. Herrmann、D. R. Walker、V. Pervak、A. Fernandez、R. Graf、A. Apolonski、R. Holzwarth、F. Krausz、T. W. Hansch and T. H. Udem、Physical Review Letters、PRL 100、253901p（2008 年）

【非特許文献 3】「Laser Frequency Stabilization by Polarization Spectroscopy of a Reflecting Reference Cavity」、T. W. Hansch and B. Couillaud、Optics Communications、Vol. 35、No. 3、p441（1980 年）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

上記の共振器91において用いられる偏光子(偏光板)92は、特定の偏光方向をもつ光の透過率を選択的に高めることによって、偏光方向を定めている。しかしながら、偏光板において、この特定の偏光方向の光の透過率(最大透過率)を100%とすることは実際には困難であり、この透過率は高々99%程度である。このため、上記の光蓄積装置90における閉じ込め効率は光路長を最適化することによって高めることができるものの、その場合においても偏光子92に起因する損失が無視できなかった。偏光子92の最大透過率には波長依存性があるため、この最大透過率を高めることが困難である波長をもつレーザー光200においては、この損失は特に顕著であった。また、実際には偏光子92においては分散効果や非線形屈折効果も存在するため、レーザー光200におけるパルス波形の変形や、偏光子の損傷によって閉じ込め効率の上限が制限される問題も発生した。

10

【0011】

このため、共振器における閉じ込め効率を高く、かつ共振条件を精密に制御できる構成が望まれた。

【0012】

本発明は、かかる問題点に鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

20

【0013】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

本発明のレーザー光を入射させる入射コブラと反射鏡との間で形成された光路中に前記レーザー光を閉じ込めて強度を増強させる共振器であって、前記共振器内における前記光路を前記レーザー光が1周する間に、前記レーザー光における特定の偏光方向の振動電場の位相を、前記特定の偏光方向と垂直な偏光方向の振動電場の位相からだけシフトさせる像反転機構を、具備することを特徴とする。

本発明の共振器において、前記像反転機構は、前記光路の光軸上の光を奇数枚の反射面を介して前記光路に戻す構成とされたことを特徴とする。

本発明の共振器において、前記像反転機構は、前記像反転機構が設けられた光軸の回りで回転可能な構成とされたことを特徴とする。

30

本発明のレーザー装置は、共振器内においてレーザー光が閉じ込められ、前記共振器における前記レーザー光の光路を定める反射鏡の位置が制御されることによって前記共振器における光路長が制御され、前記共振器で増強された前記レーザー光が出力されるレーザー装置であって、前記共振器が用いられ、前記共振器から出力されたレーザー光を透過させる / 4板と、前記 / 4板を透過後のレーザー光における一方向の偏光成分の光強度を検出する第1の光検出器と、前記 / 4板を透過後のレーザー光における前記一方向と垂直な方向の偏光成分の光強度を検出する第2の光検出器と、前記第1の光検出器で検出された光強度と前記第2の光検出器で検出された光強度とに基づいて前記共振器における前記反射鏡の位置を制御する制御部と、を具備することを特徴とする。

40

本発明のレーザー装置の制御方法は、共振器内においてレーザー光が閉じ込められ、前記共振器における前記レーザー光の光路を定める反射鏡の位置を制御することによって前記共振器における光路長を制御するレーザー装置の制御方法であって、前記共振器が用いられ、前記共振器から出力されたレーザー光を / 4板に透過させた後のレーザー光において、一方向の偏光成分の光強度の第1定数倍と前記一方向と垂直な方向の偏光成分の光強度の第2定数倍との差分が零となるように前記共振器における前記反射鏡の位置を制御することを特徴とする。

本発明のレーザー装置の制御方法は、共振器内においてレーザー光が閉じ込められ、前記共振器における前記レーザー光の光路を定める反射鏡の位置を制御することによって前記共振器における光路長を制御するレーザー装置の制御方法であって、前記共振器が用い

50

られ、前記反射鏡の位置を制御することによって前記光路における位相ずれ を変動させた際の、前記共振器から出力されたレーザー光を / 4 板に透過させた後のレーザー光における、一方向の偏光成分の光強度の第 1 定数倍と前記一方向と垂直な方向の偏光成分の光強度の第 2 定数倍との差分の変化を、前記 の変化で除した値の正負を判定し、前記値の正負が切り替わるように前記反射鏡の位置を制御することによって、前記共振器内で閉じ込められる光の偏光方向を設定することを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

本発明は以上のように構成されているので、共振器における閉じ込め効率を高く、かつ共振条件を精密に制御することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図 1】本発明の実施の形態に係る共振器及びこれが用いられた光蓄積装置の構成を示す図である。

【図 2】本発明の実施の形態に係る光蓄積装置において、共振器の光路中に挿入される像反転機構の構成を模式的に示す斜視図 (a)、上面図 (b) である。

【図 3】非特許文献 3 に記載された共振器の制御信号の一例を示す図 (非特許文献 3 の Fig. 1) である。

【図 4】本発明の実施の形態に係る共振器の制御信号の一例を示す図である。

【図 5】本発明の実施の形態に係る共振器において、伝達率が偏光方向によらない場合と、偏光方向によって伝達率が異なる場合の制御信号の一例を示す図である。

20

【図 6】本発明の実施の形態に係る共振器において、偏光方向が垂直の光を閉じ込めた場合と偏光方向が水平の光を閉じ込めた場合における制御信号の一例を示す図である。

【図 7】実施例となる共振器において、実際に制御信号等を測定した結果である。

【図 8】共振器における光閉じ込め状況を計算する際のパラメータを説明する図である。

【図 9】従来の共振器が用いられた光蓄積装置の構成の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、本発明の実施の形態に係る共振器が用いられるレーザー装置として、光蓄積装置について説明する。この共振器は、パルスレーザー光を光路中で閉じ込め、コンストラクティブ干渉によってその強度を高めて出力する。この共振器における光路を規定する反射鏡の位置は、共振条件が常に成立するように精密に最適制御される。ただし、この共振器においては、損失の大きな偏光子 (偏光板) を用いずに光路長の最適制御が行われる。このため、閉じ込め効率を高くすることができる。

30

【0017】

図 1 は、この光蓄積装置 1 の構成を示す図である。この光蓄積装置 1 においては、内部に入射カブラ 21、反射鏡 22 ~ 24 が設けられた共振器 20 に、レーザー発振器 11 で発振されたパルスレーザー光であるレーザー光 200 が入射する設定とされる。

【0018】

レーザー光 200 が共振器 20 に入射する前には前記の光蓄積装置 90 (図 9) と同様に / 2 板 31 が、レーザー光 200 が共振器 20 から出射した後は、折り返しミラー 32、 / 4 板 33、グラントムソンプリズム 34、光検出器 (第 1 の光検出器) 35、光検出器 (第 2 の光検出器) 36 が用いられる。また、同様に、 piezo 素子 37 が反射鏡 22 の位置を制御するために用いられる。これらの構成要素の機能は前記の光蓄積装置 90 におけるものと同様である。また、光検出器 35、36 の出力に応じて piezo 素子 37 を制御する制御部 38 が設けられる。

40

【0019】

レーザー発振器 11、レーザー光 200、共振器 20 における入射カブラ 21、反射鏡 22 ~ 24、 / 2 板 31、折り返しミラー 32、 / 4 板 33、グラントムソンプリズム 34、光検出器 35、36、piezo 素子 37 については、光蓄積装置 90 (図 9) の場

50

合と同様であるため、説明を省略する。ただし、この構成においては、光検出器 35、36 でそれぞれ検出すべき光の偏光方向を調整するために、 $\lambda/4$ 板 33 の前に、 $\lambda/2$ 板 39 が設けられている。ここでは、単純化のために、 $\lambda/2$ 板 31 に入射するレーザー光 200 の偏光方向は水平方向であるとし、 $\lambda/2$ 板 31 の主軸がこの方向との間でなす角度を θ とする。これによって、 $\lambda/2$ 板 31 を通過後のレーザー光 200 の偏光方向は 2 だけ回転する。すなわち、 $\lambda/2$ 板 31 によって、共振器 20 内に入射するレーザー光 200 の偏光方向を設定することができる。同様に、 $\lambda/2$ 板 39 によって、光検出器 35、36 でそれぞれ検出すべき光の偏光方向を設定することができ、これは、共振器 20 内に入射するレーザー光 200 の偏光方向の設定から独立して行うことができる。

【0020】

この共振器 20 においては、前記の偏光子 92 の代わりに、像反転機構 25 が光路中に設けられている。また、光蓄積装置 90 (図 9) と同様に、制御部 38 は、光検出器 35、36 の出力 (I_a 、 I_b) に応じてピエゾ素子 37 を制御することによって反射鏡 22 の位置を微調整するが、この際の原理が非特許文献 3 に記載されたものとは異なる。主にこれらの点について以下に説明する。

【0021】

ここで用いられる像反転機構 25 は、「Use of a Three-Mirror Image Rotator in a Laser-Produced Plasma Experiment」、R.H.Dixon、Applied Optics、Vol. 18、No. 23、p3883 (1979 年)、「A Triple Reflection Polarizer for Use in the Vacuum Ultraviolet」、V.G.Horton、E.T.Arakawa、R.N.Hamm and M.W.Williams、Applied Optics、Vol. 8、No. 3、p667 (1969 年)、「Polarization Studies in the Ultraviolet」、R.N.Hamm、R.A.MacRae and E.T.Arakawa、Journal of the Optical Society of America、Vol. 55、No. 11、p1460 (1965 年) 等に記載された光学系と同様である。これらの文献におけるこの光学系は、一種の偏光板として使用されているが、本願においては使用の態様がこれとは異なる。

【0022】

前記の偏光子 92 はこれに入射する光のうち特定の偏光方向をもつ光を選択的に透過させる性質をもったのに対し、像反転機構 25 は、全ての偏光方向の光を透過させるが、特定の偏光方向の振動電場の位相を、この偏光方向と垂直な偏光方向の振動電場の位相から (180°) だけシフトさせる。図 2 は、この像反転機構 25 の構成を模式的に示す斜視図 (a)、上面図 (b) である。この像反転機構 25 は 3 つの反射面 (3 枚の反射鏡 251 ~ 253) で構成され、左右両側の反射鏡 251、253 は、単一のプリズムの表面で構成される。光軸は図中の A1 (図 2 において左側から反射鏡 251 に向かう光軸)、A2 (反射鏡 251、252 間の光軸)、A3 (反射鏡 252、253 間の光軸)、A4 (反射鏡 253 から右側に向かう光軸) で示される。光軸 A1、A2、A3、A4 は同一平面 (入射面) 上に存在するように設定され、図 2 (b) は、この入射面における構成を示している。光軸 A1 と光軸 A4 は共に図 1 における入射カブラ 21 と反射鏡 22 との間の光軸上に乗るものとする。図 2 における光軸 A1 の反射鏡 251 に対する入射角 θ は、光軸 A4 の反射鏡 253 に対する出射角と等しく、 $\theta > 45^\circ$ であるものとする。この構成により、像反転機構 25 を光路中に挿入することができる。

【0023】

図 2 (a) における各光軸において、入射面に垂直な (図 1 においては垂直方向の) 電場成分が白矢印、入射面に平行な (図 1 においては水平方向の) 電場成分が黒矢印の方向で振動している。いずれの電場成分も、光軸方向に垂直であるが、この振動には位相が 2 種類異なる 2 種類のものがある。各矢印に示された向きは、位相が 2 種類異なる 2 種類の振動を示している。図 2 (b) においては、白矢印は紙面と垂直 (ただしいずれも紙面手

10

20

30

40

50

前側向き)となり、黒矢印のみが示されている。

【0024】

図2の構成においては、光が反射される際に、入射面内における電場の振動方向は図示されるように変化する。ここで、入射面に垂直な電場の振動の位相は入射側の光軸A1から出射側の光軸A4に至るまでの間で変化しない。このため、入射面と垂直な電場の振動の向き(図2(b)における黒点)は、どの場所においても同様に紙面手前側向きである。一方、入射面に平行な電場の振動の位相は、図示されるように変化し、入射側の光軸A1、出射側の光軸A4で逆転する。すなわち、位相が だけずれる。すなわち、この像反転機構25を図1の構成で用いることにより、共振器20内の光路中で、図1における水平方向の偏光成分の位相は変化させず、垂直方向の偏光成分の位相を だけ変化させることができる。

10

【0025】

また、図1において、共振器20内で光(レーザー光200)が閉じ込められる光路は、入射カプラ21、反射鏡22~24で規定される。ここで、光カプラ21と反射鏡22に光を垂直入射させる構成として、光カプラ21と反射鏡22の間のみで光が往復する光路を構成することも可能である。この場合には、光が往復する際に、この光は像反転機構25を2回通過する。これに対して、ここでは、図示されるように反射鏡23、24を更に用いて光路を形成することによって、光がこの光路を1周する際の光の向きは矢印で示されるとおりとなる。この場合、この1周の際に光は像反転機構25を1回しか通過しない。なお、図1における入射カプラ21、反射鏡22~24への光の入射角は45°よりも小さいため、像反転機構25におけるような位相の変化は発生しない。このため、光が共振器20内を1周する間に、垂直方向に偏光した光は、水平方向に偏光した光から位相が だけずれる。

20

【0026】

すなわち、この像反転機構25を用いて、図1における光路中の光の垂直偏光成分における位相を、水平偏光成分の位相から だけシフトさせることができる。前記の通り偏光子(偏光板)が用いられる場合にはその透過率は高々99%程度であったのに対し、この像反転機構25は、単純な反射鏡251~253のみで構成され、各反射鏡の反射率を100%に近くすることが可能である。このため、像反転機構25の透過率は99%よりも高く、例えば99.98%とすることが可能である。なお、この場合には、共振器20における光路長は、像反転装置25における光路も考慮して設定される。

30

【0027】

次に、この場合に光検出器35、36の光検出強度を用いて非特許文献3に記載の技術と同様な制御が可能か否かを調べるために、光検出器35、36の光検出強度を、光蓄積装置90(図9)、光蓄積装置1(図1)の場合のそれぞれについて計算する。初めに、従来の共振器91が用いられた光蓄積装置90(図9)の場合について説明する。この場合の計算結果は、非特許文献3に記載されている。図9の構成においては、 / 2板31によって、共振器91に入射するレーザー光200における偏光の方向が設定され、その電場は、偏光子92によって共振器91内に閉じ込められる方向の成分とこれに垂直な成分に分けて考えられる。前者の振幅を $E^{(i)}$ 、後者に振幅を $E^{(i)}$ とすると、これらは入射する電場の振幅を $E^{(i)}$ として、(1)(2)式で示される。

40

【0028】

【数1】

$$E_{\parallel}^{(i)} = E^{(i)} \cos \theta \quad \cdots (1)$$

$$E_{\perp}^{(i)} = E^{(i)} \sin \theta \quad \cdots (2)$$

【0029】

ここで、 は、入射光の偏光方向と共振器91内に閉じ込められる偏光方向(偏光子9

50

2 によって定まる方向)との間のなす角度であり、前記の通り 0 に設定されるため、 $E_{\parallel}^{(i)}$ 、 $E_{\perp}^{(i)}$ 共に零でない有意な値となる。この場合において、共振器 9 1 から取り出され 4 / 板 3 3 に入射する光の電場の複素振幅 $E_{\parallel}^{(r)}$ 、共振器 9 1 に取り込まれずに 4 / 板 3 3 に入射する光の電場の複素振幅 $E_{\perp}^{(r)}$ は、(3)(4)式で与えられる。ここで、 R_1 、 T_1 はそれぞれ入射光 2 1 の反射率、透過率であり、 R は共振器 9 1 内における 1 周回当たりの伝達率である。 δ は共振器 9 1 における光の位相ずれであり、光路長に対応した最適化されるべきパラメータである。

【0030】

【数2】

$$E_{\parallel}^{(r)} = E_{\parallel}^{(i)} \left\{ \sqrt{R_1} - \frac{T_1}{\sqrt{R_1}} \frac{R \cdot \exp(i\delta)}{1 - R \cdot \exp(i\delta)} \right\} \cdots (3)$$

10

$$E_{\perp}^{(r)} = E_{\perp}^{(i)} \sqrt{R_1} \cdots (4)$$

【0031】

図 9 の構成においては、光検出器 (第 1 の光検出器) 3 5、光検出器 (第 2 の光検出器) 3 6 の箇所の電界強度 E_a 、 E_b は (5) 式で表され、光検出器 3 5、光検出器 3 6 で検出された光強度 I_a 、 I_b は (6) 式で表される。ここで、 c は光速、 ϵ は媒体の誘電率である。

20

【0032】

【数3】

$$E_{a,b} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel}^{(r)} \\ E_{\perp}^{(r)} \end{pmatrix} \cdots (5)$$

$$I_{a,b} = \frac{1}{2} c \epsilon |E_{a,b}|^2 = \frac{1}{2} c \epsilon \left| \frac{1}{2} (E_{\parallel}^{(r)} \pm i E_{\perp}^{(r)}) \right|^2 \cdots (6)$$

30

【0033】

図 3 は、非特許文献 3 における Fig. 1 であり、共振器 9 1 の出力光を直接検出した場合の光強度 $I^{(t)}$ の依存性の計算値 (上段: A)、その微分値 (中段: B)、(6) 式による差分 $I_a - I_b$ の計算値 (下段: C) を示す。 $I^{(t)}$ が極大値を取る場合が、共振状態が成立している状態となり、この場合に差分 $I_a - I_b$ が零となる。 $I^{(t)}$ の検出値 (A)、あるいはその微分値 (B) を用いて光路長をフィードバック制御し、 $I^{(t)}$ が最大となる (あるいはその微分値が零となる) ように (反射鏡 2 2 の位置) を

40

【0034】

このように、図 9 の構成、あるいは非特許文献 3 に記載の技術においては、共振器 9 1 に特定の偏光方向の光を閉じ込め、共振器 9 1 に閉じ込められた光と共振器 9 1 に閉じ込められなかった偏光方向の光の両方を利用して、 $I_a - I_b$ を算出し、 $I^{(t)}$ を制御している。この際、光蓄積装置 9 0 本来の目的より、共振器 9 1 に閉じ込められる光が必要である

50

ことは当然であるが、これ以外にも、共振器 9 1 に閉じ込められない偏光成分の光も必要であり、両者が存在するように は設定される。

【 0 0 3 5 】

次に、図 1 の構成において、同様の計算を行った結果について説明する。この場合には、 $E^{(i)}$ 、 $E^{(i)}$ 、 $E^{(r)}$ 、 $E^{(r)}$ は、それぞれ (7) ~ (1 0) 式の通りとなる。前記の通り、 は / 2 板 3 1 の設定角度 (入射するレーザー光 2 0 0 と / 2 板 3 1 の主軸のなす角度) である。前記の場合とは、共振器 2 0 内に 2 方向の偏光成分の光が共に存在することが大きく異なる。これに対応して、 R は、像反転機構 2 5 の入射面と垂直な方向の (像反転機構 2 5 における s 偏光の) 1 周回当たりにおける伝達率であり、 R は、これと垂直な方向の (p 偏光の) 1 周回当たりにおける伝達率である。

10

【 0 0 3 6 】

【 数 4 】

$$E_{\parallel}^{(i)} = E^{(i)} \cos(2\phi) \quad \cdots (7)$$

$$E_{\perp}^{(i)} = E^{(i)} \sin(2\phi) \quad \cdots (8)$$

【 数 5 】

$$E_{\parallel}^{(r)} = E_{\parallel}^{(i)} \left\{ \sqrt{R_1} - \frac{T_1}{\sqrt{R_1}} \frac{R_{\parallel} \cdot \exp(i\delta)}{1 - R_{\parallel} \cdot \exp(i\delta)} \right\} \quad \cdots (9)$$

20

$$E_{\perp}^{(r)} = E_{\perp}^{(i)} \left\{ \sqrt{R_1} - \frac{T_1}{\sqrt{R_1}} \frac{R_{\perp} \cdot \exp(i(\delta - \pi))}{1 - R_{\perp} \cdot \exp(i(\delta - \pi))} \right\} \quad \cdots (10)$$

【 0 0 3 7 】

ここで、図 9 の構成の場合には共振器 9 1 内における電場の垂直成分が零であるために、 $E^{(r)}$ ((4) 式) においては、入射カブラ 2 1 によって入射光が反射された成分のみが存在した。これに対し、図 1 の構成の場合には共振器 2 0 内における電場の垂直成分が零でなく、かつ像反転機構 2 5 による効果が図 2 における入射面に平行な電場成分である $E^{(r)}$ においてのみ加わるため、特に $E^{(r)}$ ((1 0) 式) が $E^{(r)}$ ((4) 式) と大きく異なっている。

30

【 0 0 3 8 】

また、図 1 における共振器 2 0 の外側における構成は図 9 と同一であるため、 E_a 、 b 、 I_a 、 b については、前記と同様に (5) (6) 式で与えられる (この場合における I_a を $I_a^{(r)}$ 、 I_b を $I_b^{(r)}$ とする)。このため、 / 2 板 3 9 による偏光方向の角度変化を零とした場合には、図 3 と同様に、 $I_a^{(r)} - I_b^{(r)}$ が算出できる。図 1 の構成において、 $\theta = 22.5^\circ$ 、 $R_1 = 0.95$ ($T_1 = 0.05$)、 $R = R = 0.97$ とした場合における図 3 の $A(I^{(t)})$ 、 $C(I_a^{(r)} - I_b^{(r)})$ に対応する結果を、それぞれ A' 、 C' として図 4 に示す。

40

【 0 0 3 9 】

図 4 の A' において図 3 の A と異なるのは、2 方向の偏光成分がそれぞれ共振器 2 0 内に存在するため、それぞれに応じたピークが算出される点である。各々のピークは、像反転機構 2 5 によって半ピッチだけずれて観測される。これに応じて、図 4 の C' における零点が検出される。このため、 C' の特性から、図 3 の場合と同様に、光検出器 3 5、3 6 で検出された光強度の差 $I_a^{(r)} - I_b^{(r)}$ が零となるように、共振器 2 0 における光の位相ずれ を最適化することが可能であることが明らかである。

【 0 0 4 0 】

50

このように、図 1 の構成においては、共振器 20 に任意の偏光方向の光を閉じ込め、共振器 20 に閉じ込められた光の出力を利用して差分 $I_a(r) - I_b(r)$ を算出し、を制御している。あるいは、図 1 の構成においては、2 方向の偏光成分の光を同時に共振器 20 に閉じ込めて使用することができる。このうち、どちらの偏光成分の光も取り出すことが可能である。

【0041】

ただし、上記の例では $I_a(r)$ として水平の偏光方向、 $I_b(r)$ として垂直な偏光方向の光の強度を測定したが、 $I_a(r)$ として検出すべき偏光方向、 $I_b(r)$ として検出すべき偏光方向は、 $\theta/2$ 板 39 の設定によって適宜設定することができ、例えば $\theta/2$ 板 39 の設定角度を $(\theta/4 - \phi)$ とした場合には、 $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ として検出される偏光方向は上記と逆になる。すなわち、光検出器 35、36 がそれぞれ検出する偏光方向は、共振器 20 の中で切り替えられる偏光方向とは独立に設定することができる。このため、上記の場合には、 $I_a(r) - I_b(r)$ の値を用い、これが零となるような制御を行うものとしたが、より一般的には、光検出器 35、36 がそれぞれ検出する偏光方向において共振器 20 の中で切り替えられる偏光方向の成分の比率で定まる第 1 定数と第 2 定数を用いて、この演算を行うことができる。この場合、上記の $I_a(r) - I_b(r)$ の代わりに、第 1 定数 $\times I_a(r)$ と第 2 定数 $\times I_b(r)$ との差分を用いて、この制御を行うことができる。上記の例は、第 1 定数 = 第 2 定数とした場合に対応する。

【0042】

図 4 の特性では $R = R$ としたが、一般的には $R \neq R$ となる。図 5 上段は、 $R \neq R$ の場合（図 4 の場合）における $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ 、これらの差分である $I_a(r) - I_b(r)$ 、図 5 下段は、 $R \neq R$ ($R = 0.94$ 、 $R = 0.97$) の場合における $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ 、 $I_a(r) - I_b(r)$ をそれぞれ示す。 $R = R$ の場合には、2 方向の偏光成分に対応する信号が同等に得られていたのに対して、 $R \neq R$ の場合には、偏光方向に応じて異なる強度の信号が得られている。しかしながら、この場合においても同様の制御が可能であることは明らかである。

【0043】

光の偏光方向の極端な例として、垂直方向（像反転機構 25 における入射面と平行方向）の場合、水平方向（像反転機構 25 における入射面と垂直方向）の場合における、 $I(t)$ 、 $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ 、 $I_a(r) - I_b(r)$ の計算結果を、これらの 2 方向について、それぞれ図 6 左、図 6 右に示す。どちらの場合においても、 $I(t)$ が最大となる点は $I_a(r) - I_b(r)$ が零となる箇所に一致している。このため、共振器 20 内で閉じ込める光の偏光方向によらずに、上記の制御を行うことができる。

【0044】

図 7 (a) に、実際の共振器において、ピエゾ素子を用いて θ を掃引した場合における $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ 、 $I(t)$ を実測した一例を示す。図 5 下側に示された計算結果と同様の結果が確認できた。また、図 7 (b) には、 $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ 、 $I(t)$ を実測した他の一例を示す。この場合においては、 $I(t)$ 自身の測定結果にはノイズが非常に多くなっているために、 $I(t)$ 自身を用いた制御は極めて困難であるにも関わらず、 $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ を用いた制御が容易に行えることが明らかである。このため、上記の制御方法が有効であることが確認できる。

【0045】

また、上記の制御方法においては、より高精度の制御を行うために、像反転機構 25 で設定される 2 つの偏光方向を適宜変更することが可能である。このためには、図 2 における光軸 A1、A4（入射カプラ 21 と反射鏡 22 の間の光軸）の回りでこの像反転機構 25 を回転させればよい。例えばこれを 90° 回転させることによって、上記の動作における水平偏光成分と垂直偏光成分とを切り替えることができる。この操作は、入射するレーザー光 200 の偏光方向に応じて行うこともできる。

【0046】

次に、この共振器 20 に光が閉じ込められた際の光の増強について計算する。図 9 の構

成（従来の光蓄積装置 90）においては、偏光子 92 によって共振器 91 には特定の偏光方向の光が閉じ込められるが、他に従来より知られる光閉じ込めの原理と変わるところはない。また、従来の光蓄積装置 90 においては、この特定の偏光方向の光のみが共振器 91 で増強されて出力されるため、偏光子 92 によって偏光方向が定められた高強度のパルスレーザー光が得られる。これにより、偏光方向が定められた高強度のパルスレーザー光が得られ、こうしたレーザー光は、様々な用途、例えばレーザーコンプトン線発生器には特に好ましく用いられる。

【0047】

一方、上記の共振器 20 においては、共振器 20 の光路中に偏光子 92 は設けられないため、任意の偏光方向の光が共振器 20 内に存在しうる。こうした場合においても、従来の光蓄積装置 90 と同様に、偏光方向が特定された高強度のパルスレーザー光が得られることが好ましい。この場合においては、ある一方向の偏光成分の光強度（所望の偏光方向成分の光強度）に対する、これと垂直な偏光方向の光強度の比率（消光比）が小さくなることが好ましい。

【0048】

共振器 20 における光閉じ込めの状況は、共振器 20 内における電場の干渉を考慮して考えることができる。図 8 は、この計算において用いた条件を示している。実際には図 1 に示される構成でこの光路は定められているが、ここでは、単純化のために、左側（入射、出射側）反射鏡、右側反射鏡の 2 枚の反射光の間で光路が定められているものとする。ここで、入射光の電界は図 8 における E_{in} であり、左側反射鏡における反射波の電界を E_r 、透過波の電界を E_c 、右側反射鏡の反射波の電界を E_d 、透過光の電界を E_t 、波数を k とする。また、左側反射鏡の複素反射率、複素透過率をそれぞれ r_f 、 t_f （反射率 $R_f = |r_f|^2$ 、透過率 $T_f = |t_f|^2$ ）とし、右側反射鏡の複素反射率、複素透過率をそれぞれ r_r 、 t_r （反射率 $R_r = |r_r|^2$ 、透過率 $T_r = |t_r|^2$ ）、光路長を L とする。この場合、 E_c 、 E_d 、 E_r 、 E_t は、それぞれ以下の (11) ~ (14) 式の通りとなる。

【0049】

【数 6】

$$E_c = t_f \cdot E_{in} + \rho_f \cdot E_b \quad \cdots (11)$$

$$E_d = \rho_r \cdot e^{-ikL} \cdot E_a \quad \cdots (12)$$

$$E_r = t_f \cdot E_b - \rho_f \cdot E_{in} \quad \cdots (13)$$

$$E_t = t_r \cdot e^{-ikL/2} \cdot E_a \quad \cdots (14)$$

【0050】

これにより、共振器 10 における光路長 L 中において蓄積されるパワー I_c は、以下の (15) 式の通りとなる。

【0051】

10

20

30

40

【数 7】

$$\begin{aligned}
 I_c |E_c|^2 &= \frac{\tau_f^2}{(1 - \rho_f \rho_r)^2 + 4 \rho_f \rho_r \sin^2(kL/2)} |E_{in}|^2 \\
 &= \frac{T_f}{(1 - \sqrt{R_f R_r})^2 + 4 \sqrt{R_f R_r} \sin^2(kL/2)} I_{in} \\
 &\cdots (15)
 \end{aligned}$$

10

【0052】

ここで、入射パワー $I_{in} = |E_{in}|^2$ である。このため、 $kL = 2N$ (N は整数) の場合において、 I_c は以下の(16)式で表される最大値をとる。

【0053】

【数 8】

$$I_{c \text{ const}} = \frac{T_f}{(1 - \sqrt{R_f R_r})^2} I_{in} \cdots (16)$$

20

【0054】

この場合、 $kL = 2N$ (N は整数) の条件が満たされる場合に、 R_f 、 R_r が 1 に近づき、 T_f が零に近い場合に、 $I_c > I_{in}$ となり、コンストラクティブ干渉が起こり共振器 20 内で光を増強することができる。

【0055】

この条件が共振器 20 における水平偏光、垂直偏光のうちの一方の光で満たされる場合、像反転機能 25 によって他方の偏光をもつ光の位相はこれからだけずれる。このため、この光においては、(15)式における $kL = (2N + 1)$ となる。この場合には、 I_c は(17)式で表される最小値となる。すなわち、一方の偏光方向の光においてコンストラクティブ干渉が起こった場合には、他方の偏光方向の光においては、デコンストラクティブ干渉が起こる。

30

【0056】

【数 9】

$$I_{c \text{ deconst}} = \frac{T_f}{(1 + \sqrt{R_f R_r})^2} I_{in} \cdots (17)$$

【0057】

この場合の消光比は、(18)式で表される。

【0058】

40

【数 10】

$$\frac{I_{c \text{ deconst}}}{I_{c \text{ const}}} = \frac{(1 - \sqrt{R_f R_r})^2}{(1 + \sqrt{R_f R_r})^2} \cdots (18)$$

【0059】

この消光比は、例えば $R_f = 0.99$ 、 $R_r = 0.999$ とした場合には、 8×10^{-6} となり、十分に小さな値となる。すなわち、一方の偏光方向の光のみを共振器 20 から選択的に取り出すことが可能である。これにより、共振器 20 から、偏光方向の定まった高強度のパルスレーザー光を出力させることができる。この偏光方向は、 / 2 板 31、

50

像反転機構 25 の回転角度を調整することによって行うことができる。この際、これに応じて、 $I_a(r) - I_b(r)$ を用いて最適化することができる。さらに、 $I_a(r) - I_b(r)$ をだけ変化させた際の差分 $I_a(r) - I_b(r)$ の変化 $(I_a(r) - I_b(r))$ を検出し、 $(I_a(r) - I_b(r)) /$ の値が正から負もしくは負から正に変わるように $I_a(r) - I_b(r)$ を制御することにより、2つの直交する偏光方向の光出力を、 $I_a(r) - I_b(r)$ の制御のみで選択して取り出すことができる。すなわち、偏光板、あるいは像反転機構 25 の状態を変えずに、 $I_a(r) - I_b(r)$ を調整する（光路長を調整する）ことのみによって、共振器 20 内で高強度とされる偏光方向の光を切り替え、取り出すことができる。この際、より一般的には、 $I_a(r)$ 、 $I_b(r)$ の代わりに、前記と同様に、第 1 定数 $\times I_a(r)$ 、第 2 定数 $\times I_b(r)$ を用いて上記の制御を行うことができる。この場合、この制御がやりやすいように、第 1 定数、第 2 定数の値を設定する、すなわち、この制御が行いやすいように $\theta / 2$ 板 39 の角度を設定することもできる。

10

【0060】

この際、前記の通り、像反転機構 25 の透過率を、偏光子 92 の最大透過率（所望の偏光方向の光の透過率）よりも高く設定することができる。このため、共振器 20 によって、従来の共振器 91 よりも大きな出力を得ることができる。

【0061】

なお、上記の例では、図 1 に示された構成の光蓄積装置、共振器について説明したが、例えば共振器における光路を定める反射鏡の構成は、光路が精密に調整できる限りにおいて、任意である。こうした光蓄積装置は、特に非特許文献 1、非特許文献 2 に記載の装置に特に好ましく用いることができる。また、上記の構成の共振器は、光蓄積装置に限らず、レーザー光を閉じ込める共振器が用いられる全てのレーザー装置に対して有効であることも明らかである。

20

【符号の説明】

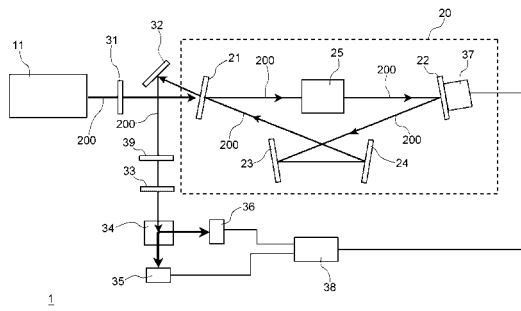
【0062】

- 1、90 光蓄積装置
- 11 レーザー発振器
- 20、91 共振器
- 21 入射カブラ
- 22 ~ 24、251 ~ 253 反射鏡
- 25 像反転機構
- 31、39 $\theta / 2$ 板
- 32 折り返しミラー
- 33 $\theta / 4$ 板
- 34 グラントムソンプリズム
- 35 光検出器（第 1 の光検出器）
- 36 光検出器（第 2 の光検出器）
- 37 ピエゾ素子
- 38、93 制御部
- 92 偏光子
- 200 レーザー光

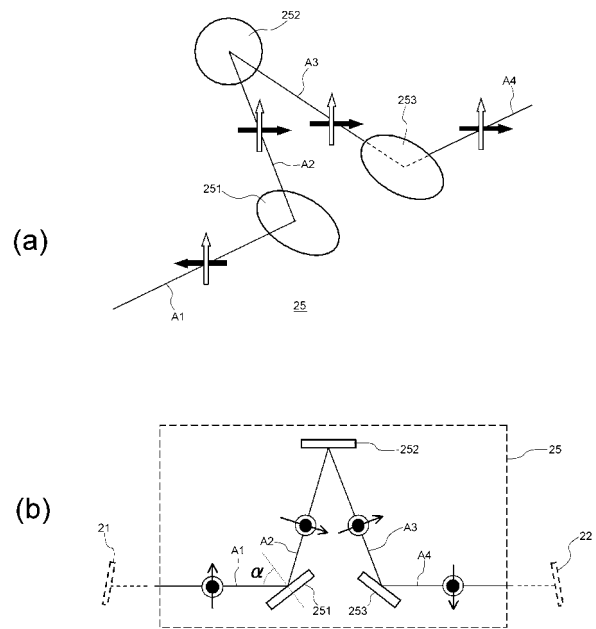
30

40

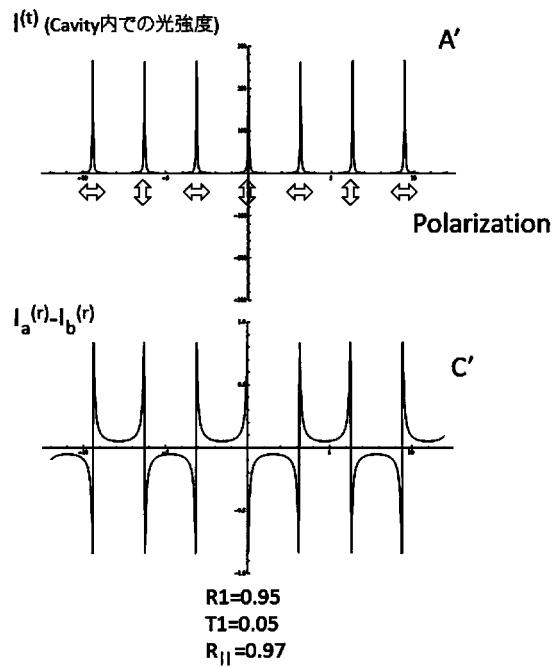
【 図 1 】



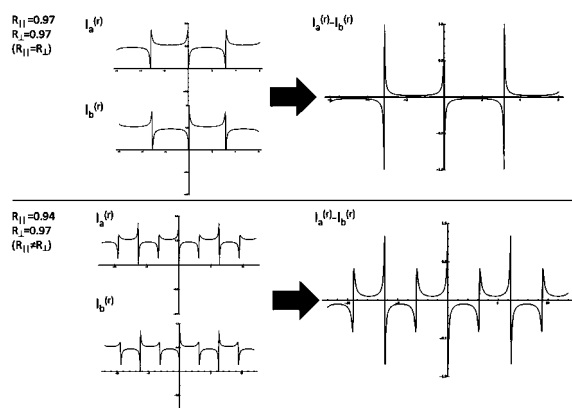
【 図 2 】



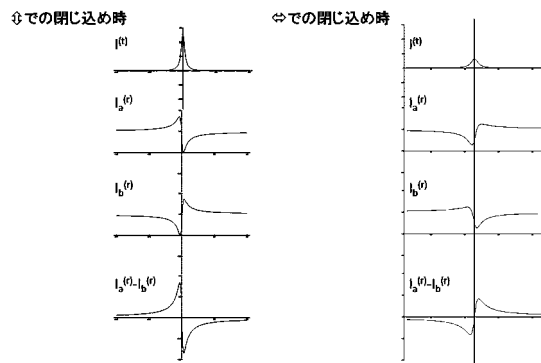
【 図 4 】



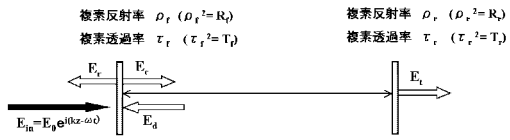
【 図 5 】



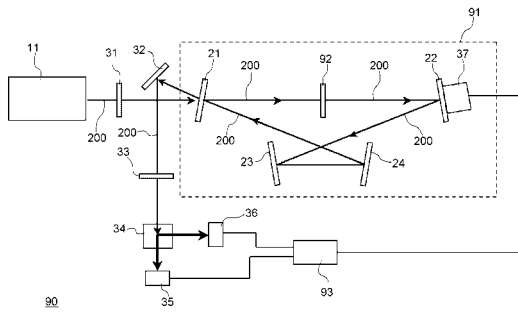
【 図 6 】



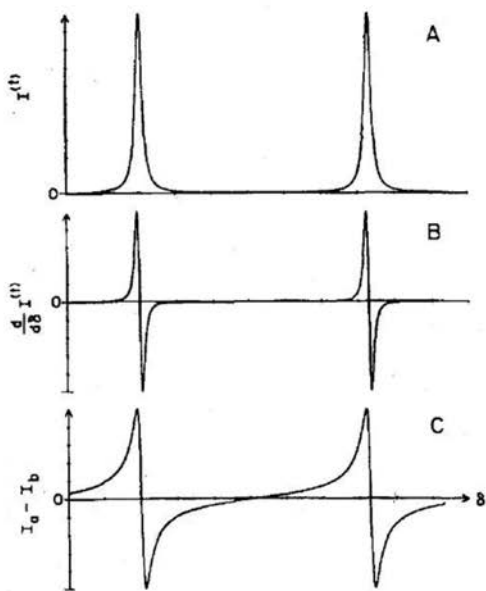
【 図 8 】



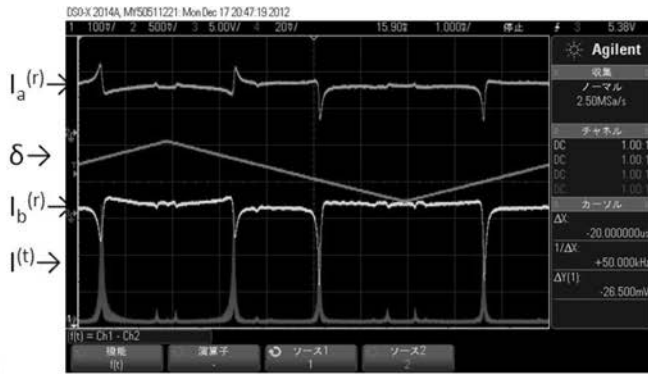
【 図 9 】



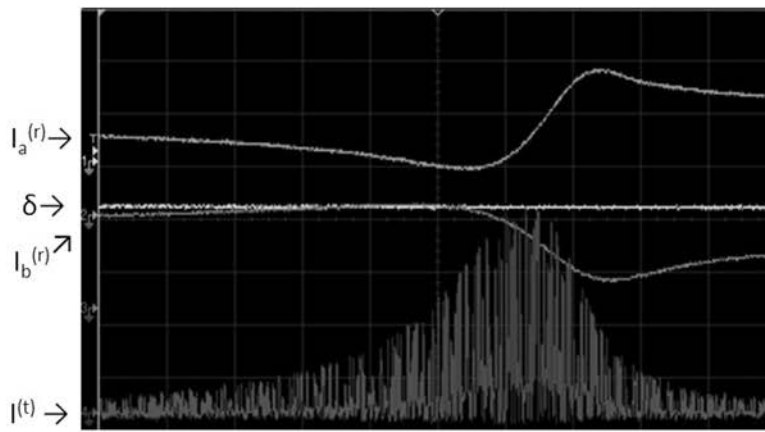
【 図 3 】



【図 7】



(a)



(b)

フロントページの続き

(72)発明者 岡田 大
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番 7 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所内

(72)発明者 桐山 博光
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番 7 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所内

(72)発明者 永島 圭介
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番 7 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所内

(72)発明者 近藤 公伯
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番 7 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所内

F ターム(参考) 5F172 NN11 NN23 NP03 NP18 NR02