

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第3965624号

(P3965624)

(45) 発行日 平成19年8月29日(2007.8.29)

(24) 登録日 平成19年6月8日(2007.6.8)

(51) Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

F I

G02F 1/35

請求項の数 5 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2002-176385 (P2002-176385)	(73) 特許権者	503360115
(22) 出願日	平成14年6月17日(2002.6.17)		独立行政法人科学技術振興機構
(65) 公開番号	特開2004-20970 (P2004-20970A)		埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(43) 公開日	平成16年1月22日(2004.1.22)	(74) 代理人	100082876
審査請求日	平成16年9月30日(2004.9.30)		弁理士 平山 一幸
		(72) 発明者	竹内 繁樹
			北海道札幌市南区澄川4条1丁目2-5
			ガーデン胡桃B-202
		(72) 発明者	ホフマン ホルガ
			北海道札幌市東区北18条東1丁目13-49
			サンリバー広和602号
		審査官	牧 隆志

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 位相シフト光スイッチ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

2準位系として近似可能な光応答物質と、この光応答物質を包含した片側キャビティとを有し、

上記片側キャビティは、反射率が1の一方のミラーと該一方のミラーよりも反射率が低い他方のミラーからなり、

上記片側キャビティはパッドキャビティ条件を満たし、上記光応答物質の共鳴周波数と一致した波長を中心波長として有する入射光と放射光とが同一の横波モードで閉じ込められ、

入射光強度が上記光応答物質の縦緩和時間に基づくしきい値以下で位相がシフトして出力することを特徴とする、位相シフト光スイッチ。 10

【請求項2】

前記パッドキャビティ条件は、前記光応答物質のダイポールのキャビティ・モードへの結合係数を g 、前記片側キャビティ内の電場が前記ミラーを通じて外部に放出されるレートを、前記片側キャビティ場以外への前記光応答物質の自然放出レートをとしたとき、 $> g^2 / >$ の成否であることを特徴とする、請求項1に記載の位相シフト光スイッチ。

【請求項3】

前記片側キャビティは、一対のミラーの代わりに、微小球共振器に単一モードファイバーを接触させてカップリングさせたキャビティ、導波路のブラックリフレクターで構成し 20

たキャビティ、光結晶で構成したキャビティの何れかであることを特徴とする、請求項 1 に記載の位相シフト光スイッチ。

【請求項 4】

前記光応答物質は、単一の原子であることを特徴とする、請求項 1 に記載の位相シフト光スイッチ。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 に記載の位相シフト光スイッチをマイケルソン干渉計又はマッハツェンダー干渉計のミラーとして備えたことを特徴とするルーティング装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

10

【発明の属する技術分野】

この発明は、光子が数個レベルの微弱な光入力に対しても、その光強度に応じて位相をシフトまたは反転することができる光スイッチに関する。

【0002】

【従来の技術】

近年の情報通信需要の増大に伴い、光通信技術の高度化要求は止まるところを知らない。一本の光ファイバでより多くの情報を伝送するために、光波長多重通信技術、光周波数チャープ通信技術、あるいは、光位相通信技術等が検討されている。

光位相通信技術は、光パルスを構成する光子の位相を任意に制御することにより、1 個の光パルスで複数の異なった情報を表現できるので、情報通信速度を飛躍的に高めると言われている。

20

従来、光パルスの位相を制御する装置、すなわち、光位相スイッチには、光強度に応じて光の位相をシフトするスイッチがあり、例えば、光ファイバの自己位相変調効果を利用するものがある。しかしながら、この装置は、検知可能な位相シフトを引き起こすのに必要な光強度が、最低でも光子数で 10^9 個程度と極めて大きい光強度を必要とし、また、数キロメートルの長さに及ぶ光ファイバを必要とするため、光通信に実用化できる装置ではない。

【0003】

ところで、光位相スイッチは、光通信技術のみでなく、光子を情報媒体とした、光量子コンピュータ、光量子暗号通信等の光量子情報通信処理技術においても必要不可欠なスイッチである（文献：Phy. Rev. A 57, 3084 (1998) 参照）。これらの技術においては、光子間の量子状態をたがいに「もつれ合わせ」る必要があるが、そのためには、極めて微弱な光、すなわち、単一の光子の位相をシフトできるスイッチが必要不可欠である。

30

【0004】

近年、単一の光子の位相をシフトする方法として、単一原子とバッドキャビティ (bad-cavity) からなる一次元原子 (1-D-atom) システムが提案されている（文献：Appl. Phys. B 60, S1-S10 (1995)、及び、Phys. Rev. Letters, Vol 75, No. 25, (1995) pp 4710-4713 参照）。バッドキャビティとは、原子のダイポールのキャビティ・モードへの結合係数を g 、キャビティ内の電場がミラーを通じて外部モードに放出されるレート（キャビティ場ダンピングレートと言う）を γ 、キャビティ場以外への原子の自然放出レートを Γ 、とした場合、 $\gamma > g^2 / \Gamma$ が成り立つキャビティのことである。このバッドキャビティ条件においては、レート γ でのインコヒーレントな放出（自然放出）に比べて、ミラーを通じた外部へのコヒーレントな結合 (g^2 / Γ) のほうが大きく、単一の原子（あるいは等価なシステム）はキャビティモードへと強く結合する。その結果、入力した光子の位相がシフトして出力される。

40

【0005】

上記文献のシステムは、図 5 に示すように、ミラー M_i 、 M_o からなるバッドキャビティ中に Cs (セシウム) 原子を供給し、ミラー M_i から光子を入射し、ミラー M_o から光子

50

を出力する。この出力された光子は、入射光子に対して位相がシフトする。このシステムは、セシウム原子の ($6S_{1/2}$, $F=4$, $m=4$) 状態から ($6P_{1/2}$, $F=4$, $m=4$) 状態への遷移を用いている。また、キャビティ長 $56\ \mu\text{m}$ 、ガウシャンビーム・ウェスト $35\ \mu\text{m}$ 、透過率がそれぞれ、 1.1×10^{-6} 、 3.5×10^{-4} のフィネス 1800 程度の 2 枚の微小凹面鏡を用いて、 $(\dots, g^2 / \dots, \dots) / 2$ が ($75\ \text{MHz}$, $5.3\ \text{MHz}$, $2.5\ \text{MHz}$) のパッドキャビティ条件を実現している。

【0006】

しかしながら、これらのシステムによって得られる出力光子の位相シフト量は 15° 程度と低いため、光量子コンピュータ、光量子暗号通信等の光量子情報通信処理技術において必要な、光子数によらずに光子の位相をシフトできるスイッチとしては利用できない。また、これらのシステムの特性は、入射光子の周波数が、単一原子の共鳴周波数から外れた領域で得られる特性であり、入射光子の周波数が、単一原子の共鳴周波数に一致した場合の特性は知られていない。

10

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

本発明は上記課題に鑑み、入射光の位相シフトに必要な光強度が小さく、特に、極めて微弱な光強度、すなわち、単一光子の位相をシフトでき、かつ、小型の光位相スイッチを提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明の位相シフト光スイッチは、2準位系として近似可能な光応答物質と、この光応答物質を包含した片側キャビティとを有し、片側キャビティは、反射率が1の一方のミラーと該一方のミラーよりも反射率が低い他方のミラーからなり、片側キャビティはパッドキャビティ条件を満たし、光応答物質の共鳴周波数と一致した波長を中心波長として有する入射光と放射光とが同一の横波モードで閉じ込められ、入射光強度が上記光応答物質の縦緩和時間に基づくしきい値以下で位相がシフトして出力することを特徴とする。

20

上記構成において、パッドキャビティ条件は、光応答物質のダイポールのキャビティ・モードへの結合係数を g 、片側キャビティ内の電場がミラーを通じて外部に放出されるレートを γ 、片側キャビティ場以外への光応答物質の自然放出レートを γ_0 としたとき、 $g^2 / \gamma > \gamma_0$ の成否である。片側キャビティは、一對のミラーの代わりに、微小球共振器に単一モードファイバーを接触させてカップリングさせたキャビティ、導波路のブラックリフレクターで構成したキャビティ、光結晶で構成したキャビティの何れかでもよい。 また、光応答物質は単一の原子からなる。

30

【0009】

この構成によれば、入力光が、片側キャビティの反射率の低いミラーから片側キャビティ中に進入し、片側キャビティ中の2準位系原子と共鳴する。共鳴によって2準位系原子が放射光を発生する。片側キャビティの反射率1のミラーによって反射された入力光と共鳴によって発生した放射光は、同一の横波モード (TEMモード: Transverse Electric Magneticモード) に閉じ込められて、反射率の低いミラーから出力する。

40

片側キャビティの構成によって、パッドキャビティ条件が満たされ、かつ、入力光と放射光が同一の横波モードに閉じ込められるために、入射光と2準位原子の共鳴に伴う光の散逸が抑制され、出力した放射光の位相は、入力光の位相に対してシフトする。

また、2準位原子の縦緩和時間に基づく入力光強度のしきい値が存在し、しきい値以下で位相がシフトし、しきい値以上で位相が変化しないので、入力光強度を制御して、位相シフトのスイッチングができる。

また、極めて微弱な光強度、すなわち、単一の光子の位相をシフトすることができる。

【0010】

また、本発明のルーティング装置は、本発明の位相シフト光スイッチを、マイケルソン干渉計又はマッハツェンダー干渉計のミラーとして備えたことを特徴とする。

50

この構成によれば、位相シフト光スイッチからの反射光と、干渉計の他のミラーからの反射光との位相差が、光強度によって異なるから、位相差に応じて、異なった箇所から出力光を取り出すことができる。

【0011】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。

図面において、実質的に同一又は均等の要素には、同一の符号を付して説明する。

図1は、本発明の位相シフト光スイッチの構成を示す図である。図において、1は入力光、2は出力光、3は反射率の低いミラー、4は反射率が1のミラーであり、5は2準位系単一原子からなる光応答物質である。なお、ミラー3とミラー4で構成される共振器を片側キャビティと呼ぶ。

10

入力光1は、2準位系単一原子5の遷移周波数、すなわち、共鳴周波数を中心周波数に持つ光である。

本装置の動作は次のようなものである。

入力光1の強度が下記に説明する特定のしきい値より大きい小さいかによって、入力光1と出力光2の位相差が変化する。この動作について、以下により詳細に述べる。

【0012】

図2は本発明の位相シフト光スイッチの動作を説明するための模式図である。図において、 b_{in} は入力光1の振幅を、 b_{out} は出力光2のうちコヒーレントな成分の振幅を表す。 P_{noise} は出力光2のうちランダムな位相を持ったノイズ光成分を示している。 T_F は、ミラー3の透過率、 T_B は、ミラー4の透過率を表す。 $|E\rangle$ 、 $|G\rangle$ は、それぞれ原子5の放射準位と基底準位を表している。 $|E\rangle$ 、 $|G\rangle$ としては、例えば、セシウム原子などのアルカリ原子の微細構造準位である。

20

片側キャビティ3, 4は十分に2準位原子5を覆い尽くすように構成する。このようにすると、 $|E\rangle$ から $|G\rangle$ への遷移に対応した自然放出光は、キャビティの横波モードへと選択的に放出されるようになる。また、この遷移の際の、2準位原子5の縦緩和時間をとする。

【0013】

本発明は、本発明者らにより、単一原子とパッドキャビティからなるシステムにおいて、パッドキャビティを片側キャビティで構成することにより、入射光子の周波数が単一原子の共鳴周波数に一致する領域において、単一光子レベルに到る入力微弱光が、散逸に伴う損失やインコヒーレントな成分への変換が抑制されて、位相シフトしてコヒーレントに出力されることの発見に基づいて成されたものである。以下に、その原理を説明する。

30

【0014】

駆動場と2準位原子との相互作用を表すブロッホ方程式(Bloch equation)は、例えば、D. F. Walls and G. J. Milburn, Quantum Optics, Springer 1995(second edition), p. 214, 式(11.5)、(11.6)、及び、p202の式(10.30)に示されている。

本発明の構成においては、入力光1の中心周波数を2準位系単一原子5の共鳴周波数に一致させるので、これらの式において、駆動場と2準位原子の共鳴周波数の差を零と置くことができ、また、Rabi周波数に時間依存性を持たせ、かつ、複素数に拡張することができる。従って、

40

複素ダイポール演算子を、

【数1】

$$\hat{\sigma}_- = |G\rangle\langle E| \quad (1)$$

で表し、その逆演算子を、

【数2】

50

$$\hat{\sigma}_z = 1/2 (|E\rangle\langle E| - |G\rangle\langle G|) \quad (2)$$

で表すと、ブロッホ方程式は、

【数3】

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{\sigma}_- \rangle = -\Gamma \langle \hat{\sigma}_- \rangle + 2\sqrt{2}\Gamma b_{in}(t) \langle \hat{\sigma}_z \rangle$$

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{\sigma}_z \rangle = -2\Gamma \left(\langle \hat{\sigma}_z \rangle + \frac{1}{2} \right) - \sqrt{2}\Gamma (b_{in}^*(t) \langle \hat{\sigma}_- \rangle + b_{in}(t) \langle \hat{\sigma}_- \rangle^*)$$

10

(3)

となる。片側キャビティ構成とした場合には、 t を時間として、 $b_{out}(t)$ は、入・出力理論（文献：Quantum Optics (Springer-Verlag, Berlin, 1995), p. 121参照）により、

【数4】

$$b_{out}(t) = b_{in}(t) + \sqrt{2}\Gamma \langle \hat{\sigma}_- \rangle \quad (4)$$

20

で表される。全出力光強度 P_{out} は、エネルギー保存則から、

【数5】

$$\begin{aligned} P_{out} &= |b_{out}|^2 + P_{noise} \\ &= |b_{in}|^2 + P_{emit} \end{aligned} \quad (5)$$

で表される。なお、 P_{emit} は2準位原子5が励起準位 $|E\rangle$ から基底準位 $|G\rangle$ に遷移する際の放射光強度である。 P_{emit} は2準位原子5のエネルギー損失に等しいので、ブロッホ方程式(3)における逆演算子(2)の変化率のマイナスに等しく、

【数6】

$$\begin{aligned} P_{emit} &= -\frac{d}{dt} \langle \hat{\sigma}_z \rangle = \left(\langle \hat{\sigma}_z \rangle + \frac{1}{2} \right) \\ &\quad + \sqrt{2}\Gamma (b_{in}^*(t) \langle \hat{\sigma}_- \rangle + b_{in}(t) \langle \hat{\sigma}_- \rangle^*) \end{aligned} \quad (6)$$

30

で表される。

また、放射光強度 P_{emit} のうちのコヒーレント光強度 P_{coh} は、

【数7】

$$\begin{aligned} P_{coh} &= |b_{out}|^2 - |b_{in}|^2 \\ &= \sqrt{2}\Gamma \langle \hat{\sigma}_- \rangle^2 + \sqrt{2}\Gamma (b_{in}^*(t) \langle \hat{\sigma}_- \rangle + b_{in}(t) \langle \hat{\sigma}_- \rangle^*) \end{aligned} \quad (7)$$

40

で表される。非コヒーレント成分 P_{noise} は、上記(5)、(6)および(7)式から、

【数8】

$$\begin{aligned}
 P_{\text{noise}} &= P_{\text{emit}} - P_{\text{coh}} = \left(\langle \hat{\sigma}_z \rangle + \frac{1}{2} - \langle \hat{\sigma}_- \rangle^2 \right) \\
 &= 2\Gamma \left(\left(\langle \hat{\sigma}_z \rangle + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{1}{4} - \langle \hat{\sigma}_z \rangle^2 - \langle \hat{\sigma}_- \rangle^2 \right) \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

で表される。従って、片側キャビティ構成の場合の b_{out} と b_{in} の関係は、上記(3)式及び(4)式から、

【数9】

$$\langle \hat{\sigma}_z \rangle = \frac{-\Gamma}{2\Gamma + 8|b_{\text{in}}|^2} \quad 10$$

$$\langle \hat{\sigma}_- \rangle = \frac{-\sqrt{2\Gamma} b_{\text{in}}}{2\Gamma + 4|b_{\text{in}}|^2}$$

$$b_{\text{out}} = \left(1 - \frac{2\Gamma}{\Gamma + 4|b_{\text{in}}|^2} \right) b_{\text{in}} \quad (9)$$

で表される。また、 b_{out} と b_{in} の比は、

【数10】

$$\frac{b_{\text{out}}}{b_{\text{in}}} = \frac{4|b_{\text{in}}|^2 / \Gamma - 1}{4|b_{\text{in}}|^2 / \Gamma + 1} \quad (10)$$

で表される。ただし、 $b_{\text{in}}(t) = b_{\text{in}}$ 、すなわち、入力光1が一定強度の場合を示している。

【0015】

図3は、(10)式を用いて計算した出力信号を示す図である。

横軸は入力信号1の入力振幅 b_{in} を表し、縦軸は入力振幅 b_{in} とそれに対するコヒーレントな出力信号2の出力振幅 b_{out} の比である。

図からわかるように、 b_{in} の2乗の4倍が Γ に等しいとき(このときの b_{in} の大きさを $b_{\text{in}0}$ とする)、コヒーレントな出力振幅 b_{out} が0になる。入力振幅 b_{in} が2桁小さい場合(このときの b_{in} の大きさを $b_{\text{in}L}$ とする)には、 $\log_{10} [4|b_{\text{in}L}|^2 / \Gamma]$ は -4 となり、コヒーレントな出力振幅 b_{out} は入力振幅 b_{in} のそれとほぼ等しく、かつ位相が π シフトする。入力振幅 b_{in} が $b_{\text{in}0}$ より小さく、かつ、 $b_{\text{in}L}$ より大きい場合には、出力信号2は入力信号1に対して振幅が小さくなり、かつ、位相が π シフトする。

従って、 $b_{\text{in}0}$ よりも小さな入力振幅の入力光を入力することによって、入力光に対して位相が π シフトした出力光を得ることができる。また、 b_{in} を極めて小さく、すなわち、単一の光子を入力することによって、単一光子の位相を π ずらすことができる。

一方、入力振幅 b_{in} が $b_{\text{in}0}$ より2桁大きい場合(この場合の b_{in} を $b_{\text{in}H}$ とする)には、 $\log_{10} [4|b_{\text{in}H}|^2 / \Gamma]$ は4となり、コヒーレントな出力振幅 b_{out} は入力振幅 b_{in} のそれとほぼ等しく、かつ位相が変化しない。入力振幅 b_{in} が $b_{\text{in}0}$ より大きく $b_{\text{in}H}$ より小さい場合には、出力信号は入力信号に対して振幅が小さくなり、かつ、位相は変化しない。

このように、本発明の位相シフト光スイッチによれば、入力光強度によって、出力光の位相変化を制御できる。また、単一の光子の位相制御もできる。

【0016】

さらに、入力振幅が $b_{\text{in}0}$ 近傍にある場合には、入力振幅が $b_{\text{in}0}$ を中心として、ほんの僅か変化するだけで、位相が π シフトするので、超高感度なスイッチング素子として利用できる。ただし、この場合にはコヒーレントな出力振幅 b_{out} が入力振幅 b_{in} より小さく

10

20

30

40

50

、その減少分は P_{noise} として出力されるので、出力側において、特定の位相成分の信号のみを抽出するロックインフィルタリング等を併用する。

【0017】

次に、本発明の位相シフト光スイッチの使用例を説明する。

図4は、本発明の位相シフト光スイッチを使用したルーティング装置を説明する図である。図において、ルーティング装置10は、本発明の位相シフト光スイッチ11と、ハーフミラー12、及びミラー13をマイケルソン干渉型に構成している。

入力光14の強度に応じて、位相シフト光スイッチ11から反射される光の位相が異なるため、ハーフミラー12から出力光15となって取り出される場合と、例えば光ファイバで構成した方向性結合器16から出力光17となって取り出される場合とに分離され、ルーティング装置として機能する。

10

例えば、ハーフミラー12上で、位相シフト光スイッチ11からの反射光とミラー13からの反射光の位相差が π の奇数倍であれば出力光は15となり、位相差が π の偶数倍であれば出力光17となる。

また、出力光15、または、出力光17のどちらか一方に着目すれば、光強度変調器として動作する。

【0018】

なお、上記説明では、反射率が低いミラーと反射率が1のミラーとの組み合わせからなる片側キャビティを例にとって説明したが、勿論、光応答物質を包含することができ、入力光と光応答物質の放射光とを同一の光路で出力できる構成のキャビティであれば何でも良く、例えば、微小球共振器に単一モードファイバを接触させる等の技術でカップリングさせたキャビティ、導波路のブラッグリフレクター等で構成したキャビティ、あるいは、光結晶（フォトリソグラフィ）で構成したキャビティでも良いことは明らかである。

20

【0019】

【発明の効果】

上記説明から理解されるように、本発明によれば、片側キャビティを使用して、入力光及び放射光を同一の横波モードに閉じ込めるので、入射光と2準位原子の共鳴に伴う光の散逸が抑制され、その結果、出力光の位相が入力光に対してシフトする。

また、使用する2準位原子の縦緩和時間から定まる入力光強度のしきい値が存在し、しきい値以下であれば、出力光の位相が入力光に対してシフトし、しきい値以上であれば、出力光の位相が変化しないので、光強度によって光位相をスイッチングでき、光位相通信等の位相スイッチとして利用できる。

30

また、光強度が極めて微弱でも、すなわち、単一光子でも動作するので、光量子コンピュータ、光量子暗号通信等の光量子情報通信処理等において、光子間の量子状態をたがいに「もつれ合わせ」る場合の位相シフトスイッチとして使用できる。

また、本発明の装置は、2枚のミラーからなる片側キャビティを用いるだけなので、極めて小型である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の位相シフト光スイッチの構成を示す図である。

【図2】本発明の位相シフト光スイッチの動作を説明する模式図である。

40

【図3】(10)式を用いて計算した出力信号を示す図である。

【図4】本発明の位相シフト光スイッチを使用したルーティング装置を説明する図である。

【図5】従来の一次元原子システムの構成を示す図である。

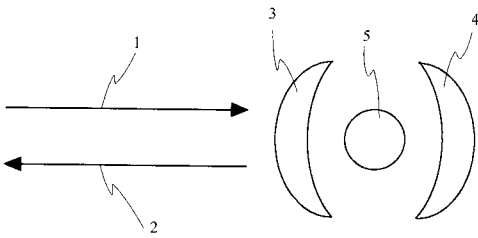
【符号の説明】

- 1 入力光
- 2 出力光
- 3 低反射率ミラー
- 4 反射率1のミラー
- 5 2準位系単一原子からなる光応答物質

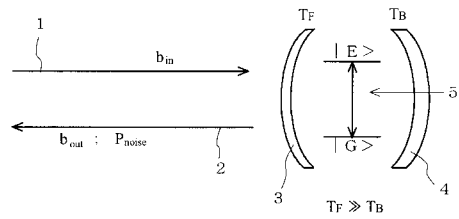
50

- 1 0 ルーティング装置
- 1 1 位相光スイッチ
- 1 2 ハーフミラー
- 1 3 ミラー
- 1 4 入力光
- 1 5 出力光
- 1 6 方向性結合器
- 1 7 出力光

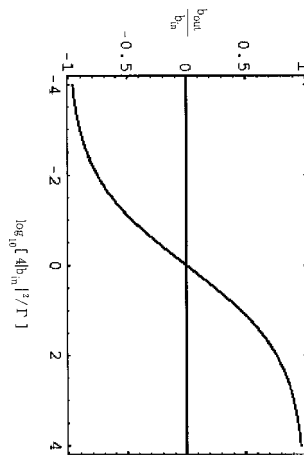
【 図 1 】



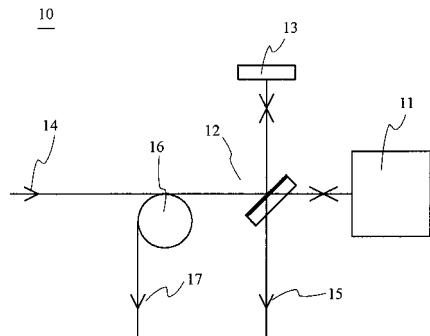
【 図 2 】



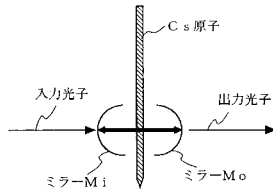
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第99/008982(WO, A1)

Q.A.Turchette et al., Measurement of Conditional Phase Shifts for Quantum Logic, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1995年12月18日, Vol.75, No.25, p.4710-4713

Q.A.Turchette et al., One-dimensional atoms, Appl.Phys., 1995年, Vol.B60, No.2/3, p.S1-S10

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/29 - 1/39

G02F 2/00 - 7/00

JST7580(JDream2)

JSTPlus(JDream2)

IEEE