

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4893961号
(P4893961)

(45) 発行日 平成24年3月7日(2012.3.7)

(24) 登録日 平成24年1月6日(2012.1.6)

(51) Int.Cl.		F I			
HO4B 10/04	(2006.01)	HO4B	9/00	L	
HO4B 10/06	(2006.01)	HO4B	9/00	B	
HO4B 10/142	(2006.01)				
HO4B 10/152	(2006.01)				
HO4B 10/00	(2006.01)				

請求項の数 16 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2007-228510 (P2007-228510)
 (22) 出願日 平成19年9月4日(2007.9.4)
 (65) 公開番号 特開2009-60555 (P2009-60555A)
 (43) 公開日 平成21年3月19日(2009.3.19)
 審査請求日 平成22年7月15日(2010.7.15)

(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願(平成18年度、独立行政法人情報通信研究機構、高度通信・放送研究開発における委託研究)は産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(73) 特許権者 000004237
 日本電気株式会社
 東京都港区芝五丁目7番1号
 (74) 代理人 100097157
 弁理士 桂木 雄二
 (72) 発明者 田中 聡寛
 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
 (72) 発明者 田島 章雄
 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
 (72) 発明者 高橋 成五
 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光送信器および複合変調器の制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光パルス有位相変調および強度変調して送信する光送信器において、
 前記光パルスを生成する光源と、
 前記光パルスから時間的に分離した2連パルスを生成する2連パルス生成手段と、
 前記2連パルスを第1経路および第2経路へ分岐させる分岐手段と、
 前記第1経路に設けられた第1光変調手段と、
 前記第2経路に直列に設けられた第2光変調手段および第3光変調手段と、
 前記第1経路を通過した2連パルスと前記第2経路を通過した2連パルスとを合波して出力2連パルスを生成する合波手段と、

を有し、前記第1光変調手段および前記第2光変調手段はそれぞれ通過する2連パルスの間で相対的な強度変調あるいは相対的な位相変調のいずれかを実行し、前記第3光変調手段は通過する2連パルスの間で相対的な位相変調を実行することを特徴とする光送信器。

【請求項2】

前記第3光変調手段の変調位相を0°と90°との間で切り替えることを特徴とする請求項1に記載の光送信器。

【請求項3】

前記第1光変調手段および前記第2光変調手段の各々は、所定の変調曲線を有するマッハ・ツェンダ光強度変調器であることを特徴とする請求項1または2に記載の光送信器。

【請求項 4】

前記第 1 光変調手段を前記変調曲線の極小点と第 1 動作点との間で切り替え、前記第 2 光変調手段を前記変調曲線の極小点と第 2 動作点との間で切り替え、前記第 1 動作点と前記第 2 動作点とは、前記変調曲線において前記極小点を挟んで対称に位置することを特徴とする請求項 3 に記載の光送信器。

【請求項 5】

前記第 1 光変調手段は所定の変調曲線を有するマッハ・ツェンダ光強度変調器であり、前記第 2 光変調手段は光位相変調器であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光送信器。

【請求項 6】

前記第 1 光変調手段を前記変調曲線の極小点と極大点との間で切り替え、前記第 2 光変調手段の変調位相を 0° と 180° との間で切り替えることを特徴とする請求項 5 に記載の光送信器。

【請求項 7】

前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段の各々は光位相変調器であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光送信器。

【請求項 8】

前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段の各々の変調位相を 0° と 180° との間で切り替えることを特徴とする請求項 7 に記載の光送信器。

【請求項 9】

前記合波手段からの出力 2 連パルスの光強度を減衰させる光減衰手段をさらに有することを特徴とする請求項 1 - 8 のいずれかに記載の光送信器。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の光送信器を用いた量子暗号鍵配付システム。

【請求項 11】

マッハ・ツェンダ干渉計の第 1 経路に第 1 光変調手段が接続され、第 2 経路に直列に第 2 光変調手段および第 3 光変調手段が接続された構成を有する複合変調器の制御方法であって、

前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段はそれぞれ通過する 2 連パルスの間で相対的な強度変調あるいは相対的な位相変調のいずれかを実行し、

前記第 3 光変調手段は通過する 2 連パルスの間で相対的な位相変調を実行する、
ことを特徴とする複合変調器の制御方法。

【請求項 12】

前記第 3 光変調手段の変調位相を 0° と 90° との間で切り替えることを特徴とする請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段の各々は所定の変調曲線を有するマッハ・ツェンダ光強度変調器であり、

前記第 1 光変調手段を前記変調曲線の極小点と第 1 動作点との間で切り替え、前記第 2 光変調手段を前記変調曲線の極小点と第 2 動作点との間で切り替え、前記第 1 動作点と前記第 2 動作点とは前記変調曲線において前記極小点を挟んで対称に位置する、

ことを特徴とする請求項 11 または 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記第 1 光変調手段は所定の変調曲線を有するマッハ・ツェンダ光強度変調器であり、前記第 2 光変調手段は光位相変調器であり、

前記第 1 光変調手段を前記変調曲線の極小点と極大点との間で切り替え、前記第 2 光変調手段の変調位相を 0° と 180° との間で切り替えることを特徴とする請求項 11 または 12 に記載の方法。

【請求項 15】

前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段の各々は光位相変調器であり、

10

20

30

40

50

前記第1光変調手段および前記第2光変調手段の各々の変調位相を0°と180°との間で切り替える、

ことを特徴とする請求項11または12に記載の方法。

【請求項16】

マツハ・ツェンダ干渉計の第1経路に第1光変調手段が接続され、第2経路に直列に第2光変調手段および第3光変調手段が接続された構成を有する複合変調器をコンピュータに制御させるプログラムであって、

前記第1光変調手段および前記第2光変調手段に、それぞれ通過する2連パルスの間で相対的な強度変調あるいは相対的な位相変調のいずれかを実行させ、

前記第3光変調手段に、通過する2連パルスの間で相対的な位相変調を実行させる、

ことを特徴とするプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は光パルスを位相変調および強度変調して送信する光通信システムに係り、特にその光送信器およびそれに用いられる複合変調器の制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

急激な成長を続けるインターネットは、便利である反面、その安全性に大きな不安を抱えているのが実情であり、通信の秘密保持の為に高度な暗号技術の必要性が益々高くなっている。現在一般的に用いられている暗号方式は、DES(Data Encryption Standard)やTriple DESといった秘密鍵暗号と、RAS(Rivest Shamir Adleman)や楕円曲線暗号の様な公開鍵暗号とに分類される。しかしながら、これらは計算の複雑性を元にその安全性を保証する暗号通信方法であり、膨大な計算能力や暗号解読アルゴリズムの出現によって解読されてしまう危険性を常に孕んでいる。こういった背景の下、量子暗号鍵配付システム(QKD)は絶対に盗聴されない暗号鍵配付技術として注目されている。

【0003】

QKDでは一般に通信媒体として光子を使用し、その量子状態に情報を載せて伝送を行う。伝送路の盗聴者は伝送中の光子をタッピングする等して情報を盗み見るものの、Heisenbergの不確定性原理により、1度観測されてしまった光子を完全に観測前の量子状態に戻すことは不可能となる。このことによって正規の受信者が検出する受信データの統計値に変化が生じ、この変化により受信者は伝送路における盗聴者を検出することができる。

【0004】

光子の位相を利用した量子暗号鍵配付方法の場合、送信者と受信者(以下、それぞれ「Alice」と「Bob」と称する)で光学干渉計を組織し、各々の光子にAliceおよびBobでそれぞれランダムに位相変調を施す。この変調位相深さの差によって“0”、“1”あるいは“不定”の出力が得られ、その後、出力データを測定したときの条件の一部分をAliceとBobとの間で照合することによって最終的にAlice-Bob間で乱数列を共有することができる。ここで共有した乱数列には、光子受信器ノイズ、古典通信信号から洩れ込むノイズ、干渉計の精度に起因するノイズ等の外乱によって発生する誤りが含まれており、さらに盗聴者(以下、Eveと称す)の盗聴行為によって発生する誤りも含まれていると考えるべきである。そこで、AliceおよびBobは、最終暗号鍵を得るために、共有乱数列中の誤りを除去する誤り訂正、Eveの保持しうる情報量を篩い落とす秘匿増強の処理を行う。

【0005】

最も実用化に適した構成として、非特許文献1などに示されているPlug & Play方式が頻繁に用いられている。Plug & Playでは、往復型の光学干渉計を構成することによって、光子パルスを時間的に分割する干渉計と時間的に再び結合させる干渉計とを同一のもので構成する。この為、干渉計の光路差が光子パルスの往復時間より長い時間だけ一定に保たれれば精度の良い干渉を実現できる、というメリットを有する。

10

20

30

40

50

【0006】

しかしながら、このような往復型のQKD方式では、光子パルスに位相変調を行う位相変調器を双方向で使用する必要がある為、暗号鍵共有速度の高速化には適さない。加えて、伝送路における後方散乱光の発生を免れない為、光子信号の信号対雑音比が劣化する、というデメリットも有する。

【0007】

一方、単一方向型のQKD方式は、送受信器内に異なる非対称干渉計を有し、光子パルスを時間的に分割する干渉計と時間的に再び結合させる干渉計とが遠隔地点に配置される。このために、複数干渉計の光路差を厳密に等しく保つ為の工夫が必要となる。たとえば、非特許文献2には、Bob側の非対称干渉計の片経路にファイバストレッチャを配置し、干渉特性をモニタしながらファイバストレッチャを制御して非対称干渉計の光路長差を調整するシステムが開示されている。

10

【0008】

しかしながら、光ファイバの線膨張係数は $10^{-6} \sim 10^{-5} / K$ であるから、100cmの光ファイバ(遅延量5nsに相当)は0.1度の温度変化で100~1000nm程度伸縮する。一般的な光通信やQKDに使用する光信号の波長は1550nmであるから、数nsの遅延量を有する非対称干渉計を使用すると、遅延用光ファイバ全体を0.01度よりも細かい粒度で温度制御しない限り安定した干渉特性を得ることが出来ない。そこで、非特許文献3では、平面光回路(PLC: Planar Lightwave Circuit)技術を利用して、光経路を小さい面積に実装することで温度制御の容易化を図っている。

20

【0009】

上述した様に、単一方向型QKDを実現する上で課題であった、複数干渉計の相対遅延量の安定化技術が徐々に確立され始めていることを受け、単一方向型QKDは近年様々な展開を見せ始めた。たとえば非特許文献4には2入力2出力の一般的なマッハ・ツェンダ(Mach-Zehnder)干渉計を使用する方式が提案され、非特許文献5には位相変調器を使用しない方式も提唱されている。両者とも、4つの量子状態を利用するBB84方式(非特許文献6参照)を具現化したものである。次に、これら非特許文献4および5に開示されたシステムについて説明する。

【0010】

図1(a)は非特許文献4に開示された単一方向型QKDシステムを概略的に示すブロック図であり、図1(b)は非特許文献5に開示された単一方向型QKDシステムを概略的に示すブロック図である。

30

【0011】

図1(a)の方式(以下、「方式A」と称す。)では4値の位相状態を使用する。まずAlice側の光源11によって生成した光パルスは、PLCAMZ(asymmetricマッハ・ツェンダ)干渉計12により2連パルスに時間分離され、これら2連パルスの位相差が位相変調器13および14によって0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の4通りに変調される。以下、位相差0と π のコーディングセットを「X基底(X basis)」、位相差 $\pi/2$ と $3\pi/2$ のコーディングセットを「Y基底(Y basis)」と呼ぶものとする。

【0012】

Bobでは、Aliceから受信した2連パルスが位相変調器16によって再度0若しくは $\pi/2$ の位相差変調を施され、PLCAMZ干渉計17によって合波された干渉結果が光子検出器APD₁あるいはAPD₂により検出される。

40

【0013】

方式Aにおいて、Alice側で4値の位相変調を施す為には、1つの位相変調を4値駆動する方法と、2つの位相変調器を各々2値駆動する方法が挙げられる。1つの位相変調を4値駆動する方法は、位相変調器が1つで済むので送信器の省スペースと省電力が可能となるメリットを有する。反面、システムの繰り返し速度が1GHzを超える様な高速伝送系では、4値駆動信号の各レベルを精度良く設定することが困難となり、0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の各位相状態の精度が劣化して暗号鍵生成効率が劣化してしまうメリッ

50

とも有している。他方、2つの位相変調器を各々2値駆動する方法では、各2値信号の振幅調整を個別に調整することで4値の位相状態を精度良く生成できる。

【0014】

図1(b)の方式(以下、「方式B」と称す。)では2値の位相状態と2値の時間状態とを使用する。まずAlice側で4入力2出力のPLC AMZ干渉計を利用し、4つの入力ポート各々に光源LD1-LD4からの光パルスを入力する。光源LD1から光パルスを入力した場合、光パルスは干渉計の長経路のみを通る為、時間的に遅れた1パルスのみが伝送路に送出され、光源LD4から光パルスを入力した場合には、光パルスは干渉計の短経路のみを通る為に時間的に進んだ1パルスのみが伝送路に送出される。光源LD2およびLD3から光パルスを入力した場合は、PLC AMZ干渉計25の両経路の位相差によって、X基底あるいはY基底を生成できる。Bob側では、2入力4出力のPLC AMZ干渉計27を利用して各基底のデコードを行い、光子検出器APD_{Z1}、APD₁、APD₂あるいはAPD_{Z2}により検出される。

10

【0015】

以下、光源LD1およびLD4を使用した場合の様に、2連パルスの片側のみ光子が存在するようなコーディングセットを「Z基底(Z basis)」と呼ぶこととする。なお、X基底あるいはY基底を選択時の2連パルスの光強度の総和は、Z基底選択時と等しい必要がある為、個々のパルスの強度は半分となる。

【0016】

すなわち、方式Bによれば、Alice側は光源LD1-LD4のうちどの光源から光パルスを発生させるかを選択し、Bob側は光子検出器APD_{Z1}、APD₁、APD₂あるいはAPD_{Z2}のいずれかで光子を検出することによりビットおよび基底を同時に判定することができる。

20

【0017】

【非特許文献1】"Automated 'plug & play' quantum key distribution" G. Ribordy, J.-D. Gautier, N. Gisin, O. Guinnard and H. Zbinden, Elec. Lett., Vol.34, No.22, pp.2116-2117

【非特許文献2】"Continuous operation of a one-way quantum key distribution system over installed telecom fibre" Z. L. Yuan and A. J. Shields, Optics Express, Vol.13, pp.660-665

30

【非特許文献3】"Asymmetric Mach-Zehnder germano-silicate channel waveguide interferometers for quantum cryptography systems," G. Bonfrate, M. Harlow, C. Ford, G. Maxwell and P.D. Townsend, Elec. Lett., Vol.37, No.13, pp.846-847

【非特許文献4】"One-Way Quantum Key Distribution System Based on Planar Lightwave Circuits" Yoshihiro NAMBU, Ken'ichiro YOSHINO and Akihisa TOMITA, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, pp. 5344-5348

【非特許文献5】"Quantum key distribution systems without optical switching using planar lightwave circuit," Yoshihiro Nambu, Ken'ichiro Yoshino, Akihisa Tomita, The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, P2-31

40

【非特許文献6】"QUANTUM CRYPTOGRAPHY: PUBLIC KEY DISTRIBUTION AND COIN TOSsing," C. H. Bennett and G. Brassard, in Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, Bangalore (IEEE, New York, 1984), pp. 175-179

【非特許文献7】"Proposal of 8-state Symbol (Binary ASK and QPSK) 30-Gbit/s Optical Modulation /Demodulation Scheme," Shigenori Hayase, Nobuhiko Kikuchi, Kenro Sekine, Shinya Sasaki, ECOC2003, Th.2.6.4

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0018】

50

まず、方式 A および方式 B の受信器構成には、各々メリットとデメリットがある。方式 B は、Bob 側に位相変調器を必要としないので、位相変調器の損失分の長距離化・高速化が可能である、というメリットがある反面、光子検出器を 4 つ必要とする為に消費電力が大きい、というデメリットがある。逆に方式 A では、光子検出器が 2 つで良いので消費電力面でメリットがあるものの、Bob 側の位相変調器の損失によって長距離・高速化に不向きである、というデメリットがある。したがって、方式 A および B のメリット・デメリットを考慮して両方式に適用できる送信器が望ましいものの、方式 A および方式 B 両方に適用可能な送信器はこれまで提案されていない。

【 0 0 1 9 】

さらに、図 1 (b) に示す方式 B では 4 つの光源 LD 1 - LD 4 を必要とするが、実際問題として、4 つの光源からの出力光のスペクトルを完全に一致させることはきわめて困難である。この偏差が大きい場合、盗聴者 Eve は、波長の偏差を測定することによって、伝送されている量子状態を正しく特定することができ、盗聴の痕跡を残さずに量子状態を複製することが可能となる。

【 0 0 2 0 】

また、図 1 (b) の方式 B を図 1 (a) の方式 A にも対応できるような送信器構成とするために、Alice の PLC AMZ 干渉計 1 2 の出力に複数の変調器を単純に配置しようとすると、4 個の変調器が必要となる。以下、図面を用いて説明する。

【 0 0 2 1 】

図 2 (a) は X、Y、Z 基底を用意する為に必要な変調をまとめて示す概念図であり、図 2 (b) はその信号点配置図である。図 2 に示す様に、方式 A の 2 入力 2 出力の PLC AMZ 干渉計 1 2 の出力は強度の等しい 2 連光パルスとなる。Z 基底変調時には、強度変調器を利用してこの内の片方を完全に消光させる。X 基底若しくは Y 基底変調時には、強度変調器を利用して両パルスの強度を半分にまで消光すると同時に、位相変調器を利用して 2 連パルス間に位相差を与える必要がある。つまり、方式 A の受信器に対応する為には $\pi/2$ 刻みの 4 値の位相変調が必要となり、方式 B の受信器にも対応する為には 0、 $\pi/2$ 、 π の 3 値の強度変調が必要となる。必要な信号点を I Q 平面にプロットしたものが図 2 (b) である。

【 0 0 2 2 】

図 2 (b) において、Z 基底の光パルスはその位相状態が限定されない為、図 2 (b) における点 A は位相が 0 である必要は無く、I Q 平面の原点から点 A までの距離を半径とする同強度の円上のどこの点をとっても良い。このような変調を実現するために、非特許文献 7 に記載の変調方法を利用することができる。非特許文献 7 には、位相 4 値、強度 2 値の 8 値 APSK (Amplitude Phase Shift Keying) 変調を 2 つの位相変調器と 1 つの強度変調器の合計 3 つの光変調器を用いて構成した変調器が開示されている。

【 0 0 2 3 】

図 3 は非特許文献 7 に記載された ASK - QPSK 送信器の構成を示すブロック図およびその信号点配置図である。

【 0 0 2 4 】

図 3 に示すように、光源 3 1 の出力側に、(0、 $\pi/2$) 変調用の位相変調器 3 2 および (0、 π) 変調用の位相変調器 3 3 と、(1/2、1) 変調用の強度変調器 3 4 との合計 3 つの変調器をカスケード接続して必要な I Q 平面上の信号点配置を用意できる。しかしながら、図 3 の符号配置図と図 2 (b) の符号配置図とを比較すると、図 3 には強度 0 の点がないので、これを追加するために強度変調器を 1 つ追加する必要がある。つまり、光源 3 1 の出力側に、(0、 $\pi/2$) 変調用の位相変調器 3 2 および (0、 π) 変調用の位相変調器 3 3 と (1/2、1) 変調用の強度変調器 3 4 とに加えて、さらに (0、1) 変調用の強度変調器をカスケード接続することが必要である。

【 0 0 2 5 】

このように、非特許文献 7 による送信機の構成を利用して図 2 (b) に示すような信号点配置を得ようとするれば、合計 4 個の光変調器が必要となる。消費電力、省スペースの観

10

20

30

40

50

点から、使用する変調器の数はできるだけ減らすことが望ましい。

【 0 0 2 6 】

本発明の目的は、変調器の個数を低減させて強度 3 値および位相 4 値の変調を可能にする新たな構成の光送信器およびそれに用いられる複合変調器の制御方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 2 7 】

本発明による光送信器は、光パルス有位相変調および強度変調して送信する光送信器であって、前記光パルスを生成する光源と、前記光パルスから時間的に分離した 2 連パルスを生成する 2 連パルス生成手段と、前記 2 連パルスを第 1 経路および第 2 経路へ分岐させる分岐手段と、前記第 1 経路に設けられた第 1 光変調手段と、前記第 2 経路に直列に設けられた第 2 光変調手段および第 3 光変調手段と、前記第 1 経路を通過した 2 連パルスと前記第 2 経路を通過した 2 連パルスとを合波して出力 2 連パルスを生成する合波手段と、を有し、前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段はそれぞれ通過する 2 連パルスの間で相対的な強度変調あるいは相対的な位相変調のいずれかを実行し、前記第 3 光変調手段は通過する 2 連パルスの間で相対的な位相変調を実行することを特徴とする。

本発明による複合変調器の制御方法は、マッハ・ツェンダ干渉計の第 1 経路に第 1 光変調手段が接続され、第 2 経路に直列に第 2 光変調手段および第 3 光変調手段が接続された構成を有する複合変調器の制御方法であって、前記第 1 光変調手段および前記第 2 光変調手段はそれぞれ通過する 2 連パルスの間で相対的な強度変調あるいは相対的な位相変調のいずれかを実行し、前記第 3 光変調手段は通過する 2 連パルスの間で相対的な位相変調を実行する、ことを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 2 8 】

本発明によれば、3 つの光変調手段を用いて強度 3 値および位相 4 値の変調が可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 2 9 】

本発明による光送信器に用いられる複合変調器には、入力した 2 連パルスを分岐する分岐部の一方の経路に第 1 光変調器が、他方の経路に第 2 光変調器および第 3 光変調器が直列にそれぞれ設けられ、双方の経路から出力する 2 連パルスを合波する合波部が他方の端に設けられている。光送信器は、合波された 2 連パルスを必要に応じて減衰し、たとえば単一光子レベルの 2 連パルスとして送出する。以下、複合変調器にマッハ・ツェンダ干渉計のメイン構成を適用した例を用いて本発明を詳細に説明する。

【 0 0 3 0 】

図 4 は本発明の一適用例である光送信器の概略的な構成を示すブロック図である。光源 1 0 1 によって生成された光パルス P 0 は、2 連パルス生成部 1 0 2 によって 2 連パルス P 1 および P 2 に分離され、複合変調器 1 0 3 によって X / Y / Z 基底変調される。複合変調器 1 0 3 は、後述するように制御部 1 0 5 からの駆動信号 R F_A、R F_B および R F_C によって制御される。複合変調器 1 0 3 によって変調された 2 連パルスは、必要に応じて単一光子レベルまで光強度を減衰され、伝送路へと送出される。

【 0 0 3 1 】

複合変調器 1 0 3 は光分岐部 1 3 1 と光合波部 1 3 5 との間に 2 つの経路を有し、第 1 の経路に第 1 光変調器 1 3 2 が、第 2 の経路に第 2 光変調器 1 3 3 および第 3 光変調器 1 3 4 がそれぞれ設けられている。2 連パルス生成部 1 0 2 から入力した 2 連パルス P 1 および P 2 は光分岐部 1 3 1 によってそれぞれ 2 分岐される。第 1 の経路の 2 連パルスは第 1 光変調器 1 3 2 を通過し、第 2 の経路の 2 連パルスは第 2 光変調器 1 3 3 および第 3 光変調器 1 3 4 を通過し、それぞれの経路を通過した 2 連パルスが光合波部 1 3 5 で合波されることで、後述するように、強度 3 値 (0 , 1 / 2 , 1) および位相 4 値 (a , b , c , d) の変調を実現することができる。たとえば、第 1 光変調器 1 3 2 と第 2 光変調器 1

10

20

30

40

50

33 (あるいは第3光変調器134)とを強度変調器あるいは位相変調器(変調位相の振れ幅180°)のいずれかで動作させ、第3光変調器134(あるいは第2光変調器133)を変調位相の振れ幅90°で切り替える。

【0032】

本適用例では、第2の経路にある第2光変調器133および第3光変調器134の少なくとも一方は位相変調器であり、第2の経路にある他方の光変調器と第1の経路にある第1光変調器132とは強度変調器および位相変調器の任意の組み合わせである。2つの経路と光分岐部131および光合波部135とはマッハ・ツェンダ(Mach-Zehnder)干渉計を構成することが望ましい。

【0033】

また強度変調器は、後述するようにマッハ・ツェンダ干渉計を用いた強度変調器であることが望ましい。位相変調器もマッハ・ツェンダ型変調器を用いることができるが、これに限定されない。ここで用いられるマッハ・ツェンダ型変調器は、通常のマッハ・ツェンダ型LN(LiNbO₃)変調器であり、後述するように駆動電圧RFを制御することで光パルスに対して強度変調あるいは位相変調を行うことができる。

【0034】

複合変調器103は制御部105により駆動される。ここでは、駆動信号RF_A、RF_BおよびRF_Cによって、第1光変調器132、第2光変調器133および第3光変調器134がそれぞれ駆動される。制御部105は、それぞれの光変調器が強度変調あるいは位相変調のいずれを行うかに応じて、駆動信号RF_A、RF_BおよびRF_Cをそれぞれ生成する。

【0035】

また、光源101は、たとえばレーザダイオードであり、光パルスP0を出力する。2連パルス生成部102は、たとえば平面光回路の非対称マッハ・ツェンダ(PLCAMZ)型、Michelson型などの干渉計である。制御部105は、プログラム制御プロセッサあるいはCPU上でプログラムを実行することにより実現することもできる。

【0036】

以下の各実施例で詳述するように、上述した3つの光変調器からなる複合変調器103によって2連パルスは図2に示す強度3値/位相4値で変調され、図1に示す方式Aおよび方式B両方に適用可能な光送信器を実現することができる。

【0037】

1. 第1実施例

本発明の第1実施例によれば、複合変調器は、マッハ・ツェンダ干渉計の片経路(一方のアーム)に設けられたマッハ・ツェンダ強度変調器と、他経路(他方のアーム)に設けられたマッハ・ツェンダ強度変調器および位相変調器とを有する。すなわち、図4における第1光変調器132および第2光変調器133がマッハ・ツェンダ強度変調器、第3光変調器134が位相変調器である。

【0038】

1.1) 構成

図5(a)は本発明の第1実施例による光送信器の概略的構成を示すブロック図であり、図5(b)はその信号点配置図である。光源101によって生成された光パルスP0は、2連パルス生成部(ここではPLCAMZ干渉計)102によって2連パルスP1およびP2へ分離される。2連パルスP1およびP2は、本実施例による複合変調器201によって変調された後、光減衰器104によって単一光子レベルまで光強度を減衰されて伝送路へと送出される。

【0039】

複合変調器201はマッハ・ツェンダ干渉計のメイン構成を有し、入力段のY分岐231と、マッハ・ツェンダの一方のアーム上にあるマッハ・ツェンダ強度変調器232と、他方のアーム上にあるマッハ・ツェンダ強度変調器233および位相変調器234と、出力段のY分岐235とを有する。ここで、マッハ・ツェンダ強度変調器232および23

10

20

30

40

50

3は、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) を用いたXカットのLN変調器であることが望ましい。複合変調器201により変調された2連パルスは光減衰器104へ出力される。また、本実施例では、Y分岐235による合波光は2分岐され、その一方の光がY分岐235の出力光として出力されるものとする。

【0040】

複合変調器201のマッハ・ツェンダ強度変調器232、マッハ・ツェンダ強度変調器233および位相変調器234は、それぞれ駆動信号 RF_A 、 RF_B および RF_C によって駆動される。以下、各変調器の駆動電気信号は信号生成回路の容易化の為に全て2値信号とする。なお、複合変調器201を構成するための変調器は、 LiNbO_3 の導波路を使用してSSB-SC変調器またはFSK変調器として市販されている(たとえば、2007年1月現在のURL: "<http://www.socnb.com/report/pproduct/ln10.pdf>"を参照)。

10

【0041】

1.2) 動作

図6は本発明の第1実施例で使用する複合変調器の各位置での光強度を表す図である。複合変調器201の入力点での光強度をAとすると、入力側の分波用Y分岐231の分波後の光強度は各々 $A/2$ となり、マッハ・ツェンダ強度変調器232および233の各経路の光強度は各々 $A/4$ となる。

【0042】

図7は本発明の第1実施例で使用されるXカットLN強度変調器の変調曲線を概念的に示すグラフである。XカットのLN変調器は、電極に電圧を施した際、片側の経路で光信号の位相が進み、他方の経路で光信号の位相が遅れる為、変調曲線(トランスファークラブ)の最小点(B点)を跨がない限り変調器の出力位相は変化しない。すなわち、駆動電圧が $0 \sim +V$ であれば位相は0のまま出力光強度のみが変化し、駆動電圧が $-V \sim 0$ であれば位相は0のまま出力光強度のみが変化する。変調曲線の最小点Bを跨ぐと、出力光の位相が変化する。

20

【0043】

以下の説明では、簡単の為、駆動信号 RF_A および RF_B の印加電圧を0[V]とした時に出力光強度が0となる様にマッハ・ツェンダ強度変調器232および233のバイアス調整がなされているものとする。図7の変調曲線を参照すると、マッハ・ツェンダ強度変調器232に印加される電圧 RF_A はA点とB点の間を切り替わり、マッハ・ツェンダ強度変調器233に印加される RF_B はB点とC点との間を切り替わる。従って、Xカットマッハ・ツェンダ強度変調器232および233の出力光の位相は正確に0と2値を取ることができる。

30

【0044】

なお、 RF_A および RF_B を図7のA点に保持し($+V$ [V]印加)、位相変調器234に印加される RF_C を0[V]とした時に複合変調器201の出力光強度が最大となる様に各経路の光路差が調整されているとする。さらに、各変調器の位相差を生じる為の駆動電圧 V [V]は等しいものとする。

【0045】

図8は本発明の第1実施例で使用する複合変調器の駆動方法を説明するための駆動電圧と出力光強度/位相との関係を示す模式図である。ここでは、説明を簡略にするために、パルス時間帯 $t_1 \sim t_{12}$ は2つずつ($t_1 t_2 / t_3 t_4 / \dots$)がそれぞれ2連パルスのタイミングに対応するものとする。図8(a)~(c)はそれぞれ駆動信号 RF_A 、 RF_B および RF_C の波形図、図8(d)は出力光強度を模式的に示す図、図8(e)は出力光強度の相対的な大きさの変化を示す数値、図8(f)は各2連パルスの出力光位相の変化を示す数値である。ただし、図8(e)の数値は図6における $A=1$ とした時の比率を表すものとする。

40

【0046】

図8のパルス時間帯 t_1 では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が0[V]、 RF_C が0[V]となるので、マッハ・ツェンダ強度変調器232の出力光は位相0、強度 $1/2$ となり、マッハ

50

・ツェンダ強度変調器 2 3 3 の光出力は強度 0 となる。これらの光が出力側の Y 分岐 2 3 5 で合波され、その合波光が 2 分岐されて出力されるので、出力光は位相 0、強度 $1/4$ となる。他のパルス時間帯 t_2 、 t_3 、 t_5 、 t_8 における変調も上記パルス時間帯 t_1 と同じ変調が行われるので、それらの時点でも出力光は位相 0、強度 $1/4$ となる。

【0047】

パルス時間帯 t_4 では、 RF_A が 0 [V]、 RF_B が $-V$ [V]、 RF_C が 0 [V] となるので、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 2 の出力光強度は 0 となり、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 3 の出力光は位相、強度 $1/2$ となる。したがって、出力側の Y 分岐 2 3 5 での合波出力光は位相、強度 $1/4$ となる。

【0048】

パルス時間帯 t_6 および t_7 では、 RF_A が 0 [V]、 RF_B が $-V$ [V]、 RF_C が $+V/2$ [V] となるので、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 2 の光出力強度は 0 となり、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 3 の光出力は位相、強度 $1/2$ となる。マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 3 の光出力は、さらに位相変調器 2 3 4 において $RF_C = +V/2$ [V] に相当する位相変調を受ける為、Y 分岐 2 3 5 に入力する時には位相 $3/2$ 、強度 $1/2$ となる。これらの光を合波することで出力側の Y 分岐 2 3 5 の出力光は位相 $3/2$ 、強度 $1/4$ となる。

【0049】

パルス時間帯 t_9 および t_{12} では、 RF_A が 0 [V]、 RF_B が 0 [V]、 RF_C が $+V/2$ [V] となるので、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 2 および 2 3 3 の出力は共に強度 0 となり、出力側の Y 分岐 2 3 5 の出力も強度 0 となる。

【0050】

最後に、パルス時間帯 t_{10} および t_{11} では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が $-V$ [V]、 RF_C が $+V/2$ [V] となるので、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 2 の出力光は位相 0、強度 $1/2$ となり、マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 3 の出力光は位相、強度 $1/2$ となる。マッハ・ツェンダ強度変調器 2 3 3 の出力光は、さらに $RF_C = +V/2$ [V] に相当する位相変調を受けるので、Y 分岐 2 3 5 に入力する時には、位相 $3/2$ 、強度 $1/2$ となる。位相 0、強度 $1/2$ の光と位相 $3/2$ 、強度 $1/2$ の光とが合波することで、Y 分岐 2 3 5 の出力光は位相 $7/4$ 、強度 $1/2$ となる。

【0051】

以上より、パルス時間帯 t_1 および t_2 からなる時間帯 T 1 は 2 連パルスの光強度が同じ ($1/4$) で出力光位相も同じであるから、X 基底の “0” に対応する。パルス時間帯 t_3 および t_4 からなる時間帯 T 2 は 2 連パルスの光強度が同じ ($1/4$) で出力光位相が 180° () 異なるので、X 基底の “1” に対応する。

【0052】

パルス時間帯 t_5 および t_6 からなる時間帯 T 3 は 2 連パルスの光強度が同じ ($1/4$) で出力光位相が 270° ($3/2$) 異なるので、Y 基底の “1” に対応する。パルス時間帯 t_7 および t_8 からなる時間帯 T 4 は 2 連パルスの光強度が同じ ($1/4$) で出力光位相が 90° ($1/2$) 異なるので、Y 基底の “0” に対応する。

【0053】

パルス時間帯 t_9 および t_{10} からなる時間帯 T 5 とパルス時間帯 t_{11} および t_{12} からなる時間帯 T 6 とは、2 連パルスの片方のパルスが消光され、かつ、他方の光パルス強度 ($1/2$) が X、Y 基底選択時の 2 倍であるから、各々 Z 基底の “0” および “1” に対応する。したがって、図 4 における強度 3 値 (0 , $1/4$, $1/2$) および位相 4 値 ($a = 0$, $b =$, $c = 3/2$, $d = 1/2$) の変調が実現される。

【0054】

このように、 RF_A 、 RF_B および RF_C の 3 ポートの駆動信号によって、X、Y、Z 基底の “0” と “1” とを生成することができる。したがって、X、Y、Z の 3 基底の中から任意の 2 基底を選択することによって BB 8 4 プロトコルを実装することができる。即ち、T 1、T 2、T 3、T 4 の時間帯の変調をランダムに繰り返すと、方式 A の受信器に

10

20

30

40

50

対応する4値位相コーディングを実現できる。

【0055】

また、T1、T2、T5、T6の時間帯の変調をランダムに繰り返し、2入力4出力PLC AMZ213のマッハ・ツェンダ干渉計の両経路の位相差を0若しくは π に設定すると、方式Bの受信器に対応する2値位相+2値時間コーディングを実現できる。

【0056】

さらに、T3、T4、T5、T6の時間帯の変調をランダムに繰り返し、2入力4出力PLC AMZ213のマッハ・ツェンダ干渉計の両経路の位相差を $\pi/2$ 若しくは $3\pi/2$ に設定しても、方式Bの受信器に対応する2値位相+2値時間コーディングを実現できる。この場合は、 RF_C には高速信号を施す必要が無く、 $+V_{\pi/2}$ [V]にバイアスし続けるだけで良い為、変調器ドライバで消費される消費電力をさらに低減することができる。

【0057】

なお、本実施例では、パルス時間帯 $t_1 \sim t_3$ 、 t_5 、 t_8 、 t_9 、 t_{12} では、 $RF_B = 0$ [V]であり、マッハ・ツェンダ変調器233の出力光強度が0となる為、 $RF_C = 0$ [V]、 $V_{\pi/2}$ [V]のどちらでも良い。本実施例で用意できる出力光状態をIQ平面にプロットすると図5(b)の様になる。

【0058】

1.3) 効果

上述したように、本発明の第1実施例によれば、量子暗号方式AおよびBの受信器両方に適用可能な送信器を構成できる。また、方式Bを利用する際に問題となった光源の波長偏差によって生じる安全性低下を防ぐことができる。さらに、本実施例による光送信器は汎用性の高く、かつ省スペース化および省電力化を促進できるという利点もある。

【0059】

本実施例では、光パルスの時間分離および合波を行う手段としてPLCマッハ・ツェンダ干渉計を使用した。本発明はこの実施例に限定されない。Michelson型等の他の干渉計形態でも同様の送信器を構成することができる。

【0060】

また、本実施例では、2つのマッハ・ツェンダ強度変調器232および233の駆動信号を振幅 $V_{\pi/2}$ [V]で振る方法としたが、強度変調器の駆動電圧の振幅は $V_{\pi/2}$ [V]に限らず、変調曲線の最小点Bを得る為に必要な駆動電圧を V_{min} [V]、振幅を V_a [V]とすると、一方の変調器を V_{min} [V] ~ $V_{min} + V_a$ [V]、他方の変調器を V_{min} [V] ~ $V_{min} - V_a$ [V]で変調すれば、同様の状態を得ることができる。

【0061】

2. 第2実施例

本発明の第2実施例によれば、複合変調器は、マッハ・ツェンダ干渉計の片経路(一方のアーム)に設けられたマッハ・ツェンダ強度変調器と、他経路(他方のアーム)に設けられた2つの位相変調器とを有する。すなわち、図4における第1光変調器132がマッハ・ツェンダ強度変調器、第2光変調器133および第3光変調器134が位相変調器である。

【0062】

2.1) 構成

図9(a)は本発明の第2実施例による光送信器の概略的構成を示すブロック図であり、図9(b)はその信号点配置図である。である。第2実施例は、図5に示す第1実施例とは複合変調器301の構成が異なるだけで、その他の回路構成は同じである。したがって、図5と同じ回路要素には同じ参照番号を付して説明は省略する。

【0063】

複合変調器301はマッハ・ツェンダ干渉計のメイン構成を有し、入力段のY分岐331と、マッハ・ツェンダの一方のアーム上にあるマッハ・ツェンダ強度変調器332と、他方のアーム上にある位相変調器333および位相変調器334と、出力段のY分岐33

10

20

30

40

50

5とを有する。ここで、マッハ・ツェンダ強度変調器332は、ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)を用いたXカットのLN変調器であることが望ましい。複合変調器301により変調された2連パルスは光減衰器104へ出力される。また、本実施例では、Y分岐335による合波光は2分岐され、その一方の光がY分岐335の出力光として出力されるものとする。

【0064】

複合変調器301のマッハ・ツェンダ強度変調器232、位相変調器333および位相変調器334は、それぞれ駆動信号RFA、RFBおよびRFCによって駆動される。なおマッハ・ツェンダ強度変調器332は図7に示す変調曲線を有するものとする。

【0065】

2.2)動作

以下の説明では、簡単な為、駆動信号RFAの印加電圧を0[V]とした時に出力光強度が0となる様にマッハ・ツェンダ強度変調器332のバイアス調整がなされているものとする。図7の変調曲線を参照すると、マッハ・ツェンダ強度変調器332に印加される電圧RFAはA点とB点の間を切り替わる。

【0066】

なお、RFAを図7のA点に保持し(+V [V]印加)、位相変調器333および334にそれぞれ印加されるRFBおよびRFCを0[V]とした時に、位相変調器334の出力光の位相を0とし、複合変調器301の出力光強度が最大となる様に各経路の光路差が調整されているとする。さらに、各変調器の位相差を生じる為の駆動電圧V [V]は等しいものとする。

【0067】

図10は本発明の第2実施例で使用する複合変調器の駆動方法を説明するための駆動電圧と出力光強度/位相との関係を示す模式図である。ここでは、説明を簡略にするために、パルス時間帯t1~t12は2つずつ(t1t2/t3t4/...)が2連パルスのタイミングに対応するものとする。図10(a)~(c)はそれぞれ駆動信号RFA、RFBおよびRFCの波形図、図10(d)は出力光強度を模式的に示す図、図10(e)は出力光強度の相対的な大きさの変化を示す数値、図10(f)は各2連パルスの出力光位相の変化を示す数値である。ただし、図10(e)の数値は図9における複合変調器301に inputsする時の光パルス強度を1とした時の比率を表すものとする。

【0068】

図10のパルス時間帯t1では、RFA=RFB=RFC=0[V]に設定されているので、マッハ・ツェンダ強度変調器332の出力光強度は0となり、位相変調器334の出力光は位相0、強度1/2となる。これらの光を出力側のY分岐335で合波すると、その出力光は位相0、強度1/4となる。パルス時間帯t2、t3、t5、t7においても、パルス時間帯t1と同じ変調を施している為、位相0、強度1/4の出力光が得られる。

【0069】

次に、パルス時間帯t4では、RFAが0[V]、RFBが+V [V]、RFCが0[V]であるから、マッハ・ツェンダ強度変調器332の出力光強度は0となり、位相変調器334の出力光は位相、強度1/2となる。したがって、これらの光を合波すると、出力側のY分岐335の出力光は位相、強度1/4となる。

【0070】

パルス時間帯t6では、RFAが0[V]、RFBが+V [V]、RFCが+V / 2 [V]であるから、マッハ・ツェンダ強度変調器332の出力光強度は0となり、位相変調器334の出力光は位相3 / 2、強度1/2となる。したがって、これらの光を合波すると、出力側のY分岐335の出力光は位相3 / 2、強度1/4となる。

【0071】

パルス時間帯t8では、RFAが0[V]、RFBが0[V]、RFCが+V / 2 [V]であるから、マッハ・ツェンダ強度変調器332の出力光強度は0となり、位相変調器334の出力光は位相 / 2、強度1/2となる。これらの光を合波すると、出力側のY分岐335

10

20

30

40

50

の出力光は位相 $\pi/2$ 、強度 $1/4$ となる。

【0072】

パルス時間帯 t_9 および t_{12} では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が $+V$ [V]、 RF_C が 0 [V] であるから、マッハ・ツェンダ強度変調器 332 の出力光は位相 0 、強度 $1/2$ となり、位相変調器 334 の出力光は位相 $\pi/2$ 、強度 $1/2$ となる。したがって、これらの光を合波すると、相殺し合って出力側の Y 分岐 335 の出力光は強度 0 となる。

【0073】

最後に、パルス時間帯 t_{10} および t_{11} では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が $+V$ [V]、 RF_C が $+V/2$ [V] であるから、マッハ・ツェンダ強度変調器 332 の出力光は、位相 0 、強度 $1/2$ となり、位相変調器 334 の出力光は位相 $3\pi/2$ 、強度 $1/2$ となる。位相 0 、強度 $1/2$ の光と位相 $3\pi/2$ 、強度 $1/2$ の光とを合波すると、Y 分岐 335 の出力光は位相 $7\pi/4$ 、強度 $1/2$ となる。

10

【0074】

以上より、パルス時間帯 t_1 および t_2 からなる時間帯 T_1 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相も同じであるから、X 基底の “0” に対応する。パルス時間帯 t_3 および t_4 からなる時間帯 T_2 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相が 180° (π) 異なるので、X 基底の “1” に対応する。

【0075】

パルス時間帯 t_5 および t_6 からなる時間帯 T_3 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相が 270° ($3\pi/2$) 異なるので、Y 基底の “1” に対応する。パルス時間帯 t_7 および t_8 からなる時間帯 T_4 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相が 90° ($\pi/2$) 異なるので、Y 基底の “0” に対応する。

20

【0076】

パルス時間帯 t_9 および t_{10} からなる時間帯 T_5 とパルス時間帯 t_{11} および t_{12} からなる時間帯 T_6 とは、2 連パルスの片方のパルスが消光され、かつ、他方の光パルス強度が X、Y 基底選択時の 2 倍であるから、各々 Z 基底の “0” および “1” に対応する。したがって、図 4 における強度 3 値 ($0, 1/4, 1/2$) および位相 4 値 ($a=0, b=\pi/4, c=3\pi/2, d=\pi/2$) の変調が実現される。

【0077】

このように、 RF_A 、 RF_B および RF_C の 3 ポートの駆動信号によって、X、Y、Z 基底の “0” と “1” とを生成することができる。したがって、X、Y、Z の 3 基底の中から任意の 2 基底を選択することによって BB84 プロトコルを実装することができる。即ち、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 の時間帯の変調をランダムに繰り返すと、方式 A の受信器に対応する 4 値位相コーディングを実現できる。この場合は、 RF_A には高速信号を施す必要が無く、 0 [V] のバイアスをかけ続けるだけで良い為、変調器ドライバで消費される電力を低減することができる。

30

【0078】

また、 T_1 、 T_2 、 T_5 、 T_6 の時間帯の変調をランダムに繰り返し、2 入力 4 出力 PLC AMZ 213 のマッハ・ツェンダ干渉計の両経路の位相差を 0 若しくは $\pi/2$ に設定すると、方式 B の受信器に対応する 2 値位相 + 2 値時間コーディングを実現できる。

40

【0079】

さらに、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 の時間帯の変調をランダムに繰り返し、2 入力 4 出力 PLC AMZ 213 のマッハ・ツェンダ干渉計の両経路の位相差を $\pi/2$ 若しくは $3\pi/2$ に設定しても、方式 B の受信器に対応する 2 値位相 + 2 値時間コーディングを実現できる。本実施例で用意できる出力光状態を IQ 平面にプロットすると図 9 の様になる。

【0080】

2.3) 効果

本発明の第 2 実施例においても第 1 実施例と同等の効果を得ることが出来る。すなわち、第 2 実施例によっても量子暗号方式 A および B の受信器両方に適用可能な送信器を構成できる。また、方式 B を利用する際に問題となった光源の波長偏差によって生じうる安全

50

性低下を防ぐことができる。さらに、本実施例による光送信器は汎用性の高く、かつ省スペース化および省電力化を促進できるという利点もある。

【0081】

第2実施例では、光パルスの時間分離および合波を行う手段としてPLCマッハ・ツェンダ干渉計を使用したが、本発明はこの実施例に限定されない。Michelson型等の他の干渉計形態でも同様の送信器を構成することができる。

【0082】

また、第2実施例では、第1のマッハ・ツェンダ強度変調器232の駆動信号を振幅V[V]で振る方法としたが、強度変調器の駆動電圧の振幅はV[V]に限らず、変調曲線の最小点Bを得る為に必要な駆動電圧をVmin[V]、振幅をVa[V]とすると、一方の変調器をVmin[V]~Vmin+Va[V]、他方の変調器をVmin[V]~Vmin-Va[V]で変調すれば、同様の状態を得ることができる。

【0083】

なお、位相変調器333は等しい強度で位相を0ととの間で切り替える動作を行えばよいから、図5の第1実施例におけるマッハ・ツェンダ変調器233を、図7の変調曲線からわかるように、-V~+Vの間で振る構成でも同等の変調を行うことができる。

【0084】

3. 第3実施例

本発明の第3実施例によれば、複合変調器は、マッハ・ツェンダ干渉計の片経路(一方のアーム)に設けられた1つの位相変調器と、他経路(他方のアーム)に設けられた2つの位相変調器とを有する。すなわち、図4における第1光変調器132、第2光変調器133および第3光変調器134がすべて位相変調器である。

【0085】

3.1) 構成

図11(a)は本発明の第3実施例による光送信器の概略的構成を示すブロック図であり、図11(b)はその信号点配置図である。である。第3実施例は、図5に示す第1実施例とは複合変調器401の構成が異なるだけで、その他の回路構成は同じである。したがって、図5と同じ回路要素には同じ参照番号を付して説明は省略する。

【0086】

複合変調器401はマッハ・ツェンダ干渉計のメイン構成を有し、入力段のY分岐431と、マッハ・ツェンダの一方のアーム上の位相変調器432と、他方のアーム上の位相変調器433および位相変調器434と、出力段のY分岐435とを有する。複合変調器301により変調された2連パルスは光減衰器104へ出力される。複合変調器401の位相変調器432、433および434は、それぞれ駆動信号RF_A、RF_BおよびRF_Cによって駆動される。また、本実施例では、Y分岐435による合波光は2分岐され、その一方の光がY分岐435の出力光として出力されるものとする。

【0087】

3.2) 動作

以下の説明では、簡単の為、駆動信号RF_Aの印加電圧を0[V]とした時に位相変調器432の出力光の位相が0、駆動信号RF_Bの印加電圧を0[V]とした時に位相変調器433の出力光の位相が0、RF_A=RF_B=RF_C=0[V]に設定された時に複合変調器301の出力光強度が最大となる様に各経路の光路差が調整されているとする。さらに、各変調器の位相差を生じる為の駆動電圧V[V]は等しいものとする。

【0088】

図12は本発明の第3実施例で使用する複合変調器の駆動方法を説明するための駆動電圧と出力光強度/位相との関係を示す模式図である。ここでは、説明を簡略にするために、パルス時間帯t1~t12は2つずつ(t1t2/t3t4/...)2連パルスのタイミングに対応するものとする。図12(a)~(c)はそれぞれ駆動信号RF_A、RF_BおよびRF_Cの波形図、図12(d)は出力光強度を模式的に示す図、図12(e)は出力光強度の相対的な大きさの変化を示す数値、図12(f)は各2連パルスの出力光位相

10

20

30

40

50

の変化を示す数値である。ただし、図 1 2 (e) の数値は、図 1 1 における複合変調器 4 0 1 に入力する時の光パルス強度を 1 とした時の比率を表すものとする。

【 0 0 8 9 】

図 1 2 のパルス時間帯 t_1 では、 $RF_A = RF_B = 0$ [V]、 $RF_C = +V / 2$ [V] に設定されているので、位相変調器 4 3 2 の出力光は位相 0、強度 $1 / 2$ となり、位相変調器 4 3 4 の出力光は位相 $\pi / 2$ 、強度 $1 / 2$ となる。これらの光を合波すると、出力側の Y 分岐 4 3 5 の出力光は、位相 $\pi / 4$ 、強度 $1 / 2$ となる。パルス時間帯 t_2 、 t_3 、 t_5 、 t_7 においても、パルス時間帯 t_1 と同じ変調を施している為、位相 $\pi / 4$ 、強度 $1 / 2$ の出力光が得られる。

【 0 0 9 0 】

次に、パルス時間帯 t_4 では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が $+V$ [V]、 $RF_C = +V / 2$ [V] であるから、位相変調器 4 3 2 の出力光は位相 π 、強度 $1 / 2$ となり、位相変調器 4 3 4 の出力光は位相 $3\pi / 2$ 、強度 $1 / 2$ となる。したがって、これらの光を合波すると、出力側の Y 分岐 4 3 5 の出力光は位相 $5\pi / 4$ 、強度 $1 / 2$ となる。

【 0 0 9 1 】

パルス時間帯 t_6 では、 RF_A が 0 [V]、 RF_B が $+V$ [V]、 $RF_C = +V / 2$ [V] であるから、位相変調器 4 3 2 の出力光は位相 0、強度 $1 / 2$ となり、位相変調器 4 3 4 の出力光は位相 $3\pi / 2$ 、強度 $1 / 2$ となる。これらの光を合波すると、出力側の Y 分岐 4 3 5 の出力光は位相 $7\pi / 4$ 、強度 $1 / 2$ となる。

【 0 0 9 2 】

パルス時間帯 t_8 では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が 0 [V]、 $RF_C = +V / 2$ [V] であるから、位相変調器 4 3 2 の出力光は位相 π 、強度 $1 / 2$ となり、位相変調器 4 3 4 の出力光は位相 $\pi / 2$ 、強度 $1 / 2$ となる。これらの光を合波すると、出力側の Y 分岐 4 3 5 の出力光は位相 $3\pi / 4$ 、強度 $1 / 2$ となる。

【 0 0 9 3 】

パルス時間帯 t_9 および t_{12} では、 RF_A が $+V$ [V]、 RF_B が 0 [V]、 $RF_C = 0$ [V] であるから、位相変調器 4 3 2 の出力光は位相 π 、強度 $1 / 2$ となり、位相変調器 4 3 4 の出力光は位相 0、強度 $1 / 2$ となる。これらの光を合波すると、出力側の Y 分岐 4 3 5 の出力光は強度 0 となる。

【 0 0 9 4 】

最後に、パルス時間帯 t_{10} および t_{11} では、 RF_A が 0 [V]、 RF_B が 0 [V]、 $RF_C = 0$ [V] であるから、位相変調器 4 3 2 の出力光は位相 0、強度 $1 / 2$ となり、位相変調器 4 3 4 の出力光は位相 0、強度 $1 / 2$ となる。これらの光を合波すると、出力側の Y 分岐 4 3 5 の出力光は位相 0、強度 1 となる。

【 0 0 9 5 】

以上より、パルス時間帯 t_1 および t_2 からなる時間帯 T 1 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相も同じであるから、X 基底の “ 0 ” に対応する。パルス時間帯 t_3 および t_4 からなる時間帯 T 2 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相が 180° (π) 異なるので、X 基底の “ 1 ” に対応する。

【 0 0 9 6 】

パルス時間帯 t_5 および t_6 からなる時間帯 T 3 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相が 270° ($3\pi / 2$) 異なるので、Y 基底の “ 1 ” に対応する。パルス時間帯 t_7 および t_8 からなる時間帯 T 4 は 2 連パルスの光強度が同じで出力光位相が 90° ($\pi / 2$) 異なるので、Y 基底の “ 0 ” に対応する。

【 0 0 9 7 】

パルス時間帯 t_9 および t_{10} からなる時間帯 T 5 とパルス時間帯 t_{11} および t_{12} からなる時間帯 T 6 とは、2 連パルスの片方のパルスが消光され、かつ、他方の光パルス強度が X、Y 基底選択時の 2 倍であるから、各々 Z 基底の “ 0 ” および “ 1 ” に対応する。したがって、図 4 における強度 3 値 (0, $1 / 2$, 1) および位相 4 値 ($a = \pi / 4$, $b = 5\pi / 4$, $c = 7\pi / 4$, $d = 3\pi / 4$) の変調が実現される。

10

20

30

40

50

【0098】

このように、 RF_A 、 RF_B および RF_C の3ポートの駆動信号によって、X、Y、Z基底の“0”と“1”とを生成することができる。したがって、X、Y、Zの3基底の中から任意の2基底を選択することによってBB84プロトコルを実装することができる。即ち、T1、T2、T3、T4の時間帯の変調をランダムに繰り返すと、方式Aの受信器に対応する4値位相コーディングを実現できる。この場合は、 RF_C には高速信号を施す必要が無く、 $+V/2$ [V]のバイアスをかけ続けるだけで良い。

【0099】

また、T1、T2、T5、T6の時間帯の変調をランダムに繰り返し、2入力4出力PLC AMZ213のマッハ・ツェンダ干渉計の両経路の位相差を0若しくは π に設定すると、方式Bの受信器に対応する2値位相+2値時間コーディングを実現できる。

10

【0100】

さらに、T3、T4、T5、T6の時間帯の変調をランダムに繰り返し、2入力4出力PLC AMZ213のマッハ・ツェンダ干渉計の両経路の位相差を $\pi/2$ 若しくは $3\pi/2$ に設定しても、方式Bの受信器に対応する2値位相+2値時間コーディングを実現できる。本実施例で用意できる出力光状態をIQ平面にプロットすると図14のようになる。

【0101】

3.3) 効果

本発明の第3実施例においても第1実施例と同等の効果を得ることが出来る。すなわち、第2実施例によっても量子暗号方式AおよびBの受信器両方に適用可能な送信器を構成できる。また、方式Bを利用する際に問題となった光源の波長偏差によって生じうる安全性低下を防ぐことができる。さらに、本実施例による光送信器は汎用性の高く、かつ省スペース化および省電力化を促進できるという利点もある。

20

【0102】

第3実施例では、光パルスの時間分離および合波を行う手段としてPLCマッハ・ツェンダ干渉計を使用したが、本発明はこの実施例に限定されない。Michelson型等の他の干渉計形態でも同様の送信器を構成することができる。

【0103】

なお、位相変調器433の出力光は等しい強度で位相が0と π との間で振れば良い為、次に示す変形例のように位相変調器433をマッハ・ツェンダ強度変調器で置き換えることもできる。

30

【0104】

3.4) 変形例

図15は本発明の第3実施例の変形例による光送信器の概略的構成を示すブロック図である。この変形例は、図12に示す第3実施例とは複合変調器の第2位相変調器が異なるだけで、その他の回路構成は同じである。したがって、図12と同じ回路要素には同じ参照番号を付して説明は省略する。

【0105】

複合変調器402はマッハ・ツェンダ干渉計のメイン構成を有し、入力段のY分岐431と、マッハ・ツェンダの一方のアーム上の位相変調器432と、他方のアーム上のマッハ・ツェンダ強度変調器436および位相変調器434と、出力段のY分岐435とを有する。複合変調器301により変調された2連パルスは光減衰器104へ出力される。複合変調器401の位相変調器432、マッハ・ツェンダ強度変調器436および位相変調器434は、それぞれ駆動信号 RF_A 、 RF_B および RF_C によって駆動される。

40

【0106】

マッハ・ツェンダ強度変調器436は、図12の位相変調器433と同様に出力光の強度が等しく位相が0と π との間で振れば良いので、駆動信号 RF_B を $-V/2 \sim +V/2$ で振ることにより同等の変調を行うことができる。

【0107】

4. 本発明の諸側面

50

本発明による光送信器は、光パルスを生成する光源と、光パルスから時間的に分離した2連パルスを生成する2連パルス生成手段と、複合光変調器とを有する。複合光変調器は、2連パルスを第1経路および第2経路へ分岐させる分岐手段と、第1経路に設けられた第1光変調手段と、第2経路に直列に設けられた第2光変調手段および第3光変調手段と、第1経路を通過した2連パルスと第2経路を通過した2連パルスとを合波して出力2連パルスを生成する合波手段と、を有する。第1光変調手段および第2光変調手段はそれぞれ通過する2連パルスの間で相対的な強度変調あるいは相対的な位相変調のいずれかを実行し、第3光変調手段は通過する2連パルスの間で相対的な位相変調を実行する。これによって、たとえばX、Y、Z基底の量子状態を3つの変調器で実現することができる。

【0108】

10

本発明の第1実施例によれば、第3光変調手段の変調位相を0°と90°との間で切り替え、第1光変調手段および第2光変調手段の各々は、所定の変調曲線を有するマッハ・ツェンダ光強度変調器である。特に、第1光変調手段を変調曲線の極小点と第1動作点との間で切り替え、第2光変調手段を変調曲線の極小点と第2動作点との間で切り替え、第1動作点と第2動作点とは変調曲線において極小点を挟んで対称に位置する。

【0109】

本発明の第2実施例によれば、第3光変調手段の変調位相を0°と90°との間で切り替え、第1光変調手段は所定の変調曲線を有するマッハ・ツェンダ光強度変調器であり、第2光変調手段は光位相変調器である。特に、第1光変調手段を変調曲線の極小点と極大点との間で切り替え、第2光変調手段の変調位相を0°と180°との間で切り替える。

20

【0110】

本発明の第3実施例によれば、第3光変調手段の変調位相を0°と90°との間で切り替え、第1光変調手段および前記第2光変調手段の各々は、変調位相を0°と180°との間で切り替える光位相変調器である。

【0111】

本発明によれば、図1(b)に示す方式Bを利用する際に、4つの光源の波長偏差によって生じる安全性低下を防ぐことができる。これは、図4に示す様に、1つの光源からの光パルスを利用して、たとえばX、Y、Z基底の量子状態を生成するので光源の個体差に伴う波長偏差が生じないからである。

【0112】

30

さらに、汎用性の高い送信器を構成する際に、省スペース、省電力が実現できる。これは、図1(a)に示す方式Aの送信器の構成を用いて図1(b)に示す方式Bと同じX、Y、Z基底の量子状態を生成しようとした場合に比較して、必要な変調器を1つ省略できるからである。

【0113】

なお、上述した実施例では、量子暗号鍵配付技術に用いられるBB84プロトコルを例示したが、これに限定されるものではない。たとえば6-stateプロトコルにも利用可能である。

【産業上の利用可能性】

【0114】

40

本発明は光パルス間で位相変調を行う方式の光変調器一般に適用可能であり、たとえば単一光子レベルの光信号を利用した量子暗号鍵配付技術における送信器に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0115】

【図1】(a)は非特許文献4に開示された単一方向型QKDシステムを概略的に示すブロック図であり、(b)は非特許文献5に開示された単一方向型QKDシステムを概略的に示すブロック図である。

【図2】(a)はX、Y、Z基底を用意する為に必要な変調をまとめて示す概念図であり、(b)はその信号点配置図である。

【図3】(a)は非特許文献7に記載されたASK-QPSK送信器の構成を示すブロッ

50

ク図およびその信号点配置図であり、(b)はその変調方法を利用して4値の位相変調および3値の強度変調を実現したASK-QPSK送信器の構成を示すブロック図およびその信号点配置図である。

【図4】本発明の一適用例である光送信器の概略的な構成を示すブロック図である。

【図5】(a)は本発明の第1実施例による光送信器の概略的構成を示すブロック図であり、(b)はその信号点配置図である。

【図6】本発明の第1実施例で使用する複合変調器の各位置での光強度を表す図である。

【図7】本発明の第1実施例で使用されるXカットLN強度変調器の変調曲線を概念的に示すグラフである。

【図8】本発明の第1実施例で使用する複合変調器の駆動方法を説明するための駆動電圧と出力光強度/位相との関係を示す模式図である。

10

【図9】(a)は本発明の第2実施例による光送信器の概略的構成を示すブロック図であり、(b)はその信号点配置図である。

【図10】本発明の第2実施例で使用する複合変調器の駆動方法を説明するための駆動電圧と出力光強度/位相との関係を示す模式図である。

【図11】(a)は本発明の第3実施例による光送信器の概略的構成を示すブロック図であり、(b)はその信号点配置図である。

【図12】本発明の第3実施例で使用する複合変調器の駆動方法を説明するための駆動電圧と出力光強度/位相との関係を示す模式図である。

【図13】本発明の第3実施例の変形例による光送信器の概略的構成を示すブロック図である。

20

【符号の説明】

【0116】

101 光源

102 2連パルス生成部(2入力2出力PLC AMZ)

103、201、301、401、402 複合変調器

104 光減衰器

131 分岐部

132 第1光変調器

133 第2光変調器

30

134 第3光変調器

135 合波部

231、331、431 入力側Y分岐

232 マッハ・ツェンダ強度変調器

233 マッハ・ツェンダ強度変調器

234 位相変調器

332 マッハ・ツェンダ強度変調器

333 位相変調器

334 位相変調器

432 位相変調器

40

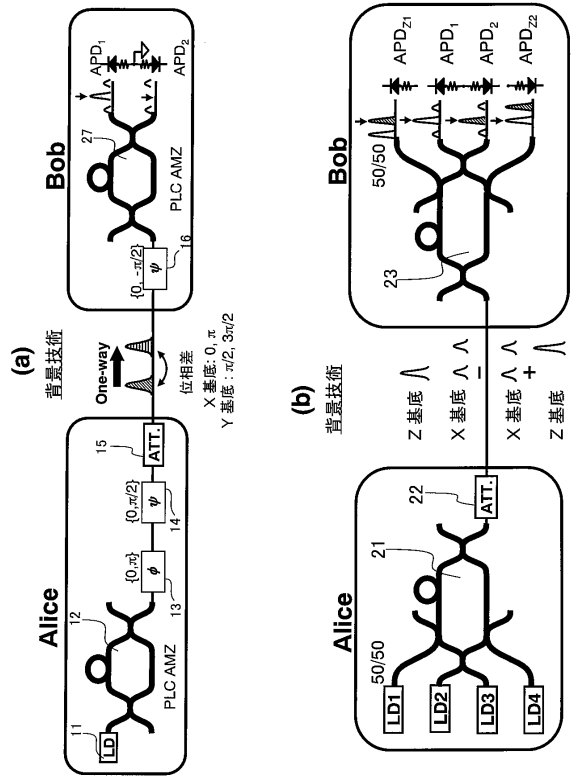
433 位相変調器

434 位相変調器

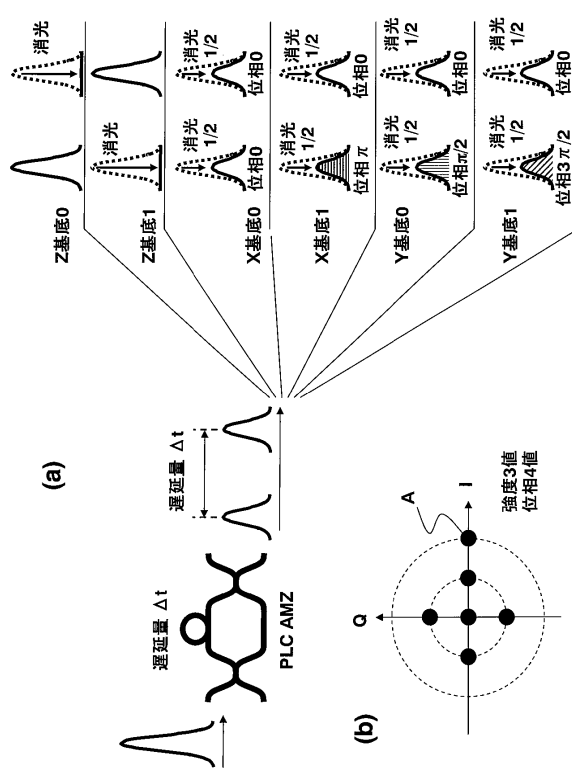
436 マッハ・ツェンダ強度変調器

235、335、435 出力側Y分岐

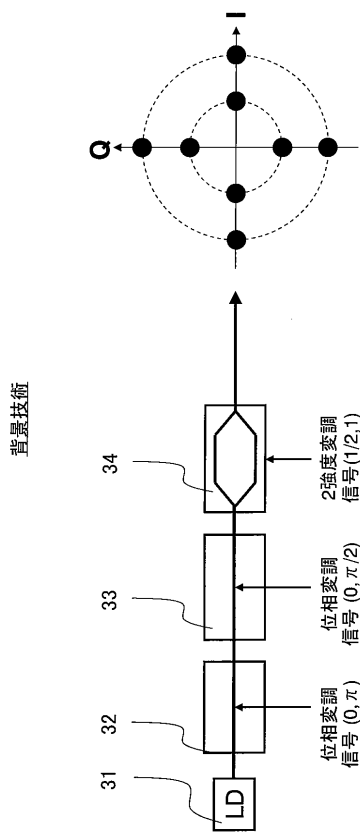
【 図 1 】



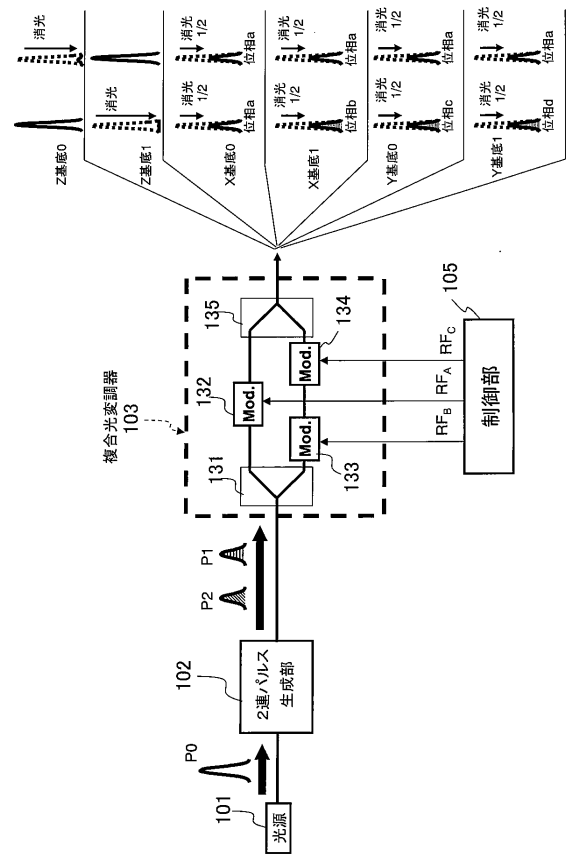
【 図 2 】



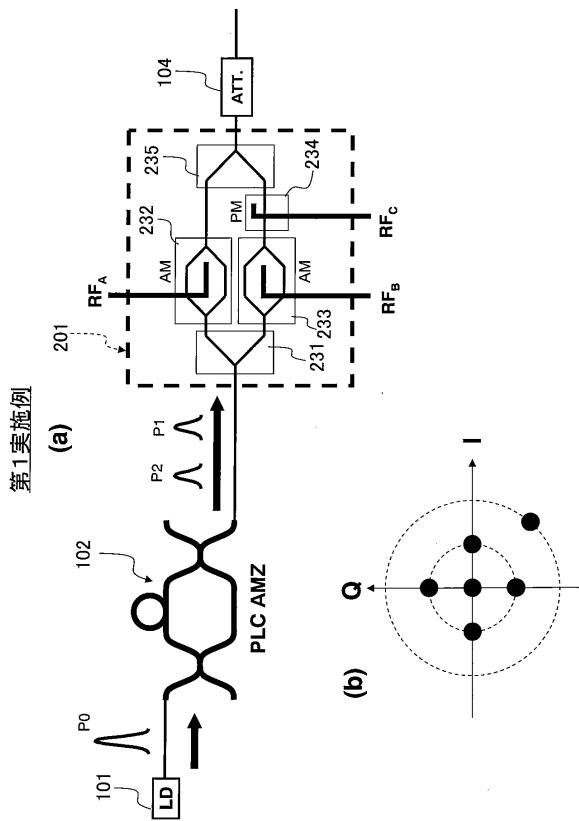
【 図 3 】



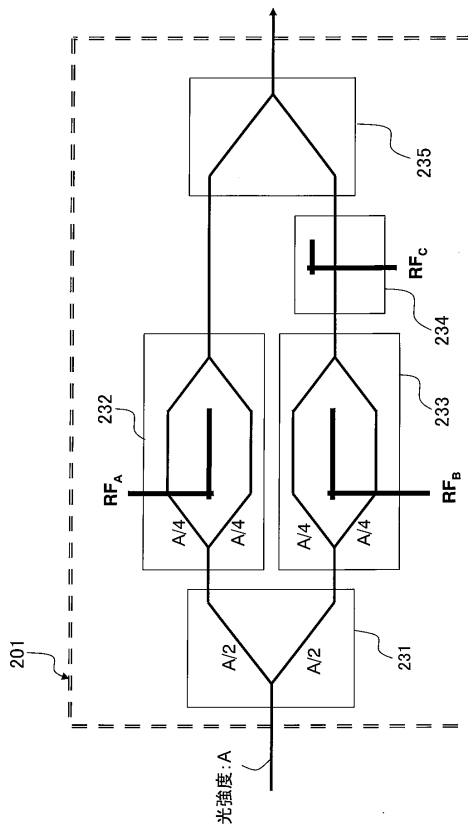
【 図 4 】



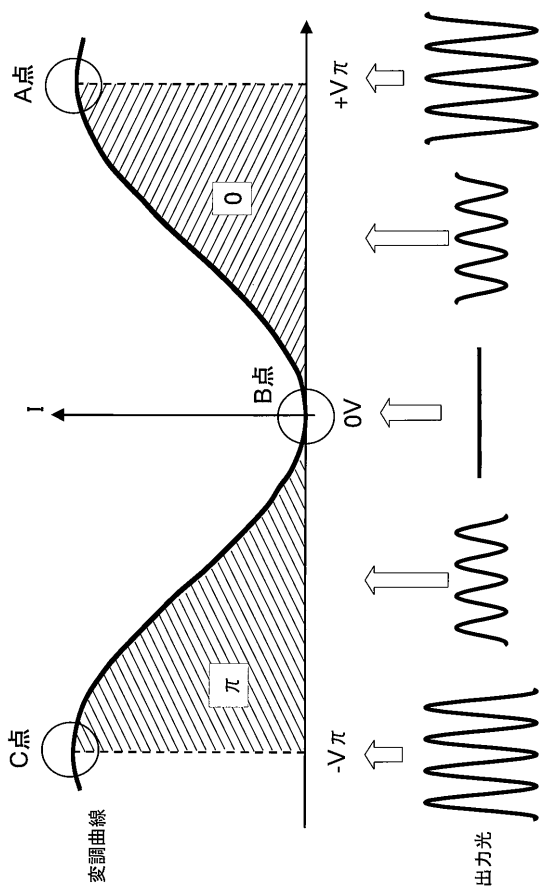
【 図 5 】



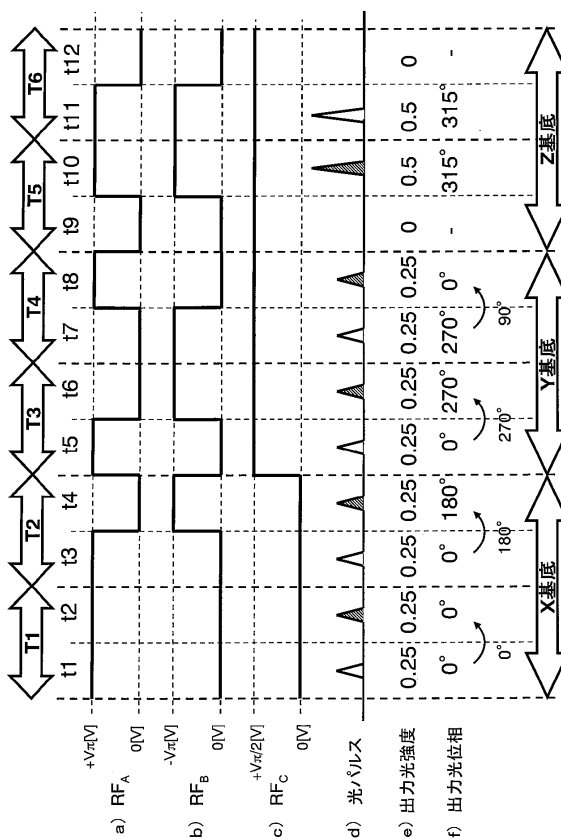
【 図 6 】



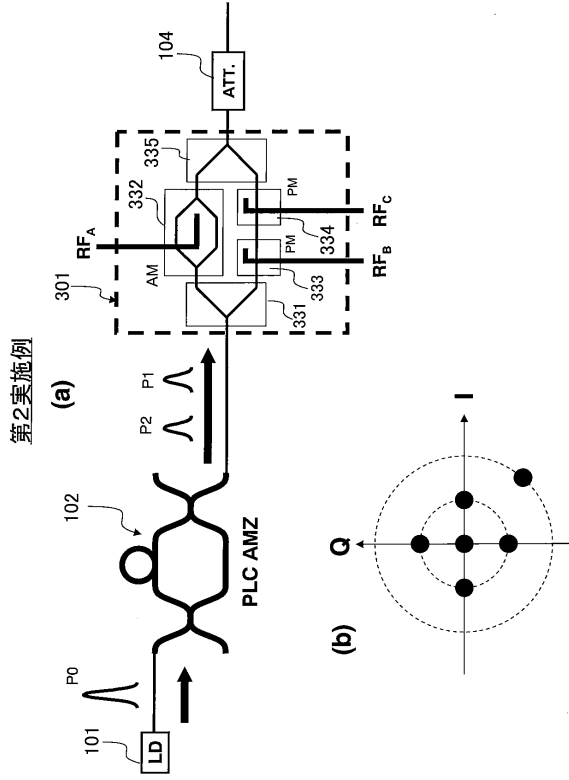
【 図 7 】



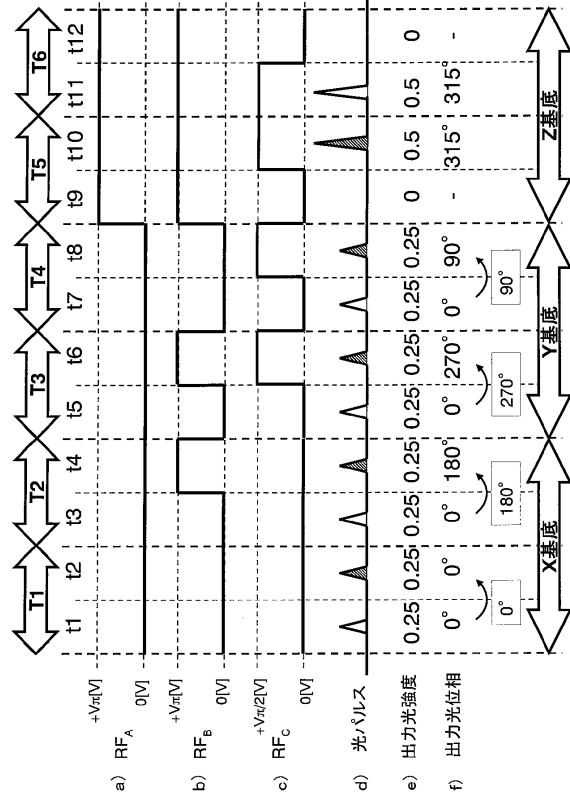
【 図 8 】



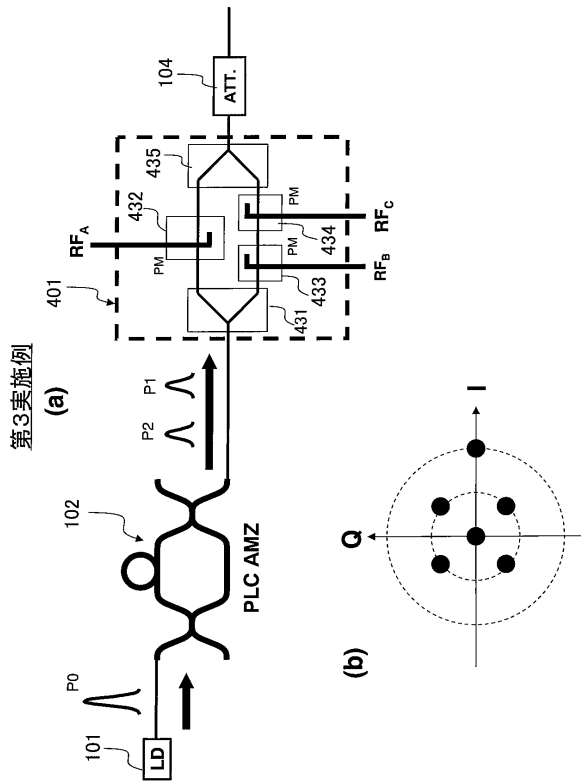
【図9】



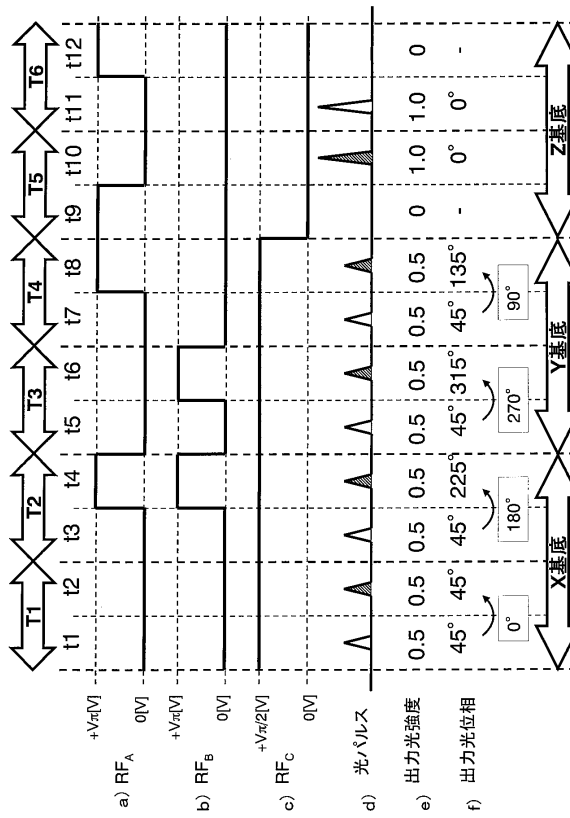
【図10】



【図11】

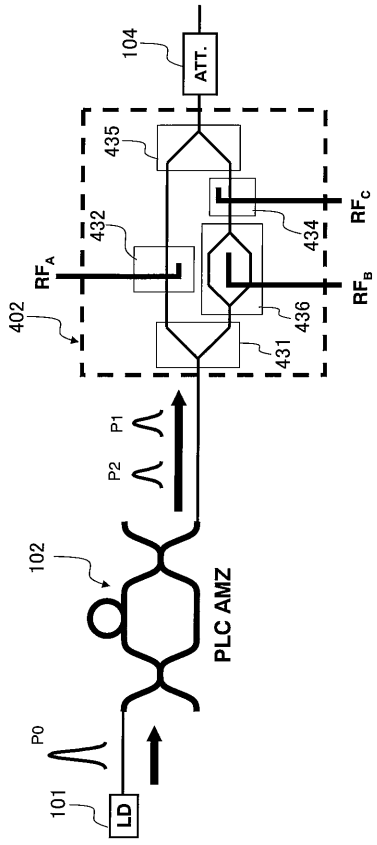


【図12】



【 図 1 3 】

変形例



フロントページの続き

(72)発明者 前田 和佳子
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

審査官 角田 慎治

(56)参考文献 国際公開第2009/011255(WO, A1)
国際公開第2008/023480(WO, A1)
特開2008-270873(JP, A)
特開2008-52066(JP, A)
特開2005-12631(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04B 10/00 - 10/28
H04J 14/00 - 14/08
H04L 9/12
G02F 1/03