

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7664267号
(P7664267)

(45)発行日 令和7年4月17日(2025.4.17)

(24)登録日 令和7年4月9日(2025.4.9)

(51)国際特許分類

F I

G 0 6 F 7/58 (2006.01) G 0 6 F 7/58 6 8 0

請求項の数 33 (全14頁)

(21)出願番号	特願2022-543628(P2022-543628)	(73)特許権者	522074936
(86)(22)出願日	令和3年1月29日(2021.1.29)		スマート フォトニクス ホールディング
(65)公表番号	特表2023-512932(P2023-512932		ス ピー . ブイ .
	A)		オランダ国 , アイントホーフェン 5 6
(43)公表日	令和5年3月30日(2023.3.30)		5 6 エーイー , ハイ テク キャンパス
(86)国際出願番号	PCT/EP2021/052192		2 9
(87)国際公開番号	WO2021/152139	(74)代理人	100079108
(87)国際公開日	令和3年8月5日(2021.8.5)		弁理士 稲葉 良幸
審査請求日	令和6年1月9日(2024.1.9)	(74)代理人	100109346
(31)優先権主張番号	2001402.3		弁理士 大貫 敏史
(32)優先日	令和2年1月31日(2020.1.31)	(74)代理人	100117189
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)		弁理士 江口 昭彦
		(74)代理人	100134120
			弁理士 内藤 和彦
		(72)発明者	クライン , スティーブン エヴァラード
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 フォトニック集積回路及び方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

i) 基板上の光源と、
i i) 前記光源からの光を第 1 の部分の光と第 2 の部分の光とに分割するように構成された光スプリッタと、
i i i) 前記基板上の光検出器であって、前記第 1 の部分の光の受け取りに応じて、乱数を発生させるときに用いる電気信号を出力するように構成された、前記光検出器と、
i v) 前記基板上の光ガイドシステムであって、前記第 1 の部分の光を前記光検出器へ方向付けるように構成された、前記光ガイドシステムと、
を含む、
乱数を発生させるときに用いるフォトニック集積回路。

【請求項 2】

前記基板は、
I I I - V 族半導体化合物、またはインジウムリン、I n P のうちの少なくとも 1 つである、
請求項 1 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 3】

v) 前記基板上の光減衰システムであって、
前記光源と前記光検出器との間で、前記光源からの光の強度を減衰させて前記光検出器が検出する光の前記強度の変動がポアソン統計に支配されるようにするように構成された

、前記光減衰システム、
を含む、
請求項 1 または 2 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 4】

前記光減衰システムは、前記光源と前記光検出器との間で、前記光源からの光の前記強度を少なくとも 1 0 0 0 分の 1 に減衰させるように構成されている、
請求項 3 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 5】

前記光スプリッタはマルチモード干渉計 (MMI) を含む、
請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載のフォトニック集積回路。

10

【請求項 6】

前記光検出器は第 1 の光検出器であり、前記フォトニック集積回路は第 2 の部分の光を第 2 の光検出器に送るように構成されている、
請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 7】

第 1 の回路であって、
前記第 2 の光検出器が出力する電気信号を受け取ることと、
前記第 2 の光検出器が出力する前記電気信号の大きさを決定することであって、前記大きさは、前記光源が出力する光の実際の強度を示す、前記決定することと、
前記光源が出力する光の前記実際の強度が、前記光源が出力すべき光の目標強度とは異なると判定することと、

20

前記光源に印加する電流を調整して、前記光源が出力する光の前記強度を調整し、前記実際の強度と前記目標強度との間の差を小さくすること、または前記実際の強度と前記目標強度との間の差に基づいて、前記乱数を発生させるためのプロセスを較正することのうちの少なくとも一方と、

を行うように構成された、前記第 1 の回路
を含む、
請求項 6 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 8】

第 2 の回路であって、
a) i i i) の前記光検出器が出力する前記電気信号を受け取ることと、
b) a) で受け取った前記電気信号の特性に基づいて、前記乱数を発生させるときに用いる値を決定することと、
を行うように構成された、前記第 2 の回路

30

を含む、
請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 9】

第 2 の回路であって、
a) i i) の前記光検出器が出力する前記電気信号を受け取ることと、
b) ある時点で a) で受け取った前記電気信号の特性を測定することと、
c) b) で測定した前記特性に基づいて、b) で測定した前記特性の大きさが閾値よりも小さいと判定することと、
d) c) に基づいて、前記乱数を発生させるときに用いる値を決定することと、
を行うように構成された、前記第 2 の回路
を含む、請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載のフォトニック集積回路。

40

【請求項 10】

前記乱数を発生させるときに用いる前記値は 2 進値である、
請求項 9 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 11】

前記時点は第 1 の時点であり、前記乱数を発生させるときに用いる前記値は第 1 の値で

50

あり、前記第 2 の回路は、

f) 第 2 の時点で a) で受け取った前記電気信号の前記特性を測定することと、

g) f) で測定した前記特性に基づいて、f) で測定した前記特性の大きさが前記閾値よりも大きいと判定することと、

h) g) に基づいて、前記乱数を発生させるときに用いる、前記第 1 の値とは異なる第 2 の値を決定することと、

を行うように構成されている、

請求項 9 または 10 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 12】

前記第 2 の値は 2 進値である、

10

請求項 11 に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 13】

前記特性は電流である、

請求項 8 ~ 12 のいずれか一項に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 14】

前記閾値は前記電気信号の前記特性の平均の大きさである、

請求項 9 ~ 12 のいずれか一項に記載のフォトニック集積回路。

【請求項 15】

基板上の光源から光を出力することと、

前記光源からの光を前記基板上の第 1 の光検出器に伝搬するための第 1 の部分の光と、第 2 の光検出器が受け取るための第 2 の部分の光とに分割することと、

20

前記基板上の光ガイダンスシステムによって、前記第 1 の部分の光を前記基板上の前記第 1 の光検出器にガイドすることと、

前記第 1 の光検出器によって、乱数を発生させるときに用いる電気信号を出力することと、

を含む、

乱数を発生させる方法。

【請求項 16】

前記基板は、

III-V 族化合物、またはインジウムリン、InP のうちの少なくとも 1 つである、

30

請求項 15 に記載の方法。

【請求項 17】

前記基板上の光減衰システムによって、

前記光源と前記第 1 の光検出器との間で、前記光源からの光の強度を減衰させて前記第 1 の光検出器が検出した光の前記強度の変動がポアソン統計に支配されるようにすることを含む、

請求項 15 または 16 に記載の方法。

【請求項 18】

前記光減衰システムは、前記光源と前記第 1 の光検出器との間で、前記光源からの光の前記強度を少なくとも 1000 分の 1 に減衰させるように構成されている、

40

請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

前記光源からの光を前記第 1 の部分の光と前記第 2 の部分の光とに分割する光スプリッタはマルチモード干渉計(MMI)である、

請求項 15 ~ 18 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 20】

前記第 2 の光検出器が出力する電気信号の大きさを決定することであって、前記大きさは、前記光源が出力する光の実際の強度を示す、前記決定することと、

前記光源が出力する光の前記実際の強度が、前記光源が出力すべき光の目標強度とは異なると判定することと、

50

前記光源に印加する電流を調整して、前記光源が出力する光の前記強度を調整し、前記実際の強度と前記目標強度との間の差を小さくすること、または前記実際の強度と前記目標強度との間の差に基づいて、前記乱数を発生させるためのプロセスを較正することのうちの少なくとも一方と、
を含む、

請求項 15 ~ 19 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 21】

a) i i) の前記光検出器が出力する前記電気信号の特性に基づいて、前記乱数を発生させるときに用いる値を決定することを含む、

請求項 15 ~ 20 のいずれか一項に記載の方法。

10

【請求項 22】

a) ある時点で a) で受け取った前記電気信号の特性を測定することと、
b) b) で測定した前記特性に基づいて、a) で測定した前記特性の大きさが閾値よりも小さいと判定することと、
c) b) に基づいて、前記乱数を発生させるときに用いる値を決定することと、
を含む、

請求項 15 ~ 20 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 23】

前記乱数を発生させるときに用いる前記値は 2 進値である、

請求項 22 に記載の方法。

20

【請求項 24】

前記時点は第 1 の時点であり、前記乱数を発生させるときに用いる前記値は第 1 の値であり、前記方法は、

f) 第 2 の時点で a) で受け取った前記電気信号の前記特性を測定することと、
g) f) で測定した前記特性に基づいて、f) で測定した前記特性の大きさが前記閾値よりも大きいと判定することと、
h) g) に基づいて、前記乱数を発生させるときに用いる、前記第 1 の値とは異なる第 2 の値を決定することと、
を含む、

請求項 22 または 23 に記載の方法。

30

【請求項 25】

前記第 2 の値は 2 進値である、

請求項 24 に記載の方法。

【請求項 26】

前記特性は電流である、

請求項 21 ~ 25 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 27】

前記閾値は前記電気信号の前記特性の平均の大きさである、

請求項 22 ~ 25 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 28】

40

基板を用意することと、
前記基板上に光源を形成することと、
前記光源からの光を第 1 の部分の光と第 2 の部分の光とに分割するように構成された光スプリッタを形成することと、

前記基板上に光検出器を形成することであって、前記光検出器は、前記第 1 の部分の光の受け取りに応じて乱数を発生させるときに用いる電気信号を出力するように構成されている、前記形成することと、

前記基板上に、前記第 1 の部分の光を前記光検出器へ方向付けるように構成された光ガイドシステムを形成することと、
を含む、

50

乱数を発生させるときに用いるフォトリック集積回路を製造する方法。

【請求項 29】

前記基板上に、光減衰システムであって、前記光源と前記光検出器との間で、前記光源からの光の強度を減衰させて前記光検出器が検出する光の前記強度の変動がポアソン統計に支配されるようにするように構成された、前記光減衰システムを形成することを含む、請求項 28 に記載の方法。

【請求項 30】

前記光検出器は第 1 の光検出器であり、前記方法は複数の第 2 の光検出器を形成することを含み、前記光減衰システムは一連の光スプリッタを含み、一連の前記光スプリッタはそれぞれ、前記光源からの光を、

10

前記光ガイダンスシステムによって前記第 1 の光検出器に伝搬するための第 1 の部分の光と、

前記複数の第 2 の光検出器のうちの第 2 の光検出器に伝搬するための第 2 の部分の光であって、

前記光源に印加する電流を調整して、前記光源が出力する光の前記強度を調整し、前記光源が出力する実際の強度と前記光源が出力すべき目標強度との間の差を小さくすること、または

前記実際の強度と前記目標強度との間の差に基づいて、前記乱数を発生させるためのプロセスを較正すること、

のうちの少なくとも 1 つを行うときに用いる、前記第 2 の部分の光と

20

に分割するようにそれぞれ構成されている、

請求項 29 に記載の方法。

【請求項 31】

各々の前記光スプリッタはマルチモード干渉計 (MMI) を含む、

請求項 28 から 30 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 32】

前記光検出器は第 1 の光検出器であり、前記フォトリック集積回路は第 2 の部分の光を第 2 の光検出器に送るように構成されている、

請求項 28 に記載の方法。

【請求項 33】

30

前記第 2 の光検出器が出力する電気信号を受け取ることと、

前記第 2 の光検出器が出力する前記電気信号の大きさを決定することであって、前記大きさは、前記光源が出力する光の実際の強度を示す、前記決定することと、

前記光源が出力する光の前記実際の強度が、前記光源が出力すべき光の目標強度とは異なると判定することと、

前記光源に印加する電流を調整して、前記光源が出力する光の前記強度を調整し、前記実際の強度と前記目標強度との間の差を小さくすること、または前記実際の強度と前記目標強度との間の差に基づいて、前記乱数を発生させるためのプロセスを較正することのうちの少なくとも一方と、

を行うように構成された、第 1 の回路を含む、

40

請求項 32 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

量子力学的効果によって生じる光子の本来的にランダムな挙動に基づいた乱数発生器が知られている。たとえば、真の乱数を発生させるために単一光子の挙動を決定して用いることができる。

【0002】

光子検出に基づいた乱数発生器の改善を行うことが望ましい。

【図面の簡単な説明】

50

【 0 0 0 3 】

【図 1】例に基づいて乱数を発生させるためのシステムを概略的に示す図である。

【図 2】a 及び b は、例による光検出器の電流読み出しに関するプロットを示す図である。

【図 3】例（たとえば、図 1 の例）のフォトニック集積回路（PIC）の概略的な断面図である。

【図 4】例に基づいて乱数を発生させる方法を例示するフロー図である。

【図 5】例の製造方法を例示する図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 0 4 】

本明細書で説明する例は、量子力学的効果による光子の挙動に基づいて乱数を発生させるときに用いるフォトニック集積回路（PIC）に関する。詳細には、乱数を発生させるための光学部品が単一基板上に（言い換えれば、共通基板上に）形成された状態で、PIC はモノリシック PIC であると考えることができる。基板は、たとえば、周期表の III 族及び V 族からの元素の化合物、たとえば、いわゆる III - V 族半導体化合物、たとえば、インジウムリン（InP）である。このような PIC は、光入力も出力もない状態で完全に収容することができ、コンピュータ及びスマートフォンなどのデバイス内で集積化できるほど十分にコンパクトである。実際には、このような PIC は既知の乱数発生器よりも、コンパクトであり、構成及び動作が単純である。たとえば、PIC は、100 ミクロン × 1000 ~ 4000 ミクロン × 4000 ミクロン以下である。

【 0 0 0 5 】

図 1 に、乱数を発生させるためのシステム例を概略的に例示する。このシステムは、少なくとも部分的には、たとえば、III - V 族半導体化合物（たとえば、InP）である共通基板上に PIC として実装される。図 4 に、乱数を発生させるための方法のフロー図を例示する。

【 0 0 0 6 】

乱数を発生させるときに用いる PIC は、基板（後に図 3 を用いて例示する）上の光源 2、基板上の光検出器 4、及び基板上の光ガイダンスシステム 6 を含む。光ガイダンスシステムは、光源からの光を光検出器に方向付けるように構成されている。光ガイダンスシステムの導波路 8（概略的に矢印として例示する）は、光源からの光を光検出器 4 にガイドする。光源からの光が、光検出器 4 に入射すると、言い換えれば光検出器 4 により受け取られると、光検出器は、乱数を発生させるときに用いる電気信号を出力する。これについて、後でより詳細に説明する。光源は、たとえば、半導体光増幅器（SOA）またはレーザである。光検出器（light detector）、言い換えれば光検出器（photodetector）は、たとえば、低光強度を検出することができるフォトダイオードである。このような光子検出器は、「単一光子検出器」と言われる既知の例のものよりも単純である。単一光子検出器では、より複雑または設計限界の検出器、たとえば、シリコン光電子増倍管（SiPM）アバランシェフォトダイオードを用いている。さらに、例におけるフォトダイオードは、サンプリングレートが少なくともギガヘルツ（GHz）周波数のモノリシック集積フォトダイオードである。これは、既知のシステムにおける光検出器よりも速い動作、したがって速い乱数発生を実現する。さらに、このような GHz またはより高いサンプリングレートを伴うこのようなフォトダイオードであれば、既知の光検出器よりも大きい大きさの光電流を検出することができる。その結果、バックグラウンド電子ノイズがさらに克服されて、量子効果に関連する変動がさらにいっそう支配する。

【 0 0 0 7 】

図 1 ~ 3 の例などの例において、共通基板上に光減衰システムがある。減衰システムは、光源からの光出力の強度を、乱数を発生させるときに用いる光検出器 4 が用いる強度まで減衰させるように構成されている。したがって、光源と光検出器 4 との間で、減衰システムは光の強度を減少させる。図 1 ~ 3 の例などの例において、減衰システムは、共通基板上に 1 つ以上の光スプリッタ 10（たとえば、受動光スプリッタ）を含む。図 1 では、

10

20

30

40

50

このような光スプリッタを2つ示しているが、これは概略である。第1の光スプリッタ10aは、光源からの光を、光スプリッタの他のもの（たとえば、第2の光スプリッタ10b）が光源からの光を（第1の光スプリッタを介して）受け取る前に、受け取る。図1は概略であり、第1及び第2の光スプリッタを示しているが、いくつかの他の例では、このような光スプリッタが1つしかない場合があり、他の例では、必要に応じて、光スプリッタが2つを超えて存在する場合があり、光強度を、乱数を発生させるときに用いるべき光検出器4（及び全体的なシステムセットアップ）に適したレベルまで減少させる。

【0008】

好適なレベルは、光検出器4が検出する光強度のどんな変動も量子効果に支配され、したがってポアソン統計に従うほど、十分に低い。他の場合には、強度がもっと高い場合、したがってサンプルあたりもっと大きい数の光子が光検出器によって検出される場合には、量子効果によって生じる任意の変動は隠れて、そのため、サンプルあたり検出される光子の総数と比べて無視できるほどであるため、十分に検出することはできず、乱数発生に使用することはできない。当業者は、ポアソン統計、したがってポアソン確率分布について良く知っている。ポアソン確率分布は、所与の時間の間に生じる複数の事象の確率を記述する。事象は、既知の一定の平均レートで生じ、最後の事象からの時間に依存しない。乱数の発生におけるポアソン分布の適用について、以下でさらに説明する。

【0009】

通常、ポアソン分布の標準偏差（または固有の変動）は、平均サンプルサイズの平方根である。したがって、平均サンプルサイズに対する変動は、サンプルあたりの光子数が増えたと減少する。他方では、光子数が低い場合（特に、単一光子カウンティング）では、最適化されたフォトダイオード及びエレクトロニクスが必要である。InPのPICでは、フォトダイオードの高いサンプルレート及び低い電子バックグラウンドノイズを特徴とする。したがって、サンプルあたり1000光子の光子数では、固有の量子ゆらぎは依然として、電子バックグラウンド電流をはるかに上回っている（少なくとも約10倍）。高いサンプルレートでは、このようなサンプルあたり1000光子は依然として、従来の読み出しエレクトロニクスを用いて測定可能なかなりのフォトダイオード電流を発生させる。

【0010】

光減衰システムの光源、光検出器、及び光スプリッタは、必要に応じて、光ガイダンスシステム（たとえば、導波路8）によって互いに光学的に接続されている。したがって、第1の光スプリッタの入力は、光源からの光を（いくつかの例では、直接）受け取るように、導波路によって光学的に接続され、第1の光スプリッタの出力は、以後の光スプリッタの入力または光検出器のいずれかに、導波路によって光学的に接続されている。各スプリッタは、入力からの光の一部をスプリッタの出力へガイドする、または向け直すと考えてもよいが、スプリッタの機能は光源から伝搬する光の強度を減少させることであるため、本明細書ではスプリッタを光減衰システムの一部として説明する。

【0011】

いくつかの例における光減衰システムは、光源と光検出器4との間で、光源からの光の強度を少なくとも1000分の1に減衰させるように構成されている。そのため、たとえば、光検出器4に入射する光の強度は、光源が出力する強度の最大で0.1%である。

【0012】

当業者であれば分かるように、このような減衰は異なる方法で実現することができる。本明細書で説明する例では、光スプリッタを用いる。各光スプリッタは、光源から発生した光を、光ガイダンスシステムによって光検出器4へ伝搬するための第1の部分の光と、光検出器4へはガイドされない第2の部分の光とに分割する。複数の光スプリッタを互いに直列に配列してもよい。1つの光スプリッタからの第1の部分の光出力が前方にガイドされて、直列にある次の光スプリッタに入力され、この光スプリッタは次に、その第1の部分の光を出力して、直列にある任意の以後の光スプリッタへと前方にガイドする。これは、光検出器4に到達するまで続く。

【0013】

10

20

30

40

50

減衰システムの各光スプリッタは、たとえば、光フィルタであり、たとえば、当業者が良く知っているマルチモード干渉計（MMI）である。MMIでは、たとえば、導波路幅を広げて、光をシングルモード伝搬からマルチモード伝搬へと移行させる。光学モードの空間分布はMMI長の関数として変化し、特定のスプリッタ応用例にとって必要な適切な分布を数値計算を用いて計算することができる。1×2スプリッタの場合には、MMIの開始からの長さ（2つのモードが形成されて空間的に十分に分離されている）に2導波路を作製する。

【0014】

各スプリッタの仕様に依じて、各スプリッタはいくつかの例では光強度を50%だけ減少させて（スプリッタに対する光入力第1の部分の光が50%で第2の部分の光が50%強度となる）、他の例では、各スプリッタは光強度を70%だけ減少させる（スプリッタに対する光入力第1の部分の光が30%で第2の部分の光が70%強度となる）。前者の場合、いくつかの例では10のいわゆる50:50スプリッタを直列に用いて、光検出器4に対する強度を減少させる。後者の場合、他の例では6つのいわゆる30:70スプリッタを直列に用いて、光検出器4に対する強度を減少させる。さらなる例では、異なる分割比が考えられる。

【0015】

MMIは、受動光スプリッタの例である。受動光スプリッタは、（能動部品の場合のように）機能するために電圧による駆動を必要とすることがない。光減衰システムにおいて受動光スプリッタを用いることは、より高い電力を光源に使用できることを意味し、その結果、PIC内の他の場所で能動部品を駆動するための回路に対する必要性及び/または回路の電力要求を減らすことができる。さらに、以下でさらに説明するように、このような受動光スプリッタは、光源が出力する光の強度をモニタリングできることを意味し、その結果、乱数を発生させるためのシステムの較正及び調整を助けることができる。

【0016】

これまで説明した光検出器4は、本明細書では第1の光検出器とも言う。加えて、図1の例のようないくつかの例では、1つ以上の第2の光検出器12があり、それぞれ、導波路8によってそれぞれ光学的に接続されて、対応する光スプリッタ10からの第2の部分の光出力を受け取る。第2の光検出器はそれぞれ、第1の光検出器と同じタイプのフォトダイオードであるが、他の例では異なるタイプであってもよい。たとえば、第1の光検出器は、バランスフォトダイオードまたは別のタイプの最適化された高精度フォトダイオードであり、第2の光検出器は同じまたは異なるタイプの光検出器であってもよい。

【0017】

PICは、1つ以上の第2の光検出器のそれぞれから出力される電気信号を処理するための第1の回路を含む。このような第2の光検出器は、たとえば、光源が出力する光の強度をモニタリングするために用いる。第2の光検出器が目標強度からのずれを検出した場合、これは、光検出器へと前方にガイドされた第1の部分の光の強度もずれていることを示し、適切な処置を取ることができる。たとえば、第2の光検出器のうちの1つまたはそれぞれに対して、第1の回路は、対応する第2の光検出器から電気信号を受け取る。電気信号の特性（たとえば電流）を測定して、光源が出力する光の実際の強度を示す特性の大きさを決定する。光源が出力する光の実際の強度が、光源が出力するべき光の目標強度と異なると判定された場合（たとえば、第2の部分の光は、光源が出力する光の強度の50%でなくてはならないということに基づいて）、第1の回路は、乱数を発生させるシステムの能力を維持するために適切な対応を行うことができる。このような応答は、光源に印加する電流を調整して、光源が出力する光の強度を調整することであってもよい。このように、第2の部分の強度が目標強度よりも小さい場合、電流を増加させて、光源が出力する光の強度を増加させ、実際の強度と目標強度との間の差を小さくすることができる。さらに、または代替的に、このような応答は、乱数を発生させるためのプロセス（以下でさらに説明する）を（閾値、または第1の光検出器4が出力する電気信号から測定した特性の大きさ（たとえば電流）のうちの少なくとも1つを調整することによって）較正して、

10

20

30

40

50

光源からの光強度の任意のずれを補償することとすることができる。さもなければ、このようなずれによってシステムが故障して、発生させた任意の推定上の乱数が実際には真ランダムではないことがあり得る。このようなモニタリングは、直列にある第1の光スプリッタから第2の部分の光を受け取る第2の光検出器によって少なくとも行われ、いくつかの例では、直列にある光スプリッタからの第2の部分の光のうちの複数をを用いて、減衰をモニタリングする。たとえば、各光スプリッタからの第2の部分の光を、異なる第2の光検出器にそれぞれ出力して、スプリッタによる各減衰ステップをモニタリングし、そして目標強度からの任意のずれを、光源に印加する電流及び/または第1の光検出器4が出力する電気信号の処理において調整する。

【0018】

次に乱数の発生について説明する。PICは、乱数を発生させるための第1の光検出器4が出力する電気信号を用いるように構成された第2の回路を含む。一般的に、第2の回路は、光検出器4が出力する電気信号を受け取って、電気信号の特性（たとえば電流）に基づいて、乱数を発生させるときに用いる値を決定する。これらの例では、このような値は2進値（他の場合には、ビットとして知られる）であり、1または0の値を伴う。2進値の文字列を電流の一連の測定値に基づいて発生させてもよい（測定値あたり1つの2進値）。測定した電気信号の特性は、ある時間にわたって変化（または変動）する。これは、光源から第1の光検出器4への光子の通過に影響する量子効果によって生じる。これは、光検出器4に入射する光子の数が異なる時点で異なることを意味し、そして、出力電気信号の特性の変動が生じる。このような変動は、量子効果によって決定されるため真ランダムであり、各2進値を決定する基礎として用いることができ、その結果、2進値の真ランダムの文字列を発生させることができる。次にこのような文字列を用いて、真の乱数たとえば10進法の整数を発生させることができる。

【0019】

乱数を発生させるときに、第1の光検出器4が出力する電気信号の特性の変動を用いるために、種々の方法が考えられる。たとえば、変動は量子効果によって決定されるため、測定値はポアソン分布にフィットする。したがって、電気信号の特性の各測定値をポアソン分布またはそこから得られるパラメータに対して比較して、各測定値に対して得られる値（たとえば1または0）を決定して、乱数を発生させることができる。

【0020】

図2aに、光検出器4が出力する電気信号の多くの電流測定値のプロット例を示す。プロットは、測定（図において読み出しと言う）あたり1000光子が検出されていると想定している。x軸は時間であり、y軸は各読み出しに対する電流の大きさである。各読み出しは電流のサンプルと考えることができ、以後のサンプルは、互いに離れた等しい継続時間の間隔で定期的に取り上げられている。図2aから分かるように、読み出しあたりの電流は、プロット上の水平バンドに沿ったデータポイントの集中によって例示される平均の大きさの周りで変動している。図2bに、ここではヒストグラムとしてプロットした同じ読み出しを示す。x軸上に各読み出しに対する電流の大きさを示し、y軸上に各測定値の頻度を示す。ヒストグラムプロットはポアソン分布である。平均の読み出し（これらの例では、平均の電流の大きさ）を決定する。この平均は、たとえば、図2bの垂直線14によって示すような最も一般的に測定される電流の大きさに一致する平均値である。このような平均値を、乱数の発生に用いるためにどの値を割り当てるかを決定するための閾値として設定するか、または他の例では、閾値を設定するために異なる統計値を計算して使用し得ることが考えられる。平均値を決定した後は、電流などの特性の以後の測定値のそれぞれを、平均値に対応づける。たとえば、測定値と閾値との間の差を計算するか、または測定値が閾値よりも大きい小さいかを判定する。差の大きさ、または単純に測定値が閾値よりも大きい小さいかをを用いて、測定値から割り当てられる値を決定して、乱数を発生させることができる。たとえば、図2bには、測定値が閾値14よりも小さい場合は、ビット値0を決定してビットストリングに記録し、一方で測定値が閾値14よりも大きい場合は、ビット値1を決定してビットストリングに記録するというを示す。この方法を以

10

20

30

40

50

後の測定値のそれぞれに対して繰り返して、光検出器 4 上での光強度における量子効果に基づく変動にその依存関係が与えられた場合に、ランダムに発生したビット値のストリングを発生させる。以後の測定値のそれぞれを直前の測定値から分離する間隔（したがって、サンプリング周波数）を、使用する特定の光検出器によって設定してもよいし、またはクロック信号に基づいて第 2 の回路によって制御してもよい。したがって、例における第 2 の回路は、第 1 の光検出器 4 が出力する電気信号を受け取り、第 1 の時点において電気信号の特性（たとえば電流）を測定し、そして、測定した特性に基づいて、測定した特性の大きさが閾値よりも小さいと判定し、これに基づいて、乱数を発生させるときに用いる第 1 の値（たとえば、ビット値、たとえば、図 2 b により 0）を決定する。第 1 の時点の直後だがサンプリング周期時間によって分離されている第 2 の時点において、次の測定値に対して同様のプロセスを行う。しかし、その代わりに、特性のその第 2 の測定値が閾値よりも大きい場合には、第 2 の値（たとえば、ビット値、たとえば、図 2 b により 1）を、第 1 の値とは異なる値により決定する。

10

【0021】

いくつかの例では、回路が乱数の発生を開始する前に閾値を決定する。光検出器 4 が出力する電気信号の特性の測定値を、測定値のポアソン分布の平均値（たとえば、平均）を決定するのに十分に長い所与の時間にわたって、サンプリングしてもよい。次にこの平均値を、特性の将来の変動に基づいて値（たとえばビット）を決定するとき用いる閾値として設定する。他の例では、閾値を、消費者に出荷する前に、製造中の較正プロセスの間に決定して記憶してもよい。これは、再び、ポアソン分布に対する平均値を決定するのに十分に長い時間にわたって特性を測定することによって行う。

20

【0022】

前述したように、光源が出力する光の強度、及び/または光スプリッタ 10 が出力する任意の第 2 の部分の光が、目標強度から外れる場合がある。このようなずれは、量子効果によって生じる任意の変動よりも大きい場合がある。1 つ以上の第 2 の光検出器 12 を用いて任意のこのようなずれをモニタリングすることによって、乱数発生用の値（たとえば、ビット値）を決定するためのプロセスを、それ相応に調整してもよい。たとえば、ずれに対応するオフセットを、測定した特性の大きさに付与して、ずれを補償し、閾値に対する正しい比較がなされるようにする。代替的に、任意のこのようなずれに対応して閾値を調整して、再び、閾値に対する測定した大きさの正しい比較がなされるようにしてもよい。または、任意のこのようなずれが十分に大きいもしくは長きに渡る場合、較正プロセスを再び行うことによって閾値のリセットを行って、ポアソン分布による平均値を決定してもよい。

30

【0023】

特定の例において、光源が 200 マイクロワット (μW) の強度の光を出力し、減衰システムによる減衰率が 1000 であり、サンプリングレートが 1 GHz であり、閾値が 0.16 マイクロアンペア (μA) であり、第 1 の光検出器 4 が光子を電子（したがって、測定可能な電流）に変換する変換効率が 100% であると考ええる。図 3 に、PIC の層例の図 1 においてライン A - A、B - B、C - C、及び D - D に沿ってそれぞれ取った断面図を、左から右に示す。光源、導波路 8、及びフォトダイオード 4 をそれぞれ、N-InP 化合物基板と p 型化合物（たとえば、P-InP、P-InGaAs、P-InAlAs、P-InAlGaAs または P-InGaAsP（Ga はガリウム、As はヒ素、Al はアルミニウム、及び P はリン））との間に示す。光検出器及びフォトダイオードに基づく半導体材料は、ある例では同じであるが他の例では異なっている。本明細書で説明する機能に対して副次的な任意の材料（たとえば、電子伝導性または環境に対するパッシベーション）は、明瞭にするために例示していない。

40

【0024】

これに基づいて、第 1 の光検出器 4 が測定する光強度は、最大で 3.1% だけ変動する可能性がある。これらの変動は量子効果に基づくため、ポアソン分布によってカバーされる（電流の）読み出し大きさ値の範囲は 3.1% である。このように十分に大きい変動範

50

図は、各測定値が閾値よりも大きい小さいかを判定するのに有用である。この判定は、変動範囲が小さくなると難しくなる可能性がある。3.1%の変動範囲は、本明細書で説明する光減衰システムがないPICにおいて系統の変動によって得られる変動の範囲よりも特に大きい。光源が出力する光の強度の減少、変換効率の減少、減衰率の増加及び/またはサンプリングレートの増加によって、変動範囲は増加する可能性があることに注意されたい。対照的に、光源が出力する光の強度の増加、変換効率の増加、減衰率の減少及び/またはサンプリングレートの減少によって、変動範囲は減少する可能性がある。

【0025】

電子回路（たとえば、本明細書で説明した第1及び第2の回路）を、少なくとも1つのプロセッサと、命令を記憶する少なくとも1つのメモリとを用いて実装してもよい。命令は、少なくとも1つのプロセッサ上で実行されると、少なくとも第1または第2の回路に関連して本明細書で説明した任意の例の方法を行う。少なくとも1つのプロセッサは、たとえば、汎用プロセッサ、マイクロプロセッサ、デジタルシグナルプロセッサ(DSP)、特定用途向け集積回路(ASIC)、フィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)または他のプログラマブル論理回路、ディスクリートゲートまたはトランジスタロジック、ディスクリートハードウェアコンポーネント、またはそれらの任意の好適な組み合わせであって、本明細書で説明した機能を行うようにデザインされたものである。第1及び第2の回路を単一のプリント回路基板(PCB)として一緒に設けてもよいし、または第1及び第2の各回路を1つ以上の基板上に実装してもよく、そしてPICに相応に接続してもよい。当業者であれば分かるように、PICと第1及び第2の回路とに電力供給するための適切な電力回路も考えられる。

【0026】

当業者であれば分かるように、種々の技術を用いて、本明細書で説明する例による半導体材料の層を堆積及びパターニングしてもよい。このような手法としては、化学気相成長法（たとえば、有機金属気相エピタキシ(MOVPE)または分子線エピタキシ(MBE)）を挙げてもよい。当業者であれば分かるように、パターニングの一部として、エッチング手法を用いて材料の一部を取り除いてもよい。

【0027】

したがって、例に基づいて、また図5の501~504を参照して、本明細書で説明する例のPICを、以下を含む方法によって製造する。基板を用意することと、基板上に光源を形成することと、基板上に第1の光検出器を形成することであって、第1の光検出器は、光源からの光の受け取りに応じて、乱数を発生させるときに用いる電気信号を出力するように構成されている、形成することと、基板上に、光源からの光を第1の光検出器に方向付けるように構成された光ガイダンスシステムを形成すること。さらに、例における方法は、基板上に、光減衰システムであって、光源と光検出器との間で、光源からの光の強度を減衰させて光検出器が検出する光の強度の変動がポアソン統計に支配されるようにするように構成された光減衰システムを形成することを含む。さらに例において、本方法は、前述した複数の第2の光検出器を形成することを含み、光減衰システムは一連の受動光スプリッタを含み、一連の受動光スプリッタはそれぞれ、光源からの光を、光ガイダンスシステムによって第1の光検出器に伝搬するための第1の部分の光と、複数の第2の光検出器のうちの第2の光検出器に伝搬するための第2の部分の光であって、光源に印加する電流を調整して、光源が出力する光の強度を調整し、光源が出力する実際の強度と光源が出力すべき目標強度との間の差を小さくすること、または実際の強度と目標強度との間の差に基づいて、乱数を発生させるためのプロセスを較正すること、のうちの少なくとも1つを行うときに用いる第2の部分の光とに分割するようにそれぞれ構成されている。

【0028】

前述の例は説明例であると理解すべきである。当然のことながら、いずれか1つの例に関連して説明した任意の特徴を、単独で用いてもよいし、または説明した他の特徴と組み合わせ用いてもよく、任意の他の例（または任意の他の例の任意の組み合わせ）の1つ以上の特徴と組み合わせ用いてもよい。さらに、前述していない均等物及び変更を、添

10

20

30

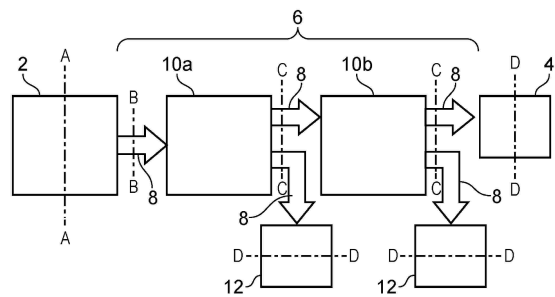
40

50

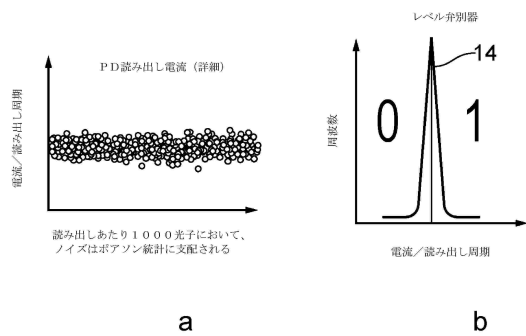
付の特許請求の範囲の範囲から逸脱することなく用いてもよい。

【図面】

【図 1】

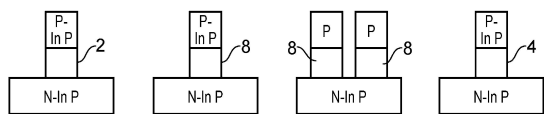


【図 2】

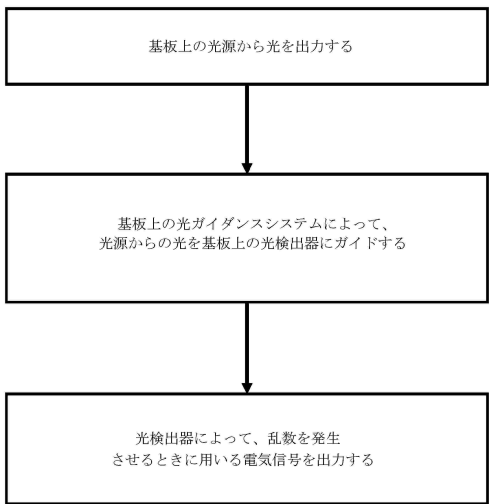


10

【図 3】



【図 4】



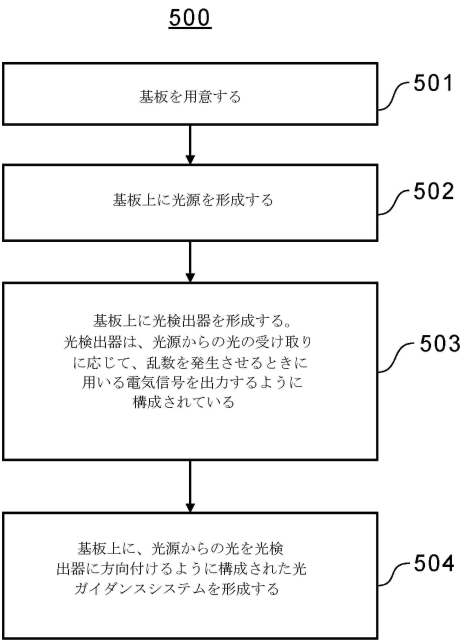
20

30

40

50

【 図 5 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

フィリップス

オランダ国，アイントホーフェン 5 6 5 6 エーイー ハイ テク キャンパス 2 9 スマート フ
ォトニクス ホールディングス ビー．ブイ．内

(72)発明者 ボナルディ，アントニオ

オランダ国，アイントホーフェン 5 6 5 6 エーイー ハイ テク キャンパス 2 9 スマート フ
ォトニクス ホールディングス ビー．ブイ．内

審査官 漆原 孝治

(56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 1 9 / 0 3 6 9 9 6 5 (U S , A 1)

米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 3 3 7 4 0 0 (U S , A 1)

(58)調査した分野 (Int.Cl.，D B 名)

G 0 6 F 7 / 5 8