(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7601818号
(P7601818)

(45)発行日　令和6年12月17日(2024.12.17)

(24)登録日　令和6年12月9日(2024.12.9)

(51)国際特許分類

		FI		
G06N	*3/067(2006.01)*	G06N	3/067	
G06G	*7/60 (2006.01)*	G06G	7/60	
G06E	*3/00 (2006.01)*	G06E	3/00	
G02F	*1/01 (2006.01)*	G02F	1/01	C
G02F	*3/00 (2006.01)*	G02F	3/00	501

請求項の数　9　（全13頁）

(21)出願番号　特願2022-44136(P2022-44136)
(22)出願日　令和4年3月18日(2022.3.18)
(65)公開番号　特開2023-137770(P2023-137770A)
(43)公開日　令和5年9月29日(2023.9.29)
審査請求日　令和6年2月2日(2024.2.2)

(73)特許権者　000208891
ＫＤＤＩ株式会社
東京都新宿区西新宿二丁目３番２号
(74)代理人　110003281
弁理士法人大塚国際特許事務所
(72)発明者　田中 英明
埼玉県ふじみ野市大原二丁目１番１５号
株式会社ＫＤＤＩ総合研究所内
(72)発明者　管 貴志
埼玉県ふじみ野市大原二丁目１番１５号
株式会社ＫＤＤＩ総合研究所内
(72)発明者　石村 昇太
埼玉県ふじみ野市大原二丁目１番１５号
株式会社ＫＤＤＩ総合研究所内
審査官　山本 俊介

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　スペックル生成回路および光ニューラルネットワーク装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

光ニューラルネットワーク装置に用いられるスペックル生成回路であって、

光源から光信号を受信し、位相変調を行う位相変調器と、

前記位相変調された変調光を受信し、伝搬させる単一のシングルモード導波路と、

前記シングルモード導波路に接続され、前記伝搬された変調光を複数に分岐させる光分岐素子と、

前記分岐された各変調光を伝搬する複数のシングルモード導波路と、

前記分岐後の各シングルモード導波路にそれぞれ接続され、前記伝搬された変調光からスペックルを生成する複数のマルチモード導波路と、を備えることを特徴とするスペックル生成回路。

【請求項２】

前記各マルチモード導波路は、導波路の幅がそれぞれ異なることを特徴とする請求項１記載のスペックル生成回路。

【請求項３】

前記各マルチモード導波路は、導波路の厚さがそれぞれ異なることを特徴とする請求項１又は請求項２記載のスペックル生成回路。

【請求項４】

前記各マルチモード導波路は、導波路の長さがそれぞれ異なることを特徴とする請求項１から請求項３のいずれかに記載のスペックル生成回路。

【請求項５】
前記各マルチモード導波路は、前記分岐後の各シングルモード導波路の中心軸および前記分岐後の各シングルモード導波路に接続した前記各マルチモード導波路の中心軸との距離が、すべて同一の距離となる位置で接続されていることを特徴とする請求項１から請求項４のいずれかに記載のスペックル生成回路。
【請求項６】
前記各マルチモード導波路は、前記分岐後の各シングルモード導波路の中心軸および前記分岐後の各シングルモード導波路に接続した前記各マルチモード導波路の中心軸との距離が、すべて異なる距離となる位置で接続されていることを特徴とする請求項１から請求項４のいずれかに記載のスペックル生成回路。
【請求項７】
前記光分岐素子は、入力された変調光をＴＥモード（transverse electric modes）とＴＭモード（transverse magnetic modes）に分離し、前記分岐後の各シングルモード導波路に異なる信号を出力することを特徴とする請求項１から請求項６のいずれかに記載のスペックル生成回路。
【請求項８】
多数のニューロン数を生成する光ニューラルネットワーク装置であって、
請求項１から請求項７のいずれかに記載のスペックル生成回路と、
前記スペックル生成回路で生成されたスペックルを電気信号に光電変換する複数の受光素子と、を備えることを特徴とする光ニューラルネットワーク装置。
【請求項９】
前記複数の受光素子は、それぞれ接続された前記マルチモード導波路から出力されるモード数に応じた数で構成されていることを特徴とする請求項８記載の光ニューラルネットワーク装置。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、人工知能分野で用いられるスペックル生成回路および光ニューラルネットワーク装置に関する。
【背景技術】
【０００２】
人工知能は、脳の神経回路を模擬した計算モデルにより実際の知能に迫る高度な情報処理を実現しようとする研究分野で、近年様々な研究がなされている。人工知能では計算に用いるニューロンの数を増やすことで計算性能を向上できる。しかしながら、一般的な人工知能モデルはコンピュータのプログラムによる電気演算で実現されているため、ニューロン数を増やすと、演算に要する電力や処理遅延が増大することが課題となる。これに対して、電気演算の代わりに光干渉を用いて計算を行う「光リザバーコンピュータ」という技術がある。光リザバーコンピュータは、光回路の複数の出力信号に重み付けを行い、加算演算を行うことで情報処理を可能としている。
【０００３】
非特許文献１では、単一波長光源と、その光源の出力光を位相変調する光位相変調器と、光位相変調器からの出力光が伝搬するシングルモード導波路と、シングルモード導波路に接続され、曲線領域を有するマルチモード導波路と、マルチモード導波路からの出力光を光電変換する複数の受光素子と、複数の受光素子からの電気信号に重みを付ける機能と、重みを付けた電気信号を加算する機構を構成要素とした光ニューラルネットワーク装置（光リザバーコンピュータ）（図１１Ａ）に関する技術が開示されている。
【０００４】
その光ニューラルネットワーク装置の動作は、時間依存信号であるデータｕ（ｎ）を位相変調器に印加して位相変調し、シングルモード導波路を伝搬した後、変調光を高次の空間モードを励振する働きをする曲線領域を有したマルチモード導波路で多数の空間モード

光に変換し、モード間で伝搬の時間差を与えながら、導波路端で時間的に変化するスペックル（濃淡像）を生成させる（図１１Ｂ）。なお、シングルモード導波路とマルチモード導波路の接続部のそれぞれの導波路の中心のずれ幅によって、導波路端で得られるスペックルも変わる。また、マルチモード導波路では、高次の空間モードと低次の空間モードの伝送路を伝搬する時間の差が生じることを利用して、マルチモード導波路の出力端で時間的なミキシングを発生させて、時間的な記憶の代用を果たしている。そのスペックルを受光素子で電気信号に変換し、各々の電気信号に各々の重みを乗じた後にそれら全てを総和演算した出力（推論値）を得る。各々の重みは、学習の段階で目標としたデータｙ（ｎ）にほぼ一致するように設定する。

【０００５】

このような光ニューラルネットワーク装置では、マルチモード導波路の空間モード数が人工知能のニューロン数に相当し、推論性能を上げるためにはニューロン数を多くすることが重要となる。

【０００６】

そのため、非特許文献１および非特許文献２では、マルチモード導波路の構造から計算される空間モード数は６８であったが、高次の空間モードの励振が難しいため、実際には空間モード数は６５で留まっていた。そのため、ニューロン数を増やす方法として、単一波長光源を複数用意し、それらを合波した後に、光位相変調器に入力し、光位相変調器からの出力で分波することにより、波長の数だけニューロン数を倍増させることを行っている。また、入力データの時間間隔の１／４毎で時分割して光電変換、重み付け、総和演算を行うことで、ニューロン数を仮想的に４倍にさせることを行っている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【０００７】

【文献】Satoshi Sunada、Atsushi Uchida著、「Photonic neural field on a silicon chip: large-scale, high-speed neuro-inspired computing and sensing」、Optica Publishing Group、2021年11月発行、第1388頁から第1396頁

【文献】Satoshi Sunada、Atsushi Uchida著、「Photonic neural field on a silicon chip: large-scale, high-speed neuro-inspired computing and sensing: supplement」、Optica Publishing Group

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００８】

しかしながら、非特許文献１および非特許文献２における光ニューラルネットワーク装置では、推論性能をさらに向上させる目的でニューロン数を増やそうとした場合、マルチモード導波路の空間モード数をさらに増やすことができない。また、波長数を増やしてニューロン数を増やすことはできるが、それはスペックルの１ヶ所の測定点の光だけを拾って、分波素子により波長を分波してニューロン数を増やしただけにすぎず、６５ヶ所の測定点で波長を分波するには、受光素子の前段に配置する分波素子の大きさにより、波長数を大きく増やすことはできない。さらに、時分割数は、電子回路の動作速度の限界、およびニューロン同士の独立性の減少により増やせない。このような事情から、ニューロン数をさらに増やすことは困難であった。

【０００９】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、マルチモード光信号に分配する際に、データ信号を光分岐回路で分岐し、分岐した光信号をディメンションの異なる複数のマルチモード導波路で高次モードに変換することにより、ニューロン数を増やすことを可能とするスペックル生成回路および光ニューラルネットワーク装置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】

【００１０】

（１）上記の目的を達成するために、本発明は、以下のような手段を講じた。すなわち、本発明のスペックル生成回路は、光ニューラルネットワーク装置に用いられるスペックル生成回路であって、光源から光信号を受信し、位相変調を行う位相変調器と、前記位相変調された変調光を受信し、伝搬させる単一のシングルモード導波路と、前記シングルモード導波路に接続され、前記伝搬された変調光を複数に分岐させる光分岐素子と、前記分岐された各変調光を伝搬する複数のシングルモード導波路と、前記分岐後の各シングルモード導波路にそれぞれ接続され、前記伝搬された変調光からスペックルを生成する複数のマルチモード導波路と、を備えることを特徴としている。

【００１１】

（２）また、本発明のスペックル生成回路において、前記各マルチモード導波路は、導波路の幅がそれぞれ異なることを特徴としている。

【００１２】

（３）また、本発明のスペックル生成回路において、前記各マルチモード導波路は、導波路の厚さがそれぞれ異なることを特徴としている。

【００１３】

（４）また、本発明のスペックル生成回路において、前記各マルチモード導波路は、導波路の長さがそれぞれ異なることを特徴としている。

【００１４】

（５）また、本発明のスペックル生成回路において、前記各マルチモード導波路は、前記分岐後の各シングルモード導波路の中心軸および前記分岐後の各シングルモード導波路に接続した前記各マルチモード導波路の中心軸との距離が、すべて同一の距離となる位置で接続されていることを特徴としている。

【００１５】

（６）また、本発明のスペックル生成回路において、前記各マルチモード導波路は、前記分岐後の各シングルモード導波路の中心軸および前記分岐後の各シングルモード導波路に接続した前記各マルチモード導波路の中心軸との距離が、すべて異なる距離となる位置で接続されていることを特徴としている。

【００１６】

（７）また、本発明のスペックル生成回路において、前記光分岐素子は、入力された変調光をＴＥモード（transverse electric modes）とＴＭモード（transverse magnetic modes）に分離し、前記分岐後の各シングルモード導波路に異なる信号を出力することを特徴としている。

【００１７】

（８）また、本発明の光ニューラルネットワーク装置は、多数のニューロン数を生成する光ニューラルネットワーク装置であって、（１）から（７）のいずれかに記載のスペックル生成回路と、前記スペックル生成回路で生成されたスペックルを電気信号に光電変換する複数の受光素子と、を備えることを特徴としている。

【００１８】

（９）また、本発明の光ニューラルネットワーク装置において、前記複数の受光素子は、それぞれ接続された前記マルチモード導波路から出力されるモード数に応じた数で構成されていることを特徴としている。

【発明の効果】

【００１９】

本発明によれば、光ニューラルネットワーク装置において、ニューロン数を増加させることにより、人工知能の推論性能を向上させることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【００２０】

【図１】本実施形態に係る光ニューラルネットワーク装置の概略構成を示す図である。

【図２】図１のｓ－ｓにおける断面図である。

【図３】図１のｍ－ｍにおける断面図である。

【図４】マルチモード導波路の長さ（導波路の中心の長さ）に該当する箇所を示す図である。
【図５】シミュレーションで使用したマルチモード導波路の概略構成を示す図である。
【図６】マルチモード導波路から出力される光強度を示す図である。
【図７】シングルモード導波路およびマルチモード導波路の接続部分の概略構成を示す図である。
【図８】変形例２におけるマルチモード導波路の長さの概略構成を示す図である。
【図９】変形例３におけるシングルモード導波路およびマルチモード導波路の接続部分を示す図である。
【図１０】変形例５の光ニューラルネットワークシステムの概略構成を示す図である。
【図１１Ａ】従来の光ニューラルネットワーク装置を示す図である。
【図１１Ｂ】従来の光ニューラルネットワーク装置による生成スペックルを示す図である。
【発明を実施するための形態】
【００２１】
本発明者らは、マルチモード導波路の空間モードの励振数の限界によりニューロン数を増やせないことに着目し、マルチモード光信号に分配する際に、データ信号を光分岐回路で分岐し、分岐した光信号をディメンションの異なる複数のマルチモード導波路で高次モードに変換することによって、異なるスペックルを生成し、ニューロン数を増やせることを見出し、本発明をするに至った。
【００２２】
すなわち、本発明は、光ニューラルネットワーク装置に用いられるスペックル生成回路であって、光源から光信号を受信し、位相変調を行う位相変調器と、前記位相変調された変調光を受信し、伝搬させる単一のシングルモード導波路と、前記シングルモード導波路に接続され、前記伝搬された変調光を複数に分岐させる光分岐素子と、前記分岐された各変調光を伝搬する複数のシングルモード導波路と、前記分岐後の各シングルモード導波路にそれぞれ接続され、前記伝搬された変調光からスペックルを生成する複数のマルチモード導波路と、を備えることを特徴とする。
【００２３】
これにより、本発明者らは、光リザバーコンピュータに必要となるニューロン数の生成を大幅に増やすことを可能とした。以下、本発明の実施形態について図面を参照しながら具体的に説明する。
【００２４】
図１は、本実施形態に係る光ニューラルネットワーク装置の概略構成を示す図である。本実施形態に係る光ニューラルネットワーク装置１は、単一波長光源１１１、位相変調器１１３、光分岐素子１１７、第１のシングルモード導波路１２１、第２のシングルモード導波路１２３、第３のシングルモード導波路２２３、第１のマルチモード導波路１２５、第２のマルチモード導波路２２５、第１の受光素子１１９、第２の受光素子２１９、Ａ／Ｄ変換器１３１、重みを付ける電気回路ならびに重みを付けた電気信号を加算する電気回路およびＤ／Ａ変換器からなるディジタル回路１３３から構成されている。
【００２５】
本実施形態では、光分岐素子１１７、第１のシングルモード導波路１２１、第２のシングルモード導波路１２３、第３のシングルモード導波路２２３、第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５は、１つのシリコン基板（チップ）３１０上に形成されているが、これに限定されない。例えば、分岐素子により複数に分岐された後の回路は、分岐された回路ごとにシリコン基板（チップ）上に形成されていてもよい。
【００２６】
単一波長光源１１１からレーザー光が出力され、時間依存信号であるデータｕ（ｎ）を位相変調器１１３に印加して、単一波長光源１１１からの出力光を位相変調する。本実施形態では、位相変調器１１３は、ニオブ酸リチウム位相変調器を用いる。
【００２７】

第１のシングルモード導波路１２１は、位相変調器１１３に接続され、位相変調器１１３からの変調光を伝搬する。そして、第１のシングルモード導波路１２１は、多モード干渉導波路の光分岐素子１１７において、第２のシングルモード導波路１２３および第３のシングルモード導波路２２３に２分岐される。本実施形態の分岐素子は、一例として、２分岐の素子を用いたが、４分岐、８分岐、あるいはそれ以上の分岐数の素子を用いてもよい。また、第２のシングルモード導波路１２３および第３のシングルモード導波路２２３への入力偏波をＴＥモード（transverse electric modes）とし、光分岐素子１１７に多モード干渉導波路の分岐素子を適用する。

【００２８】

光分岐素子１１７で分岐された第２のシングルモード導波路１２３および第３のシングルモード導波路２２３は、それぞれ第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５に接続されている。

【００２９】

図２は、図１のｓ－ｓにおける断面図であり、第２のシングルモード導波路および第３のシングルモード導波路の断面を示す図である。図３は、図１のｍ－ｍにおける断面図であり、第１のマルチモード導波路および第２のマルチモード導波路の断面を示す図である。図４は、マルチモード導波路の長さ（導波路の中心の長さ）に該当する箇所を示す図である。

【００３０】

第１のシングルモード導波路１２１、第２のシングルモード導波路１２３、第３のシングルモード導波路２２３、第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５は、シリコン基板（チップ）３１０上に形成され、各導波路１２１、１２３、１２５、２２３、２２５のコアはシリコンで形成され、各導波路１２１、１２３、１２５、２２３、２２５のクラッドは二酸化ケイ素で形成されており、厚さは、０．２２μｍである。また、第１のシングルモード導波路１２１、第２のシングルモード導波路１２３および第３のシングルモード導波路２２３の幅は０．５μｍである。第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５のサイズは、幅がそれぞれ２３．９μｍ、１８．８μｍであり、総長３９ｍｍである。そして第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５は、それぞれスパイラル形状で中央はＳ字曲線の曲線領域を有しているが、これに限定されない。また、スパイラル形状の旋回数についても、１回でもよいし、それ以上でもよい。直線でなければよい。

【００３１】

ここで、マルチモード導波路から生成されるスペックルについて説明する。図５は、シミュレーションで使用したマルチモード導波路の概略構成を示す図である。図５（ｂ）は、図５（ａ）のａ－ａにおける断面図である。サイズが異なるマルチモード導波路を用いることで、異なるスペックルが生成させることをシミュレーションする。シミュレーションでは、以下３つのサイズのマルチモード導波路を用いた。いずれも、Ｒ＝２５μｍの曲線領域を有する。

（１）幅２５μｍ、厚さ０．２５μｍ、長さ２３０μｍ
（２）幅２５μｍ、厚さ０．２２μｍ、長さ２３０μｍ
（３）幅２５μｍ、厚さ０．２２μｍ、長さ２８０μｍ

【００３２】

図６（ａ）～（ｃ）は、（１）～（３）のマルチモード導波路から出力される光強度を示す図である。図６において、縦軸は光強度［ａ．ｕ．］を示し、横軸ｙ［μｍ］は導波路の中心軸を原点とした時の導波路横（幅）方向の位置を示す。図６（ａ）～（ｃ）に示すように、マルチモード導波路のサイズを変えることで、マルチモード導波路から出力される光強度が異なる。つまり、マルチモード導波路の出力端部では、異なるスペックルが生成されることがわかる。

【００３３】

図７は、本実施形態に係るシングルモード導波路およびマルチモード導波路の接続部分

の概略構成を示す図である。図７に示すように、第２のシングルモード導波路１２３および第１のマルチモード導波路１２５、第３のシングルモード導波路２２３および第２のマルチモード導波路２２５は、それぞれの導波路の中心から同じ長さだけずれた距離、つまり、第２のシングルモード導波路１２３の中心軸ならびに第２のシングルモード導波路１２３に接続した第１のマルチモード導波路１２５の中心軸との距離、および第３のシングルモード導波路２２３の中心軸ならびに第３のシングルモード導波路２２３に接続した第２のマルチモード導波路２２５の中心軸との距離が、同一となる位置で接続されている。

【００３４】

光分岐素子１１７で分岐された変調光は、第２のシングルモード導波路１２３から第１のマルチモード導波路１２５へ、第３のシングルモード導波路２２３から第２のマルチモード導波路２２５へ、それぞれ伝搬する。

【００３５】

第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５へ伝搬された変調光は、高次の空間モードを励振する働きをする曲線領域を有する各マルチモード導波路１２５、２２５において、多数の空間モード光に変換され、モード間で伝搬の時間差を与えられることで、導波路端で時間的に変化するスペックル（濃淡像）が生成される。

【００３６】

幅２３．９μｍの第１のマルチモード導波路１２５では６５モード励振され、幅１８．８μｍの第２のマルチモード導波路２２５では５１モード励振される。サイズの異なる（本実施形態では、幅が異なる）マルチモード導波路で生成されたスペックルは異なることから、導波路間でニューロン同士の独立性は保たれる。生成されたスペックルは、複数のフォトダイオードをアレイ状に集積した各受光素子で電気信号に光電変換する。

【００３７】

各受光素子１１９、２１９は、モード数に応じた素子で形成されている。図１では、簡略化して各受光素子は８つの受光素子を図示しているが、例えば、第１のマルチモード導波路は６５モードであるため、第１のマルチモード導波路１２５に接続している第１の受光素子１１９は、６５個の受光素子からなる。また、第２のマルチモード導波路２２５は５１モードであるため、第２のマルチモード導波路２２５に接続している受光素子２１９は、５１個の受光素子からなる。

【００３８】

各受光素子１１９、２１９で光電変換された電気信号は、Ａ／Ｄ変換器１３１、２３１でディジタル信号に変換され、ディジタル回路１３３へ出力される。ディジタル回路１３３では、重みを付ける電気回路で各々の重みを乗じる処理を行い、重みを付けた電気信号を加算する電気回路で各々の重みを乗じた値すべてを総和演算する。その後、Ｄ／Ａ変換器を通じて推論値が出力される。なお、各々の重みは、学習の段階で目標としたデータｙ（ｎ）にほぼ一致するように予め設定される。

【００３９】

本実施形態における光ニューラルネットワーク装置１を用いることにより、１１６（６５＋５１）のニューロン数を得ることができる。本実施形態では、光分岐素子１１７で２分岐の素子を用いたが、４分岐、８分岐、あるいはそれ以上の分岐数の素子を用いて分岐出力に各々の導波路幅が異なるマルチモード導波路を接続することで、ニューロン数をさらに増やすことが可能となる。このように、多波長化や時間軸上の分割を使うことなく、大幅なニューロン数を増やすことができる。

【００４０】

本実施形態では、第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５の厚さは０．２２μｍ、長さは３９ｍｍで同一とし、幅をそれぞれ２３．９μｍ、１８．８μｍと異なるサイズにする、つまり幅のみが異なる２つのマルチモード導波路を用いることで、異なるスペックルパターンを生成させる構成について説明した。異なるスペックルパターンを生成させる別の構成について、変形例として以下に説明する。

【００４１】

（変形例１）
変形例１では、第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５の長さ、幅は同一とし、厚さが異なるサイズのマルチモード導波路を用いた。つまり、厚さは０．２２μｍ、幅は、例えば２３．９μｍ、１８．８μｍの何れか１つのサイズを使用し、一方のマルチモード導波路の厚さを０．２２μｍ、他方のマルチモード導波路の厚さを０．２５μｍとした。このように、マルチモード導波路の幅が同じでも、厚さを異なるサイズにすることで、異なるスペックルパターンを生成させることが可能となり、ニューロン数を大幅に増やすことができる。

【００４２】
（変形例２）
図８は、変形例２におけるマルチモード導波路の長さの概略構成を示す図である。変形例２では、図８に示すように、第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５の幅、厚さは同一とし、長さが異なるサイズのマルチモード導波路を用いた。つまり、幅は例えば、２３．９μｍ、１８．８μｍの何れか１つのサイズを使用し、厚さは、例えば０．２２μｍ、０．２５μｍの何れか１つのサイズを使用し、一方のマルチモード導波路の長さを３９ｍｍ、他方のマルチモード導波路の長さを３５ｍｍとした。このように、マルチモード導波路の幅、厚さが同じでも、長さが異なることで、異なるスペックルパターンを生成させることが可能となり、ニューロン数を大幅に増やすことができる。

【００４３】
（変形例３）
図９は、変形例３におけるシングルモード導波路およびマルチモード導波路の接続部分を示す図である。変形例３では、各マルチモード導波路は、幅、長さ、厚さがいずれも同じサイズの導波路を用いており、図９に示すように、第２のシングルモード導波路１２３および第１のマルチモード導波路１２５、第３のシングルモード導波路２２３および第２のマルチモード導波路２２５は、それぞれの導波路の中心から異なる長さだけずれた距離、つまり、第２のシングルモード導波路１２３の中心軸ならびに第２のシングルモード導波路１２３に接続した第１のマルチモード導波路１２５の中心軸との距離、および第３のシングルモード導波路２２３の中心軸ならびに第３のシングルモード導波路２２３に接続した第２のマルチモード導波路２２５の中心軸との距離が異なる位置で接続されている。第１のマルチモード導波路１２５および第２のマルチモード導波路２２５の幅、長さ、厚さを同じサイズであっても、シングルモード導波路とマルチモード導波路との接続部分での各導波路の中心軸間の距離を変えることで、異なるスペックルパターンを生成させることが可能となり、ニューロン数を大幅に増やすことができる。

【００４４】
（変形例４）
前述した実施形態および変形例では、第２のシングルモード導波路１２３および第３のシングルモード導波路２２３への入力偏波をＴＥモード（transverse electric modes）とし、光分岐素子１１７に多モード干渉導波路の分岐素子を適用した。変形例４では、各マルチモード導波路は、幅、長さ、厚さがいずれも同じサイズの導波路を用いており、第２のシングルモード導波路１２３および第３のシングルモード導波路２２３への入力偏波を、第１のシングルモード導波路１２１への入力の角度を変えて、光波の電界の振動方向が導波路の横幅方向のＴＥモード（transverse electric modes）と、光波の電界の振動方向が厚さ方向のＴＭモード（transverse magnetic modes）の両モード励振するように設定し、分岐素子にＴＥ／ＴＭモードの分離器を適用する。つまり、第２のシングルモード導波路１２３、第１のマルチモード導波路１２５、第１の受光素子１１９をＴＥモード用、第３のシングルモード導波路２２３、第２のマルチモード導波路２２５、第２の受光素子２１９をＴＭモード用とすることで、マルチモードの導波路幅、厚さ、長さが同じでも、ニューロン数を２倍にすることが可能となる。

【００４５】

（変形例５）

図１０は、変形例５の光ニューラルネットワーク装置２の概略構成を示す図である。図１０に示すように、変形例５は、第２のマルチモード導波路２２５をさらに第３のマルチモード導波路２２７に接続するマルチモード導波路の多段構成をとっている。このような構造をとることで、モード間でさらにミキシングさせ、出力信号の相関性が減り、実効的にニューロン数を増やすことが可能となる。

【００４６】

本実施形態、変形例１～５で前述したマルチモード導波路の幅、長さ、導波路中心からのずれ、分岐素子へのＴＥ／ＴＭモードの分離器適用は、いずれを組み合わせてもニューロン数は大幅に増やすことができることはいうまでもない。

【００４７】

なお、先の例では、マルチモード導波路はシングルモード導波路に接続されていたが、位相変調器から出力光をどの段階でもマルチモード化してさらにマルチモード導波路１２５、２２５に結合さえ行われれば、前述した構成でニューロン数を大幅に増やすことができる。

【００４８】

さらに、マルチモード導波路入力受光素子で電気信号に変換した後にＡ／Ｄ変換器でディジタル信号に変換し、ディジタル回路で各々の重みを乗じた後にそれら全てを総和演算し、Ｄ／Ａ変換器でアナログ信号に戻し出力（推論値）を得ていたが、受光素子からの電気出力を直接積算する回路を適用すれば出力が得られる。

【００４９】

以上説明したように、本実施形態によれば、光ニューラルネットワーク装置において、ニューロン数を増加させることにより、人工知能の推論性能の向上することが可能となる。

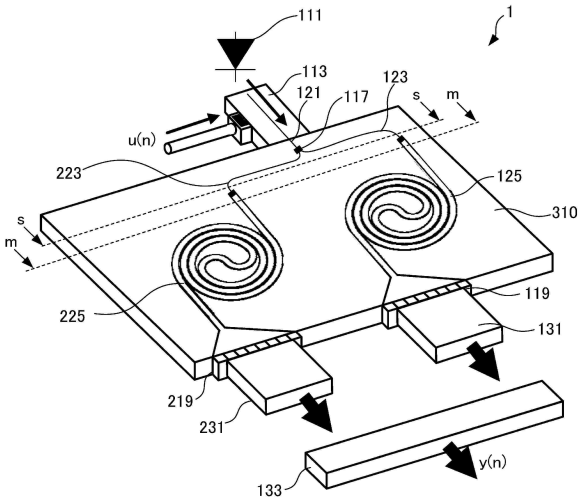
【符号の説明】

【００５０】

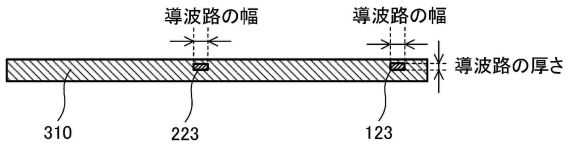
１、２　光ニューラルネットワーク装置
１１１　単一波長光源
１１３　位相変調器
１１７　光分岐素子
１１９　第１の受光素子
１２１　第１のシングルモード導波路
１２３　第２のシングルモード導波路
１２５　第１のマルチモード導波路
１３１、２３１　Ａ／Ｄ変換器
１３３　ディジタル回路
２１９　第２の受光素子
２２３　第３のシングルモード導波路
２２５　第２のマルチモード導波路
２２７　第３のマルチモード導波路
３１０　シリコン基板（チップ）

【図面】

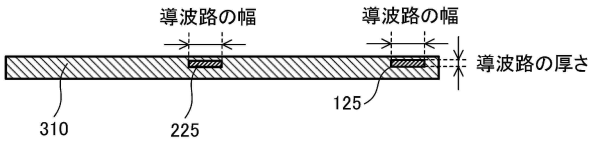
【図１】


111
1
113
121
117
123
s
m
u(n)
223
125
310
s
m
225
119
131
219
231
133
y(n)

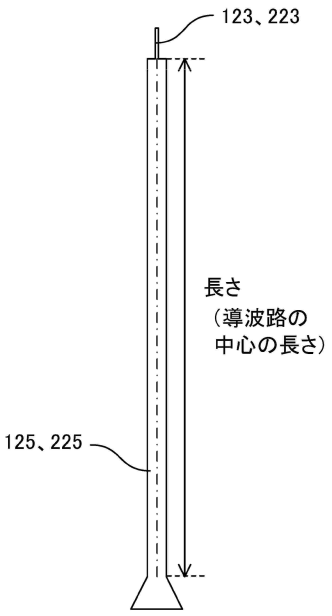
【図２】


導波路の幅
導波路の幅
導波路の厚さ
310
223
123

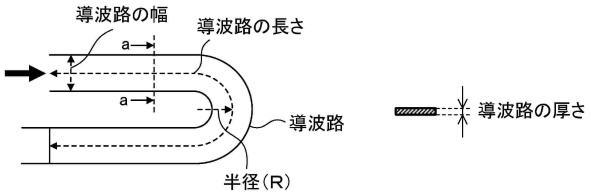
【図３】


導波路の幅
導波路の幅
導波路の厚さ
310
225
125

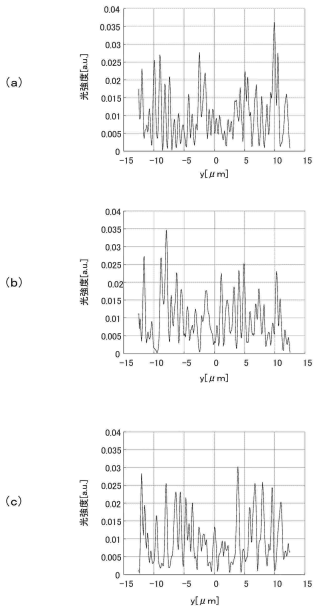
【図４】


123、223
長さ
（導波路の
中心の長さ）
125、225

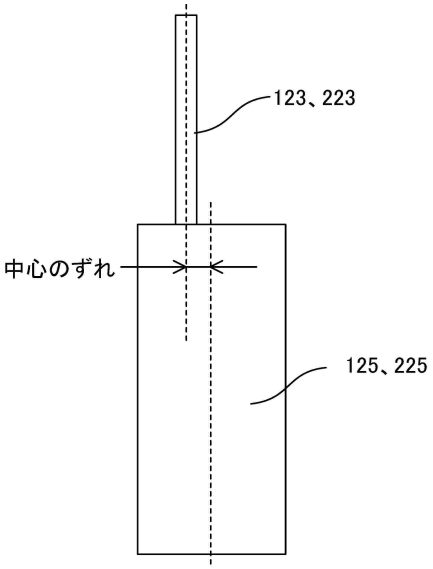
【図５】


導波路の幅
導波路の長さ
a
a
導波路
半径(R)
導波路の厚さ
(a)
(b)

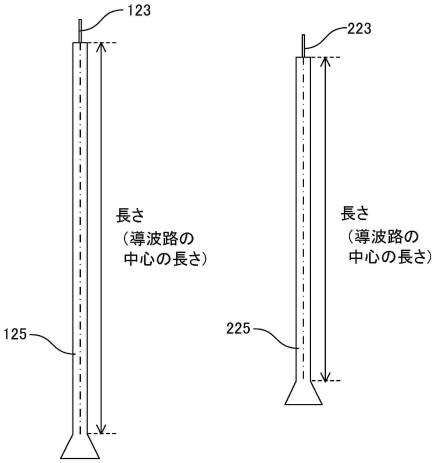
【図６】


(a)
(b)
(c)
光強度[a.u.]
y[μm]

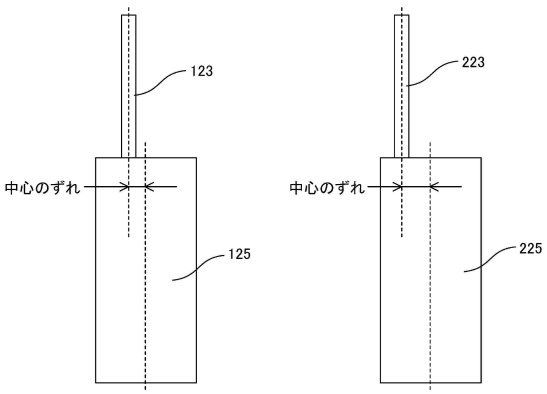
【図７】


123、223
中心のずれ
125、225

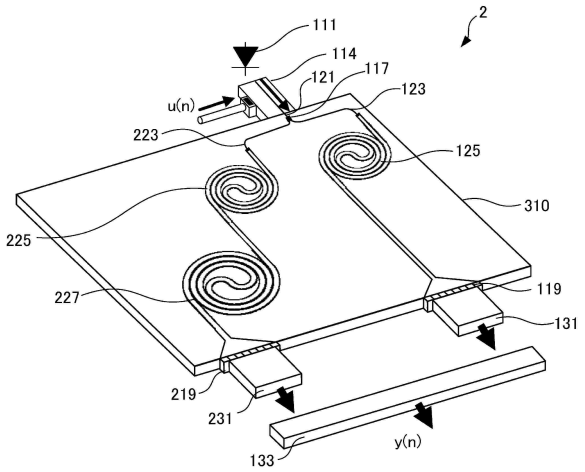
【図８】


123
223
長さ
(導波路の
中心の長さ)
長さ
(導波路の
中心の長さ)
125
225

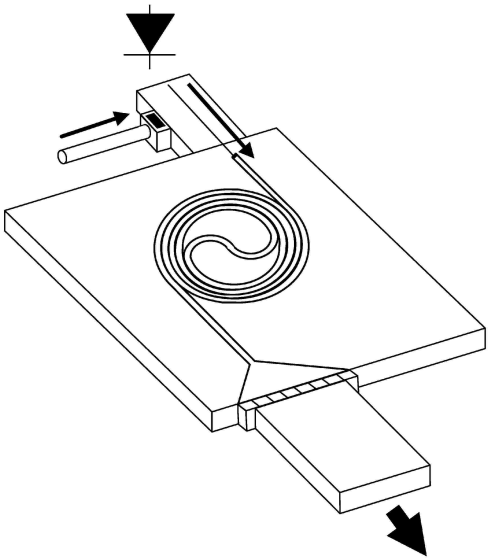
【図９】



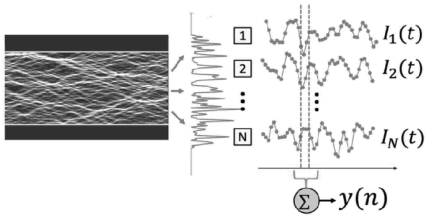
【図１０】



【図１１Ａ】



【図１１Ｂ】



フロントページの続き

(56)参考文献　米国特許出願公開第２０２０／０１１０４３２（ＵＳ，Ａ１）
特開平５－９９６２１（ＪＰ，Ａ）
特表２０２２－５１２０３７（ＪＰ，Ａ）
特表２０１９－５２３９３２（ＪＰ，Ａ）
特表２０２１－５１８５９８（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０６Ｎ　３／０６７
Ｇ０６Ｇ　７／６０
Ｇ０６Ｅ　３／００
Ｇ０２Ｆ　１／０１
Ｇ０２Ｆ　３／００