

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6260911号
(P6260911)

(45) 発行日 平成30年1月17日(2018.1.17)

(24) 登録日 平成29年12月22日(2017.12.22)

(51) Int.Cl.	F I		
GO2B 6/125 (2006.01)	GO2B	6/125	301
GO2B 6/12 (2006.01)	GO2B	6/12	301
GO2B 6/00 (2006.01)	GO2B	6/00	B

請求項の数 22 (全 45 頁)

(21) 出願番号	特願2015-556188 (P2015-556188)	(73) 特許権者	592116475
(86) (22) 出願日	平成26年1月31日(2014.1.31)		ザ・ボード・オブ・トラスティーズ・オブ
(65) 公表番号	特表2016-505174 (P2016-505174A)		・ザ・リーランド・スタンフォード・ジュ
(43) 公表日	平成28年2月18日(2016.2.18)		ニア・ユニバーシティ
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/014310		アメリカ合衆国カリフォルニア州9430
(87) 国際公開番号	W02014/121144		5-2038, スタンフォード, ピー・オー
(87) 国際公開日	平成26年8月7日(2014.8.7)		ー・ボックス 20386, メイン・クワ
審査請求日	平成27年9月30日(2015.9.30)		ッド, オフィス・オブ・ザ・ジェネラル・
(31) 優先権主張番号	61/765, 288	(74) 代理人	110000877
(32) 優先日	平成25年2月15日(2013.2.15)		龍華国際特許業務法人
(33) 優先権主張国	米国 (US)		
(31) 優先権主張番号	61/759, 979		
(32) 優先日	平成25年2月1日(2013.2.1)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 低速光センサ用途のための結合導波路

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

外乱を感知する光デバイスであって、前記光デバイスは、
複数の細長部分を含む螺旋状導光路を有する少なくとも1つの導光路と、前記螺旋状導光路と光学的に接続され、前記螺旋状導光路に光を供給するように構成される光源と、少なくとも1つの光検出器と、を備え、

前記光は連続的に概して前記複数の細長部分に沿って伝搬し、
前記複数の細長部分のうち少なくとも2つの細長部分は、互いに概して同一平面にあり、互いに隣接して概して平行であり、

前記光が前記少なくとも2つの細長部分に概して沿って伝搬するに連れて、前記少なくとも2つの細長部分に概して直交する方向において、前記光が前記少なくとも2つの細長部分間で結合されるように、前記少なくとも2つの細長部分は互いに光学的に結合され、前記螺旋状導光路が、前記螺旋状導光路の外乱に応答する伝送スペクトル強度を有し、

前記光は、前記伝送スペクトル強度の伝送共振ピーク、又は、前記伝送スペクトル強度の伝送共振ピークの一部であって0ではない傾きを有する部分の波長を有し、

前記少なくとも1つの光検出器は、前記少なくとも1つの導光路から発生した前記光の少なくとも一部を受け取り、前記光の前記一部を示す信号を発生させるように構成される、

光デバイス。

【請求項2】

前記少なくとも1つの導光路は、概して長方形または正方形を有する、
請求項1に記載の光デバイス。

【請求項3】

前記少なくとも1つの導光路は、アルキメデスの螺旋形を有する、
請求項1に記載の光デバイス。

【請求項4】

前記少なくとも2つの細長部分は、実質的に直線であり、実質的に等しい長さを有する、
請求項1に記載の光デバイス。

【請求項5】

前記複数の細長部分は更に、湾曲していて実質的に異なる長さを含む、2つ又はそれより多くの細長部分を有する、
請求項4に記載の光デバイス。

【請求項6】

前記2つ又はそれより多くの細長部分は、実質的に整合する位相シフトを有する、
請求項5に記載の光デバイス。

【請求項7】

実質的に直線の前記少なくとも2つの細長部分は、それらの間における第1結合係数を有し、湾曲した前記2つ又はそれより多くの細長部分は、それらの間における第2結合係数を有し、前記光の波長における前記第2結合係数は、前記光の前記波長における前記第1結合係数より小さい、

請求項4に記載の光デバイス。

【請求項8】

前記複数の細長部分は、湾曲していて、実質的に異なる長さを含み、実質的に等しい光学的長さを含む、2つ又はそれより多くの細長部分を有する、

請求項1に記載の光デバイス。

【請求項9】

前記少なくとも2つの細長部分に概して直交する前記方向は、前記少なくとも2つの細長部分と概して同一平面にある、

請求項1に記載の光デバイス。

【請求項10】

前記光デバイスは、前記少なくとも2つの細長部分間において少なくとも1つの領域を備え、前記少なくとも1つの領域は、前記少なくとも2つの細長部分に概して直交する前記方向において、前記少なくとも2つの細長部分間で予め定められた結合係数を提供する材料を含む、

請求項1に記載の光デバイス。

【請求項11】

前記少なくとも2つの細長部分は、少なくとも、第1細長部分と、前記第1細長部分に隣接して概して平行である第2細長部分とを有し、

光は、前記第1細長部分の中へと前記第1細長部分の長さに概して沿って伝搬し、前記第2細長部分の中へと前記第2細長部分の長さに概して沿って伝搬し、

前記光が、前記第1細長部分の前記長さ、及び、前記第2細長部分の前記長さに概して沿って伝搬するに連れて、前記第1細長部分および前記第2細長部分と概して直交する方向において、前記光が前記第1細長部分と前記第2細長部分との間において結合されるように、前記第1細長部分および前記第2細長部分は互いに光学的に結合され、

前記光は前記第1細長部分の前記長さに沿って伝搬する間は第1位相シフトを受け、前記第2細長部分の前記長さに沿って伝搬する間は第2位相シフトを受け、

前記第1位相シフトは、前記第2位相シフトと異なる、

請求項1に記載の光デバイス。

【請求項12】

10

20

30

40

50

前記第 1 位相シフトと前記第 2 位相シフトとの間における差は、2 の 0 を除く倍数である、

請求項 1 1 に記載の光デバイス。

【請求項 1 3】

前記光は、前記第 1 細長部分および前記第 2 細長部分と概して直交する前記方向において、前記光の波長の 300 倍未満の結合長さで、前記第 1 細長部分と前記第 2 細長部分との間で結合される、

請求項 1 2 に記載の光デバイス。

【請求項 1 4】

前記少なくとも 1 つの導光路は、リッジ導波路を有する、

請求項 1 に記載の光デバイス。

10

【請求項 1 5】

前記少なくとも 1 つの導光路と光通信する少なくとも 1 つの光結合器を更に備え、

前記少なくとも 1 つの導光路は、ある領域を横切って延伸しており、前記少なくとも 1 つの光結合器から前記光を受信して前記少なくとも 1 つの導光路を通して伝搬した後前記光を放出する少なくとも 1 つの部分有し、

前記少なくとも 1 つの部分は、前記領域の外側境界に又はその近くに配置される、

請求項 1 に記載の光デバイス。

【請求項 1 6】

反射部分を更に備え、

前記受信された光は、前記少なくとも 1 つの部分から前記少なくとも 1 つの導光路の第 1 部分を通して伝搬し、前記反射部分から反射し、前記少なくとも 1 つの導光路の第 2 部分を通して前記少なくとも 1 つの部分へと伝搬する、

請求項 1 5 に記載の光デバイス。

20

【請求項 1 7】

前記少なくとも 1 つの導光路は、互いからオフセットされた複数のループを有する、

請求項 1 5 に記載の光デバイス。

【請求項 1 8】

前記複数のループのうち、2 つ又はそれより多くのループは、互いに交差する、

請求項 1 7 に記載の光デバイス。

30

【請求項 1 9】

前記放出される光の少なくとも一部を受信して前記放出される光を示す信号を生成する少なくとも 1 つの光検出器を更に備える、

請求項 1 5 に記載の光デバイス。

【請求項 2 0】

外乱を感知する方法であって、

複数の細長部分を含む螺旋状導光路を有する少なくとも 1 つの導光路に光を入力する段階と、

前記少なくとも 1 つの導光路から伝送される前記光の少なくとも一部を検出し、前記光の前記一部を示す信号を発生させる段階と、

を含み、

前記光は連続的に概して前記複数の細長部分に沿って伝搬し、

前記複数の細長部分のうち少なくとも 2 つの細長部分は、互いに概して同一平面にあり、互いに隣接して概して平行であり、

前記光が前記少なくとも 2 つの細長部分に概して沿って伝搬するに連れて、前記少なくとも 2 つの細長部分に概して直交する方向において、前記光が前記少なくとも 2 つの細長部分間で結合されるように、前記少なくとも 2 つの細長部分は互いに光学的に結合され、前記螺旋状導光路が、前記螺旋状導光路の外乱に応答する伝送スペクトル強度を有し、

前記光は、前記伝送スペクトル強度の伝送共振ピーク、又は、前記伝送スペクトル強度の伝送共振ピークの一部であって 0 ではない傾きを有する部分の波長を有する、

40

50

方法。

【請求項 2 1】

前記外乱は、前記少なくとも 1 つの導光路の少なくとも一部に適用される歪みの変化、前記少なくとも 1 つの導光路の少なくとも一部に適用される温度の変化、及び、前記少なくとも 1 つの導光路の少なくとも一部の屈折率の変化の少なくとも 1 つを含む、

請求項 2 0 に記載の方法。

【請求項 2 2】

前記光は、前記少なくとも 1 つの導光路の伝送スペクトルピークでの波長、又は、0 ではない傾きを有する前記伝送スペクトルピークの傍らでの波長を有し、かつ、前記伝送スペクトルピークの線幅より狭い線幅を有するレーザ光である、

請求項 2 0 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0 0 0 1】

[関連出願]

この出願は、2013 年 2 月 1 日に提出された米国仮出願第 61 / 759 , 979 号明細書および 2013 年 2 月 15 日に提出された米国仮出願第 61 / 765 , 288 号明細書の優先権の利益を主張する。それらの各々は、参照によって本明細書にその全体が組み込まれる。

【0 0 0 2】

低速光をサポートするフォトニック構造は、関心ある重要なトピックである。その部分的な理由は、多くの重要な用途が、光の群速度を制御する能力から利益を享受するからである。電子レベルでの干渉を使用して毎秒複数メートルの記録的な群速度が実現され得るが (材料低速光) (Nature の第 397 , 594 巻 (1999) における、L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton および C. H. Behroozi による「Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas」を参照)、現在までに現れてきた主な実用的低速光構造は、概してより安定的であって実用的であるという理由から、複数の optical wave 光波間 (構造的低速光) の干渉を利用している。

【0 0 0 3】

これらのデバイスのうち最も傑出したものは、(例えば、Nature Comm.、第 2 , 296 巻 (2011 年 5 月) における F. Morichetti, A. Canciamilla, C. Ferrari, A. Samarelli, M. Sorel および A. Melloni による「Travelling-wave resonant four-wave mixing breaks the limits of cavity-enhanced all-optical wavelength conversion」; Opt. Express、第 12 巻、第 1、90-103 (2004 年 1 月) における J.K.S. Poon, J. Scheuer, S. Mookherjee, G.T. Paloczi, Y.Y. Huang および A. Yariv による Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides ; Opt. Express、第 15 巻、第 25、17273-17282 (2007 年 12 月) における F. Morichetti, A. Melloni, A. Breda, A. Canciamilla, C. Ferrari および M. Martinelli による「A reconfigurable architecture for continuously variable optical slow-wave delay lines」; J. Opt. Soc. Am. B、第 21 巻、第 9、1665-1673 (2004 年 9 月) における F. Xia, L. Sekaric および Y. Vlasov による「Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines」; Nature Photonics 第 1 巻、65-71 (2007 年 1 月) における F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov による「Ultracompact optical buffers on a silicon chip」; J. of Lightwave Technol.、第 24 巻、第 5、2207-2218 (2006 年 5 月) における T. Barwicz, M. A. Popović, M.R. Watts, P.T. Rakich, E.P. Ippen および H.I. Smith による「Fabrication of Add-Drop Filters Based on Frequency-Matched Microring Resonators」; IEEE Photonics Technol. Lett.、第 16 巻、第 10 号、2137-2139 (2004 年 10 月) における B.E. Little, S.T. Chu, P.P. Absil, J.V. Hryniewicz, F.G. Johnson, F. Seiferth, D. Gill, V. Van, O. King および M. Trakalo による「Very high-order microring resonator filters for WDM applications」; Opt. Express、第 19 巻、第 22、22227-22241 (20

10

20

30

40

50

11年10月)におけるT. LeiおよびA.W. Poonによる「Modeling of coupled-resonator optical waveguide (CROW) based refractive index sensors using pixelized spatial detection at a single wavelength」を参照)、これは、通信並びに光学コンピューティングアド・ドロップフィルタ(J. of Lightwave Technol., 第24巻、第5、2207-2218(2006年5月)におけるT. Barwicz、M. A. Popović、M.R. Watts、P.T. Rakich、E.P. IppenおよびH.I. Smithによる「Fabrication of Add-Drop Filters Based on Frequency-Matched Microring Resonators」)およびWDMフィルタ(IEEE Photonics Technol. Lett., 第16巻、第10、2137-2139(2004年10月)におけるB.E. Little、S.T. Chu、P.P. Absil、J.V. Hryniewicz、F.G. Johnson、F. Seiferth、D. Gill、V. Van、O. KingおよびM. Trakaloによる「Very high-order microring resonator filters for WDM applications」)のための、波長変換器(Nature Comm., 第2巻、296(2011年5月)におけるF. Morichetti、A. Canciamilla、C. Ferrari、A. Samarelli、M. SorelおよびA. Melloniによる「Travelling-wave resonant four-wave mixing breaks the limits of cavity-enhanced all-optical wavelength conversion」)、遅延線、及び、バッファ(Opt. Express、第15巻、第25、17273-17282(2007年12月)におけるF. Morichetti、A. Melloni、A. Breda、A. Canciamilla、C. FerrariおよびM. Martinelliによる「A reconfigurable architecture for continuously variable optical slow-wave delay lines」; J. Opt. Soc. Am. B、第21巻、第9号、1665-1673(2004年9月)におけるK.S. Poon、J. Scheuer、Y. XuおよびA. Yarivによる「Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines」; Nature Photonics、第1巻、65-71(2007年1月)におけるF. Xia、L. SekaricおよびY. Vlasovによる「Ultracompact optical buffers on a silicon chip」)と同様に多様化された用途に対して研究されてきた結合共振導光路(CROW)と、非常に広範囲に亘るセンサ(Opt. Express、第19巻、第22、22227-22241(2011年10月)におけるT. LeiおよびA.W. Poonによる「Modeling of coupled-resonator optical waveguide (CROW) based refractive index sensors using pixelized spatial detection at a single wavelength」; カリフォルニア州サンフランシスコPhotonics WestでのAdvances in Slow and Fast Light VでのSPIE Proc., 第8273巻、82730W(2012年1月)におけるM.J.F. Digonnet、H. Wen、M.A. TerrelおよびS. Fanによる「Slow Light in Fiber Sensors」; J. of Lightwave Technol. (2012)に提出されたH. Wen、G. Skolianos、S. Fan、M. Bernier、R. ValleeおよびM.J.F. Digonnetによる「Slow-light fiber-Bragg-grating strain sensor with a 280-femtostrain/ Hz resolution」; IEEE Sensors J., 第12巻、第1、156-163(2012年1月)におけるH. Wen、M. Terrel、S. FanおよびM.J.F. Digonnetによる「Sensing with slow light in fiber Bragg gratings」; Photonics Technol. Lett. 第24巻、第4号、270-272(2012年2月)におけるC. Delezoide、その他による「Vertically coupled polymer microracetrack resonators for label-free biochemical sensors」)である。CROWは、広い帯域幅に亘って低速光を生成する能力を含めて、リング共振器のような単一共振器では容易に入手できない多くの光特性を処理する。

【0004】

Sumetskyによって提案されるコイル光共振器(COR)もまた周知である(Opt. Express、第12巻、第10、2303-2316(2004年5月)におけるM. Sumetskyによる「Optical fiber microcoil resonator」; Opt. Express、第13巻、第11、4331-4340(2005)におけるM. Sumetskyによる「Uniform coil optical resonator and waveguide: transmission spectrum, eigenmodes, and dispersion relation」; Postdeadline papersでのProc. of Optical Fiber Comm. Conf. 2007のpaper PDP46におけるM. Sumetsky、Y. DulashkoおよびM. Fishteynによる「Demonstration of a multi-turn microfiber coil resonator」を参照)。これは、3次元コイルで巻かれて複数のループ間で分布結合された導波路から成る。CORは、コイルにおけるループの数に応じて、プレーナ型結合デバイスより小さな設置面積を提供しつつ、CROWまたはリング共振器と同様の興味深い共振特性を示す。例えば、そのような構造は、決定的に結合係数に依存する群遅延を示し、固

10

20

30

40

50

有モードを示し、広範に適合され得る特性を有し得る。しかしながら、それらは3次元なので、本質的に製作するのが困難である(Proc. of Optical Fiber Comm. Conf. 2007、paper PDP46におけるM. Sumetsky、Y. DulashkoおよびM. Fishteynによる「Demonstration of a multi-turn microfiber coil resonator」を参照)。

【発明の概要】

【0005】

複数の特定の実施形態において、光デバイスは、複数の細長部分を有する少なくとも1つの導光路を備える。光は、連続的に、概して複数の細長部分に沿って伝搬する。複数の細長部分のうち少なくとも2つの細長部分は、互いに概して同一平面にあり、互いに隣接して概して平行である。光が少なくとも2つの細長部分に概して沿って伝搬するに連れて、少なくとも2つの細長部分に概して直交する方向において、光が少なくとも2つの細長部分間で結合されるように、少なくとも2つの細長部分は互いに光学的に結合される。

10

【0006】

複数の特定の実施形態において、少なくとも1つの導光路は螺旋状導光路を備えることができ、その一方で、他の複数の特定の実施形態においては、少なくとも1つの導光路は複数のネスト型導光路を備えることができる。少なくとも1つの導光路は、概して円形、長方形若しくは正方形を有し得、又は、アルキメデスの螺旋形を有し得る。少なくとも2つの細長部分は、実質的に直線であり得、実質的に等しい長さを有し得る。複数の細長部分は更に、湾曲して実質的に異なる長さを有する、2つ又はそれより多くの細長部分を備えることができる。2つ又はそれより多くの細長部分は、実質的に整合する位相シフトを有することができる。実質的に直線である少なくとも2つの細長部分は、それらの間における第1結合係数を有することができる、湾曲した2つ又はそれより多くの細長部分は、それらの間における第2結合係数を有することができる。光の波長での第2結合係数は、光の波長での第1結合係数より小さい。複数の細長部分は、湾曲して実質的に異なる長さを有し、実質的に等しい光学的長さを有する、2つ又はそれより多くの細長部分を備えることができる。

20

【0007】

少なくとも2つの細長部分に概して直交する方向は、少なくとも2つの細長部分と概して同一平面にあることができる。光デバイスは、少なくとも2つの細長部分間において少なくとも1つの領域を備えることができる。少なくとも1つの領域は、少なくとも2つの細長部分に概して直交する方向において少なくとも2つの細長部分間で予め定められた結合係数を提供するように構成される材料を含む。少なくとも1つの導光路は、単一モード導波路を含むことができる。

30

【0008】

複数の特定の実施形態において、光デバイスは、第1細長部分と、第1細長部分に隣接して概して平行である第2細長部分とを少なくとも有する、少なくとも1つの導光路を備える。光は、第1細長部分の中へと伝搬し、概して第1細長部分に沿って伝搬し、第2細長部分の中へと伝搬し、そして、概して第2細長部分に沿って伝搬する。光が第1及び第2細長部分に概して沿って伝搬するに連れて、第1及び第2細長部分に概して直交する方向において、光が第1及び第2細長部分間で結合されるように、第1及び第2細長部分は互いに光学的に結合される。光は、第1細長部分に沿って伝搬する間は第1位相シフトを受け、第2細長部分に沿って伝搬する間は第2位相シフトを受ける。第1位相シフトは、第2位相シフトと異なる。

40

【0009】

第1細長部分は第1の長さを有することができる、第2細長部分は第2の長さを有することができる、第1の長さは第2の長さより大きい。第1及び第2細長部分は、湾曲し得る。第1位相シフトと第2位相シフトとの差は、2の0を除く倍数であり得る。光デバイスは、第1細長部分と第2細長部分との間において、第1細長部分と第2細長部分との間の結合係数を低減するように構成される材料を備えることができる。当該材料は、空気を含むことができる。

50

【0010】

複数の特定の実施形態において、光デバイスは、複数の細長部分を含む少なくとも1つの導光路を備える。光は、連続的に概して複数の細長部分に沿って伝搬する。複数の細長部分のうち少なくとも2つの細長部分は、互いに概して同一平面にあり、互いに隣接して概して平行である。光が少なくとも2つの細長部分に概して沿って伝搬するに連れて、少なくとも2つの細長部分に概して直交する方向において、光が少なくとも2つの細長部分間で結合されるように、少なくとも2つの細長部分は互いに光学的に結合される。少なくとも1つの導光路は、ある領域を横切って延伸し、光を受信して、光が少なくとも1つの導光路を伝搬した後に、光を放出するように構成される少なくとも1つの部分を備える。当該少なくとも1つの部分は、当該領域の外側境界に又はその近くに配置される。

10

【0011】

光デバイスは、反射部分を備えることができる。受信された光は、少なくとも1つの部分から少なくとも1つの導光路の第1部分を通して伝搬し、反射部分から反射し、少なくとも1つの導光路の第2部分を通して少なくとも1つの部分へと伝搬する。少なくとも1つの部分は、光を受信するように構成される入力部分と、光が少なくとも1つの導光路を通して伝搬した後に、光を放出するように構成される出力部分とを含むことができる。少なくとも1つの導光路は、自身を通して巻かれた螺旋状導光路を備えることができる。少なくとも1つの導光路は、互いにオフセットされた複数のループを備えることができる。複数のループの2つ又はそれより多くのループは、互いに交差することができる。

20

【0012】

複数の特定の実施形態において、外乱を感知する方法が提供される。方法は、光を少なくとも1つの導光路に入力する段階を含む。少なくとも1つの導光路は、複数の細長部分を備える。光は、連続的に概して複数の細長部分に沿って伝搬し、複数の細長部分のうち少なくとも2つの細長部分は、互いに概して同一平面にあり、互いに隣接して概して平行である。光が少なくとも2つの細長部分に概して沿って伝搬するに連れて、少なくとも2つの細長部分に概して直交する方向において、光が少なくとも2つの細長部分間で結合されるように、少なくとも2つの細長部分は互いに光学的に結合される。方法は更に、少なくとも1つの導光路から伝送される光の少なくとも一部を検出する段階を含む。

【0013】

外乱は、少なくとも1つの導光路の少なくとも一部に適用される歪みの変化、少なくとも1つの導光路の少なくとも一部に適用される温度の変化、及び、少なくとも1つの導光路の少なくとも一部の屈折率の変化の少なくとも1つを含むことができる。光は、螺旋状導光路の伝送スペクトルピークでの波長、又は、0ではない傾きと伝送スペクトルピークの線幅より狭い線幅とを有する伝送スペクトルピークの傍らでの波長を有するレーザ光であることができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1A】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、複数の隣接するアーム間の結合を有する $N = 2$ のアームを備えた、アルキメデスの螺旋の形の例示的光デバイス（例えば結合螺旋共振器）を概略的に示している。

40

【図1B】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、複数の隣接するアーム間の結合を有する $N = 6$ のアームを備えた、アルキメデスの螺旋の形の例示的光デバイス（例えば結合螺旋共振器）を概略的に示している。

【図2】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、 $N = 2$ のアームを備えた（より大きな範囲の結合係数を示しているインセットを備えた）アルキメデスの結合螺旋導波路に対する、結合係数へのピーク（共振）伝送の算出された依存性を示している。

【図3】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、 $N = 2$ のアーム、及び、図2と同じ複数のパラメータ値を備えたアルキメデスのCSWに対して、漸近的に大きい共振結合係数で、算出された群遅延スペクトルを示している。

【図4A】特定の波長共振の近傍における、図3のアルキメデスのCSWの伝送および群

50

遅延スペクトルの波長への算出された依存性を示している。

【図 4 B】図 3 のアルキメデスの螺旋導波路に対する、性能指数（例えば、図 4 A の伝送スペクトルと群遅延スペクトルとの積）を示している。

【図 5】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、アルキメデスの螺旋導波路において位相整合を提供する、第 1 アームおよび第 2 のアームでの複数の実効屈折率の分布のプロットである。

【図 6】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、角度位置 に沿って変化する実効屈折率を備えるアルキメデスの螺旋導波路に対する、共振波長での伝送を結合係数の関数として示している。

【図 7 A】共振結合係数でプロットされた図 5 と同じく位相整合したアルキメデスの C S W に対して、算出された伝送スペクトルおよび群遅延スペクトルを示している。

10

【図 7 B】共振結合係数でプロットされた図 5 と同じく位相整合したアルキメデスの C S W に対して、算出された伝送スペクトルおよび群遅延スペクトルを示している。

【図 8】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、 $N = 4$ のアームを備える概して長方形の C S W を概略的に示している。

【図 9】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、 $N = 2$ のアームを備える四角形の C S W に対して、結合係数 に対する共振時の算出されたピーク伝送を示している

。【図 10】図 8 の四角形の C S W に対する、性能指数（例えば、伝送スペクトルと群遅延スペクトルとの積）の波長への算出された依存性を示している。

20

【図 11 A】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、四角形の C S W に対して、波長および正規化された結合係数 K に対する伝送用の等高線図を示している。

【図 11 B】図 11 A の四角形の C S W の群遅延に対して、及び、同じ範囲の複数のパラメータに対して、対応する等高線図を示している。この図において特定される複数の共振座標で、すなわち、 $\lambda = 1550.00 \text{ nm}$ および $S = 0.374$ で、群遅延は無限になる。

【図 11 C】図 11 A の四角形の C S W の波長および正規化された結合係数 K の関数としての実効群遅延を示している。

【図 11 D】図 11 C における共振波長に沿った切断面を示している。

【図 12】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、 $N = 2$ のアームを備える四角形の C S W に対する、最も低い共振結合係数に対して算出されたピーク伝送スペクトルを示している。

30

【図 13】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、図 12 と同じ $N = 2$ のアームを備える四角形の C S W に対する、最も低い共振結合係数に対して算出された群遅延スペクトルを示している。

【図 14】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、図 12 と同じ $N = 2$ のアームを備える四角形の C S W に対する、図 13 より幅広い波長範囲に亘る群遅延スペクトルを示している。

【図 15】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、図 12 のような $N = 2$ のアームを備える四角形の C S W に対する、図 14 の波長範囲に亘る実効群遅延スペクトルを示している。

40

【図 16】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、四角形の C S W に対するアーム N の数への、最大性能指数（例えば、伝送スペクトルと群遅延スペクトルとの積）の算出された依存性を示している。

【図 17】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、光源と、少なくとも 1 つの光結合器と、螺旋状導光路と、少なくとも 1 つの光検出器とを備える例示的センサシステムを概略的に示している。

【図 18】中心支持型ディスクまたは周縁支持型ディスクに取り付けられた結合螺旋導波路または干渉計の 2 つの構成を概略的に示している。

【図 19 A】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、導波路が自身を通過して

50

巻かれた概して長方形のCSWを概略的に示している。

【図19B】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、螺旋導波路の複数のアームを横切って延伸する出力部分を有する、例示的螺旋導波路を概略的に示している。

【図20】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、螺旋導波路が複数のオフセットされたループを備える、概して長方形のCSWを概略的に示している。

【図21】 $N = 2$ から $N = 6$ までの $B - K$ スペースにおける、群遅延に対する複数の等高線図を示している。

【図22】4つのアームを備える螺旋導波路に対する結合への、群遅延スペクトルの依存性を示している。

【図23】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、 $N = 2n$ の偶数個のアームと、シーケンス $(k, 0, k, 0, \dots, 0)$ に従う複数の結合係数 $(k_1, k_2, k_3, k_4, \dots, k_{2n})$ を備える位相整合のアルキメデスの螺旋導波路を概略的に示している。

【図24】螺旋状導光路でのアームの数が増大されるに連れて、伝送スペクトルでの広がり示している。

【図25】ほぼ $N^{1/2}$ として増大する多くのアームと共に成長する複数の伝送共振の $3 - dB$ 帯域幅を示している。

【図26】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、導波路の実効屈折率がペア1からペア2、ペア n へと僅かに増大する、螺旋状導光路を概略的に示している。

【図27】 $N = 2, 6, 10, 14$ 及び 20 に対する、図26の螺旋導波路の群屈折率スペクトルを示している。

【図28】アーム N の数の関数としての群遅延スペクトルの広がり示している。

【図29】強くて非常に局在化した複数の共振を備える例示的群遅延スペクトルを示している。

【図30】本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、例示的な複数のネスト型導光路を概略的に示している。

【図31】結合器での例示的なネスト型導波路構造の一部を概略的に示している。

【図32】結合係数 μ の関数として、 $N = 2$ の単一モード導波路（例えば複数のリング）を備えるネスト型構造の共振周波数でシミュレートされた伝送を示している。

【図33】 $\mu = \mu_{opt}$ で操作される図32のネスト型導波路構造の伝送スペクトルを示している。

【図34】図33に示されているのと同じ共振の近傍で、光波長の関数として、図32のネスト型導波路構造において光によって受けられるシミュレートされた群遅延を示している。

【図35】図33のスペクトルと図34のスペクトルとの積を示している。

【発明を実施するための形態】

【0015】

本明細書で説明される複数の特定の実施形態は、新規な分類の光デバイスを含み、これは代替的に、結合螺旋共振器、螺旋干渉計または結合螺旋導波路（CSW）と呼ばれ得る。複数の特定の実施形態において、複数のCSWは、実質的に複数のCROWより小さな設置面積において、新しい複数の機能性だけでなく、同様の複数の特性を示す。図1Aは、本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、らせん状に巻かれることで、複数の隣接するアーム14間の結合を有する $N = 2$ のアーム14a、14bを備えたアルキメデスの螺旋になる螺旋状導光路12を有することができる、少なくとも1つの導光路を備える例示的光デバイス10を概略的に示している。図1Bは、本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、らせん状に巻かれることで、複数の隣接するアーム14間の結合を有する $N = 6$ のアーム14aから14fを備えたアルキメデスの螺旋になる螺旋状導光路12を有する、少なくとも1つの導光路を備える例示的光デバイス10を概略的に示している。図1Aおよび1Bの各例示的光デバイス10は、光が概して複数の部分14に沿う方向で1つの部分から次へと連続的に伝搬する複数の細長部分14a、14b、 \dots （これらはまた、本明細書で複数の「アーム」14と呼ばれる）を有する螺旋導波路1

10

20

30

40

50

2 (例えば、螺旋形状に巻きつけられ、成形され、又は、形成されるプレーナ型導波路)を備える。以下でより十分に説明されるように、複数の特定の形態において、少なくとも1つの導光路は、螺旋状導光路12を備えない。例えば、図29に概略的に示されるように、少なくとも1つの導光路は、複数のネスト型導光路22を備えることができる。

【0016】

螺旋導波路12は、それ自体の上になんらかの形状に巻かれる(例えば、光が概して複数のアームに沿う方向で1つのアームから次へと順に伝搬する複数のアームを備えることができ、複数のアームの2つ又はそれより多くは、互いに概して平行に、互いに隣接するように構成される)。隣接する複数の細長部分14は、光が、螺旋導波路12に沿って伝搬するに連れて、隣接する複数の細長部分14間で結合(例えば2つの実質的に平行で隣接する細長部分間で側面結合)されるように(例えば継続的に結合されるように)、互いに光学的に結合される。この結合によって、光の少なくとも一部が、半径方向で(例えば、複数の細長部分に概して直交する方向で)前後に移動することを可能にする。実質的に平行で隣接する複数のアーム14は、COR内のように、光が複数のアーム14間で継続的に結合されるように、それらの間で十分小さい間隔を有することができる。しかしながら、CORと異なり、本明細書で説明される複数の特定の形態は、隣接する複数のアーム14が互いに実質的に同一平面にある導波路12を備える。

【0017】

本明細書で使用されるように、「連続する結合」という用語は、当業者によって理解されるように、それ自体の最も広くて妥当な解釈を有し、細長部分14の実質的に全長に沿って生じる結合を含むが、これに限定されない。例えば、複数の特定の形態において、連続する結合は、実質的に一定の結合係数で、細長部分14の全長に沿って生じるが、その一方で、複数の特定の他の形態においては、当該結合は、細長部分14に沿う位置で異なる結合係数で、細長部分14の全長に沿って生じる。複数の特定の他の形態において、当該結合は、複数の細長部分14の複数の予め定められた領域に沿って生じるだけであり、これらの領域は、殆ど結合していない又は全く結合していない他の複数の領域によって互いから離間される(これは、「不連続な結合」と呼ばれ得る)。

【0018】

光は、螺旋導波路12の長さに沿って伝搬するに連れて、内方(例えば複数の外側アームから複数の内側アームに)及び外方(複数の内側アームから複数の外側アームに)の両方向に結合され、その結果として、光の群速度を低下できる2つのミラー間での複数の前後反射と類似するメカニズムが生じる。CORとの複数の顕著な差は、(1)複数の特定の形態の螺旋導波路12は複数の2次元構造であり、従って、製作することがより容易であり、(2)螺旋導波路12の複数のアーム14が複数の異なる長さを有し、これは、螺旋導波路12が、どんな形状に対し、どんな条件下で、複数の共振をサポートするかという疑問を生じさせ、(3)螺旋導波路12における結合の少なくとも幾つかは、複数の等しくない長さを有する湾曲した複数のアーム14間で生じ、これは、結合を妨げて複数の共振の強度を低減できることである。

【0019】

螺旋導波路12は、図1Aおよび1Bによって概略的に示されるようなアルキメデスの形状を有することができる。又は、例えば、四角形或いは矩形形状(以下でより十分に説明される)、三角形状、六角形状、楕円形状、若しくは、より少ない対称的幾何学パターン、或いは、より多い任意形状の、複数のパターン又はデザインといった、何らかの他の形状を有することができる。これらの形状の複数のコーナーは、尖っていることもできる(例えば小さい径の湾曲)、丸みを帯びることもできる(例えば大きい径の湾曲)。螺旋導波路12は、複数のプレーナ型若しくは非プレーナ型の基板上で、複数の光学ナノワイヤ、複数の統合導光路、複数のペグの複数の周期的配置を利用する複数のフォトニックバンドギャップ構造、複数のホール、又は、複数の異なる屈折率を備える複数の材料を含むがこれに限定されない、多数のテクノロジーを実装されることができる。螺旋導波路12に入力される光は、例えば、螺旋導波路12を干渉光源(例えばレーザ)に結合する、複

10

20

30

40

50

数のプレーナ型導波路製の結合器若しくはファイバ結合器といった光結合器によって、又は、多くの他の方法によって提供されることができる。螺旋導波路12からの出力光は、以下でより十分に説明されるように、螺旋導波路12の内側の出力部に検出器を配置することによって、又は、多くの他の方法によって、収集されることができる。

【0020】

本明細書で説明される複数の特定の実施形態と互換性のある複数の構造は、従来の複数のマイクロ製作技術で容易に製作されることができる。例えば、窒化シリコン導波路12は、シリコンウェハ上の酸化シリコンに組み込まれるように形成されることができる。窒化シリコンは、極めて低い伝搬損失（ $\sim 0.7 \text{ dB/m}$ ）を備える複数の導波路となることを示されてきたので、特に魅力的である（Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers ConferenceにおけるJ.F. Bauters、M.J.R. Heck、D.D. John、J.S. Barton、D.J. BlumenthalおよびJ.E. Bowersによる「A comparison of approaches for ultra-low-loss waveguides」を参照）。複数の特定の実施形態において、非常に高いフィネス、又は、同等に、高い群屈折率若しくは低い群速度を実現すべく、損失は低く保たれる。

【0021】

本明細書で説明される複数の特定の実施形態と互換性のある、考え得る幅広い範囲の螺旋形状および構成がある（シングルパス、ダブルパス、それ自体を通して巻かれる螺旋、その他）。加えて、関心ある多数の特性（共振の存在、複数の共鳴条件、伝送スペクトル、群速度スペクトル、分散、低速光帯域幅、その他）と、これらの特性に強い影響を与える同等に多数の設計パラメータ（結合係数、螺旋長、アーム間隔、湾曲半径、その他）とがある。本明細書で説明される複数の特定の実施形態（例えばCSW）と互換性のある導波路12の幾つかの特性を明らかにすべく、以下の説明は、2つの特定の螺旋導波路12、すなわち、アルキメデスの螺旋導波路12および長方形の螺旋導波路12の理論研究を含む。アルキメデスの螺旋（その複数の例は、図1Aおよび1Bによって概略的に示されている）は、ほぼ最適なコンパクト性を提供し、導波路12の湾曲半径を最大化するので、関心ある。この特徴は、屈曲損失を最小化するので重要であり得、それ自体は、複数の低い群速度を実現しようと試みる場合に決定的であり得る。本開示は、この新しいタイプの干渉計の第1理論研究を提供し、好適な設計で、非常に小さい設置面積において、それら複数の干渉計が非常に大きな群遅延で光を実際にサポートでき、それらを既存のCROWデバイスに対する実行可能なコンペティターにすることを示す。

【0022】

[複数の結合螺旋導波路のモデル]

角周波数 ω の与えられた入力電界 E_{in} に対して、結合螺旋導波路（CSW）12の複雑な出力フィールド E_{out} 、及び、複雑な電界通信 $t = E_{out} / E_{in}$ はモデル化されることができる。CSWに沿う電界は、複数のCORに対して予め導出されたものと同様の複数の結合された微分方程式によって説明されることができるが（Opt. Express、第13巻、第11、4331-4340（2005）におけるM. Sumetskyによる「Uniform coil optical resonator and waveguide: transmission spectrum, eigenmodes, and dispersion relation」を参照）、光学位相が複数のアーム14の各々において異なるレートで累積する重要な変形を備える。螺旋（第1の（入力）アームに対応する $j = 1$ 、及び、最後の（出力）アームに対応する $j = N$ ）のアームに沿って伝搬する定常電磁場は、 $E_j(z) = U_j(z) \exp(i z) \exp(i t)$ として表される。 $U_j(z)$ は波の振幅であり、 β_j は波の角周波数であり、 t は時間であり、 z はアームに沿う線形座標である（ $0 < z < S_j$ 、 S_j はアーム j の境界線である）。複素伝搬定数 β_j は、以下の数式（1）である。

【数1】

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} + i \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

λ は真空での光の波長であり、 α は導波路モードのパワー損失係数であり

10

20

30

40

50

(この説明の複数の目的で、これは基本的な直線偏光モードであると仮定される)、 n_{ef} はモード実効屈折率である。複数の円柱座標 (r 、 θ) において (図 1 A を参照)、CSW に沿うこれらの N フィールドの発達を説明している複数の結合された方程式は、以下の数式 (2) である。

【数 2】

$$\frac{dU_1(\theta)}{d\theta} = i\beta R_1(\theta)U_1(\theta) + k_{21}(\theta)U_2(\theta)$$

...

$$\frac{dU_j(\theta)}{d\theta} = i\beta R_j(\theta)U_j(\theta) + k_{j-1,j}(\theta)U_{j-1}(\theta) + k_{j+1,j}(\theta)U_{j+1}(\theta)$$

(2)

...

$$\frac{dU_N(\theta)}{d\theta} = i\beta R_N(\theta)U_N(\theta) + k_{N-1,N}(\theta)U_{N-1}(\theta)$$

【0023】

これらの方程式の各々において、第 1 項は、アーム j に沿うモードの伝搬 (位相および振幅) を表わす。それは、アーム j の半径である R_j (θ) に比例し、様々なアームにおける伝搬位相差の原因となる。第 2 項は、アーム j と前のアーム $j-1$ との間における光の結合を説明し、複数の複雑な結合係数 $k_{j-1,j}$ によって特徴付けられる。第 1 アーム ($j=1$ 、第 1 方程式) に対しては、前のアームは存在しない。従って、この項は表われない ($k_{0,1}=0$)。第 3 項は、アーム j と次のアーム $j+1$ との間における結合を説明し、複数の結合係数 $k_{j,j+1}$ によって特徴付けられる。最後のアーム ($j=N$ 、最後の方程式) に対しては、次のアームは存在しない。従って、この項は存在しない ($k_{N+1,N}=0$)。複数の結合係数 $k_{i,j}$ は、相互ラジアン単位である。例えば、もし複数のアーム間の間隔が一定ではない、又は、導波路の正規化された周波数が β の関数であるならば、それらは β に依存し得る。保存されるエネルギーに対して、導波路に損失が有ろうが無かろうが、数式 (2) は、 $k_{j-1,j} = -k_{j,j-1}^*$ という条件を満たすべきである (Appl. Opt., 第 19 巻、398-403 (1980) における Y. Murakami による「Coupling between curved dielectric waveguides」を参照)。相互長の単位である従来の複数の結合係数 κ_j は、 $\kappa_j = k_{j,j+1} / R_j$ として定義される。(複数のエネルギー保存の理由で) R_j はアーム j の平均半径である。

【0024】

複数のフィールドが、隣接する複数のアーム間の複数の連結点において連続であるべき条件は、以下の数式 (3) における複数の $N-1$ 連続関係を課す。

【数 3】

$$U_{j+1}(0) = U_j(2\pi)e^{i\beta S_j} \quad (3)$$

【0025】

これらの連続条件を受ける複数の結合された方程式 (数式 (2)) は、例えば、転送行列法 (ここで報告される複数のシミュレーションで使用されるアプローチ)、又は、ルンゲクッタ法を使用して、数的に解かれることができる。代替的に、幾つかの簡単な構成に対し、複数の閉形表現が、伝送および群遅延スペクトルに対して得られることができる。これは、それ自体の複数の共鳴条件を含めて、干渉計の振る舞いに対する有用な見識をもたらす。

【0026】

このためにも、 $N=2$ のアームを備える螺旋導波路の特定の場合を考える。数式 (2) の一般的な解決策は、以下の数式 (4) の形で表されることができる。

10

20

30

40

【数 4】

$$\begin{aligned}
 U(\theta) &= A(\theta) \exp\left(i\beta \int_0^\theta R_1(\varphi) d\varphi\right) \\
 V(\theta) &= B(\theta) \exp\left(i\beta \int_0^\theta R_2(\varphi) d\varphi\right)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

これにより、複数の結合された方程式および連続条件が、以下の数式(5)、数式(6)として書き換えられることができる。

【数 5】

10

$$\begin{aligned}
 \frac{dA(\theta)}{d\theta} &= k_1(\theta) B(\theta) \exp\left(+i\beta \int_0^\theta \Delta R(\varphi) d\varphi\right) \\
 \frac{dB(\theta)}{d\theta} &= k_2(\theta) A(\theta) \exp\left(-i\beta \int_0^\theta \Delta R(\varphi) d\varphi\right)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

【数 6】

$$A(2\pi) \exp\left(i\beta \int_0^{2\pi} R_1(\varphi) d\varphi\right) = A(2\pi) \exp(i\beta S_1) = B(0)
 \tag{6}$$

20

【数 7】

$$\Delta R(\varphi) = R_2(\varphi) - R_1(\varphi)$$

および

【数 8】

$$S_1 = \int_0^{2\pi} R_1(\varphi) d\varphi$$

は、第1アームの境界線である。数式(5)において、

【数 9】

30

$$\beta \Delta R(\varphi) d\varphi$$

は、光が角距離 d を伝搬するに連れて、アーム1および2の複数のフィールドによって蓄積される位相不整合である。

【0027】

[2つのアームを備えるアルキメデスのCSWの複数の特性]

アルキメデスの螺旋導波路の形状は、

【数10】

$$R(\theta) = R_0 - \frac{a}{2\pi} \theta$$

40

によって説明される。 R_0 は、入力ポート($\theta = 0$)での螺旋半径であり、 a は、一定の中心間アーム間隔である。次に、数式(5)において、

【数11】

$$\Delta R(\varphi) = -a$$

は定数である。連続条件(数式(6))を受ける数式(5)の複数の直接操作は、以下の数式(7a)、数式(7b)の螺旋導波路に沿う界分布をもたらす。

【数 1 2】

$$A(\theta) = \frac{C + a\beta/2}{k^*} \mu e^{i(C-a\beta/2)\theta} - \frac{C - a\beta/2}{k^*} \nu e^{-i(C+a\beta/2)\theta} \quad (7a)$$

【数 1 3】

$$B(\theta) = e^{+ia\beta/2} (\mu e^{iC\theta} + \nu e^{-iC\theta}) \quad (7b)$$

ここで、

【数 1 4】

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{(C + a\beta/2)e^{-i2\pi C} + k^* e^{-i\beta S}}{C e^{-i\beta S} - ik \sin(2\pi C)} \quad (8a) \quad 10$$

【数 1 5】

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{(C - a\beta/2)e^{i2\pi C} - k^* e^{-i\beta S}}{C e^{-i\beta S} - ik \sin(2\pi C)} \quad (8b)$$

であり、

【数 1 6】

$$C = \sqrt{|k|^2 + (a\beta/2)^2} \quad (9) \quad 20$$

は、項 $a\beta/2$ によって表わされる、それらの間での位相不整合を含む、複数の結合されたアームの実効結合係数である。この結果は、以下のように、容易に解釈されることができる。伝搬定数不整合 $\Delta\beta$ を備える 2 つの結合導波路に対する実効結合係数が、

【数 1 7】

$$\sqrt{|k|^2 + (\Delta\beta/2)^2}$$

である (Appl. Opt. Vol. 19, 398-403 (1980) における Y. Murakami による「Coupling between curved dielectric waveguides」; Appl. Opt. Vol. 20, 417-422 (1981) における Y. Murakami および S. Sudo による「Coupling characteristics measurements between curved waveguides using a two-core fiber coupler」を参照)。 R_0 は (およそ) 螺旋導波路の平均半径であって、 $k = R_0$ を代入することによって、この表現は、

【数 1 8】

$$\text{radian}^{-1} k_{eq} \approx \sqrt{|k|^2 + (\Delta\beta R_0/2)^2}$$

における実効結合係数を与える。アルキメデスの螺旋導波路において、角距離 $\Delta\phi$ に対する位相不整合は、

【数 1 9】

$$\Delta\phi = \beta(R_1(\phi) - R_2(\phi))\Delta\phi = a\beta\Delta\phi \quad 40$$

である。もし複数の対面する導波路が伝搬不整合 $\Delta\beta$ を有するけれども同じ長さを有していたならば、角距離に対する位相不整合は、

【数 2 0】

$$\Delta\phi = \Delta\beta R_0 \Delta\phi$$

であっただろう。 k の二つの表現を識別することで、

【数 2 1】

$$\Delta\beta R_0/2 = a\beta/2$$

がもたらされる。 k の表現においてこれを置換することで、数式 (9) と一致する 50

【数 2 2】

$$k_{eq} \approx \sqrt{k^2 + (a\beta/2)^2}$$

が与えられる。螺旋導波路は、

【数 2 3】

$$\Delta\phi = a\beta\Delta\varphi$$

の角距離 ごとに位相不整合を備える結合器のように振る舞う。

【0 0 2 8】

螺旋導波路の出力フィールドは、 $N = 2$ で評価される数式 (7 b) によって与えられ、これは、以下の数式 (10) の電界通信を与える。 10

【数 2 4】

$$t = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{C + ik^* \sin(2\pi C) e^{-i\beta S}}{C - ik \sin(2\pi C) e^{+i\beta S}} e^{+i2\beta S} \quad (10)$$

【0 0 2 9】

この表現は、位相不整合が存在するので、2つのループを備えるCORの伝送よりも複雑である。もし、複数の螺旋アームが等しい長さを有して、その構成がCORと同等である場合において、 $a = 0$ とセットすれば、 $C = k$ (数式 (9)を参照)であり、及び、数式 (10)は、 $N = 2$ のループを備えるCORの伝送の表現に縮小する (Opt. Express Vol. 12, No.10, 2303-2316 (May 2004)におけるM. Sumetskyによる「Optical fiber microcoil resonator」での方程式の数式 (10)から算出されることができる)。 20

【0 0 3 0】

螺旋導波路 (例えば干渉計)の群遅延スペクトルは、以下の方程式の数式 (11)を使用することによって、出力フィールド (数式 (10))から得られることができる (Opt. Express Vol. 13, No. 11, 4331-4340 (2005)におけるM. Sumetskyによる「Uniform coil optical resonator and waveguide: transmission spectrum, eigenmodes, and dispersion relation」を参照)。

【数 2 5】

$$\tau_g = \frac{n_{eff}}{c} \text{Im} \left[\frac{d \ln t}{d\beta} \right] \quad (11)$$

螺旋導波路の群遅延スペクトルは、数式 (11)の直接的な数的評価によって算出されることができる。

【0 0 3 1】

螺旋導波路が損失の無いものであるならば、 t が真であり (数式 (1)を参照)、数式 (11)の分子および分母は互いの複素共役であり、出力振幅は $N = 2$ を備えるCORにおけるように単一であることを、伝送 (数式 (10))の表現は示す。これは、エネルギー保存の直接的な結果である。もし損失が低いならば ($L_t \ll 1$ 、 L_t は螺旋導波路の全長)、伝送が、以下の数式 (12 a)、数式 (12 b)によって与えられる複数の共振状態と共に、周波数および結合の両方における複数の共振を示すことを、数式 (10)から容易に示されることができる。 40

【数 2 6】

$$\beta_p S = \left(p + \frac{1}{2}\right)\pi \quad (12a)$$

【数 2 7】

$$\text{sinc}(2\pi\sqrt{k^2 + (a\beta_p/2)^2}) = \frac{e^{-as/2}}{2\pi k} \quad (12b)$$

p は整数であり、S は2つのアームの平均長さである。COR と異なり、CSW においては位相不整合が k と とを結合するので、螺旋導波路の結合係数の複数の共振値は、2つのパラメータに依存する。損失が無く、k が位相不整合を支配する程大きいといった制限において、
 【数 2 8】

$$|k| \gg a\beta_p / 2$$

であり、及び、数式 (1 2 b) の複数解は、
 【数 2 9】

$$k_m = (4m + 1)/4$$

10

である。
 【 0 0 3 2】

アルキメデスの CSW の伝送および群屈折率スペクトルをシミュレーションすべく、複数の結合された方程式は、複数の正確な表現、又は、数的な変換行列アプローチのいずれか一方を使用して以下の説明で解かれた。(Photonics West, San Francisco, California, Proc. of SPIE Vol. 7949, 79490-E1 - E11 (January 2011) における H. Wen、G. Skolianos、M. J.F. Digonnet および S. Fan による「Slow Light in Fiber Bragg Gratings」を参照。) 複数のシミュレーションによって、パワー伝送 $T = |t|^2$ が実際には周波数における複数の周期的共振を示すこと、共振でのピーク伝送が結合係数に強く依存すること、が示される。この依存性を示して理解すべく、図 2 は、2つのアーム、 $a = 4 \mu m$ のアーム間隔、及び、 $R_0 = 5.598 mm$ の入力半径を備えるアルキメデスの螺旋に対して、結合係数 k に対する特定の共振 ($= 1.550010968 \mu m$) で算出される伝送を示している。この説明の複数の目的で、導波路は単一モードを伝えたと仮定され、導波路は、単一モード導波路において最も低く報告された値 (この説明において使用される値である、 $= 0.16 m^{-1}$ の損失係数 (Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference における J.F. Bauters、M.J.R. Heck、D.D. John、J.S. Barton、D.J. Blumenthal および J.E. Bowers による「A comparison of approaches for ultra-low-loss waveguides」を参照)) をもたらし示されてきたテクノロジーである、シリカクラディングにおいて窒化シリコンコアで製作される (Appl. Opt. Vol. 19, 398-403 (1980) における Y. Murakami による「Coupling between curved dielectric waveguides」を参照) ($n_{eff} = 1.98$)。

20

30

【 0 0 3 3】

図 2 は、共振波長で評価される当該 CSW の伝送の結合係数 k での発達を示している。伝送は、数式 (1 2 b) による、複数の特定の k 値での複数の共振を示す。これらの共振は、複数の低い結合係数に対して弱く、結合係数が増大するに連れて単調に増大する。k の複数のより一層高い値に縮小された同じ依存性が、図 2 のインセットにおいて表示されている。それは、複数の伝送ピークが、最終的に、非常に大きな k に対する漸近限界に到達することを示している。k での共振に対する条件 (数式 (1 2 b)) は、実際には、k が、 $1,000 rad^{-1}$ 又はそれより大きい範囲のように非常に大きくなるまで、満たされない。k での共振が満たされない (すなわち、数式 (1 2 b) が解を有さない)、より低い k の領域において、図 2 における複数のディップは、単一の最小値を有する。より大きい k の領域において、数式 (1 2 b) は複数の解を有し、図 2 における複数のディップは、以下で更に説明される他の複数の図において明らかとなるように、2つの最小値を有する。

40

【 0 0 3 4】

結合への当該強い依存性は、結合が、等しい長さの複数の湾曲した導波路間で生じる COR におけるものと異なって、複数の等しくない長さの複数の湾曲した導波路 (例えば、螺旋導波路の複数の湾曲した部分) 間で生じるといった幾何学的制約の直接的な結果である

50

。この長さの差の結果として、アルキメデスのCSWにおいて、複数の連成モードは、差分位相シフトを蓄積する。複数の異なる伝搬定数を備える複数のファイバで製作されるファイバ結合器におけるものと当に同様で (J. Opt. Soc. Am. Vol. 55, No. 3, 261-269 (March 1965) におけるA.L. Jonesによる「Coupling of optical fibers and scattering in fibers」を参照)、この位相不整合は、十分な結合を妨げ、光が低速化され得る有効性を大きく低減する。また、複数の非類似の導波路を備える結合器におけるもののよう、 k が増大されるに連れて、結合レートは、複数の連成モード間で確立される位相不整合レートに徐々に到達し、その後、超過する。最終的に、1つの結合長さ

【数30】

$$L_c = \pi / (2k) \approx \pi R_0 / (2k)$$

10

に対して、複数のモードが著しい位相不整合を確立するのに十分に遠方に移動せず、十分な結合が生じる程、 k は大きい。結合が位相不整合によってもはや影響されず、複数の共振が非常に強いという当該限界において、複数の伝送ピークは、共振 k 値に依存しない非常に小さい漸近値に到達する (図2のインセットを参照)。この説明は、実効結合係数

【数31】

$$C = \sqrt{|k|^2 + (\pi a \beta)^2}$$

(数式(9))の式と一致する。

【数32】

$$k \ll a\beta/2, C \approx a\beta/2$$

20

である場合、CSWの振る舞いは不整合によって支配され、結合は非常に弱く、複数の共振も非常に弱い。

【数33】

$$k \ll a\beta/2$$

である場合、結合は強く(完全入れ替え)、複数の伝送ピークは強くて k に依存しない。

【数33】

30

$$k \ll a\beta/2$$

という条件は、複数のアーム間の結合強度を定量化する結合長さ L_c における条件と同等に書かれることができ、すなわち、

【数34】

$$L_c \ll \lambda R / (2n_{eff} a)$$

である。例えば、 $R = 5 \text{ mm}$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $n_{eff} = 1.98$ 、及び、 $a = 4 \mu\text{m}$ に対して、結合長さは、 $\sim 489 \mu\text{m}$ よりずっと小さい、又は、315波長であることができる。 $R = 50$ の半径を有する、ずっと小さな螺旋導波路に対して、結合長さはおよそ3波長まで減少する。複数の特定の実施形態において、少なくとも1つの導光路の少なくとも2つの細長部分間の光の結合は、光の波長の300倍未満、光の波長の100倍未満、光の波長の30倍未満、光の波長の10倍未満、光の波長の3倍未満、又は、光の波長未満の結合長さに対応する。

40

【0035】

図3は、図2のインセットの漸近領域における大きい共振結合係数に対して算出された群遅延スペクトルを示している。CORにおけるように、損失が存在する場合にでさえも、共振の際に群遅延が無限になるので、図3の鉛直軸は、ラベリングされていない。しかしながら、これらの同じ共振周波数で、螺旋導波路の伝送はまた、共振であって、0に等しい。螺旋導波路デバイスは本質的に、全ての光子を無限に長く遅延させ、出力部におい

50

てこの出来事を記録すべく利用可能な光子は1つも無い。この曖昧さは、多くの用途に対して、光を遅くするデバイスの有効性を特徴付けるメトリックが、群屈折率ではなく、性能指数として次に使用され得る数量である、群遅延と伝送との積であることを認識することによって解かれることができる(この性能指数の簡単な導出を、低速光共振を利用するファイブラッググレーティング(FBG)歪みセンサに対して見出すことができる、J. of Lightwave Technol. (2012)に提出されたH. Wen、G. Skolianos、S. Fan、M. Bernier、R. ValleeおよびM.J.F. Dignonnetによる「Slow-light fiber-Bragg-grating strain sensor with a 280-femtostrain/ Hz resolution」を参照)。この導出がどのようにして、2波干渉計(例えば、サニャックまたはマッハツェンダー干渉計)であるか複数波干渉計(例えば、FBG、CROW、ファブリペロー干渉計、又は、CSW)であるかに拘らず、多くの他の干渉計測センサに適用可能であるかを知ることは容易である。この性能指数はまた、例えば光遅延線といった複数のセンサを除く、他の複数の低速光用途における信号対雑音比(SNR)を定量化すべく適用される。物理的理由は単純に、低速光を利用する任意の用途が出力パワーを測定することであり、従って、大きな群遅延だけでなく高い伝送(又は、場合によっては反射)によっても、良好なSNRを達成することが提供される。

10

【0036】

図4Aは、特定の波長共振の近傍における、図3のアルキメデスのCSWの伝送および群遅延スペクトルをプロットしている。これらのスペクトルは、図3におけるものと同じ、大きな(漸近)共振k値に対して算出された。図4Bは、性能指数、すなわち、これら2つのスペクトルの積を示している。共振の際、群屈折率は無限になるが、伝送は0になる。しかし、図4Aに示されるように、伝送が勝り、性能指数は0である。性能指数は、この0の両側にある、等しい振幅の2つの最大値を示す。これらの最大値が生じる2つの波長で、例えば歪みといった外部摂動に対する螺旋の感度は最大である。最大

20

【数35】

$$\tau_g T$$

積は10.4 nsであることに留意すべきである。結合が存在しない当該螺旋導波路による遅延は、

【数36】

$$\tau_0 = n_{eff} L_d / c = 460 \text{ ps}$$

であろう。従って、正規化された減速(slow-down)(又は減速(slowing-down))要因は、

【数37】

$$\tau_g T \tau_0 = 10.4 / 0.46 = 22.6$$

である。対比用に、強くて低損失の2cmシリカFBGの低速光共振に対して測定される最良の性能指数は、およそ960 psの τ_0 に対して、~3.5 nsである(J. of Lightwave Technol. (2012)に提出されたH. Wen、G. Skolianos、S. Fan、M. Bernier、R. ValleeおよびM. J. F. Dignonnetによる「Slow-light fiber-Bragg-grating strain sensor with a 280-femtostrain/ Hz resolution」を参照)。これは、FBGがより低い損失係数(0.1 m⁻¹)を有するので、アルキメデスのCSWに対するものより少し高い~36の減速要因に対応する。この定量比較は、予想通り、CSWの性能が他の複数の光学共振器の性能と少なくとも比較可能であり得ることを示唆している。

40

【0037】

アルキメデスのCSWにおいて、共振は、kが~1100 rad⁻¹より大きい場合に、その漸近最大に近い(図2のインセットを参照)。この値は、螺旋導波路の全体寸法に依存しない。ここで説明される特定のアルキメデスの螺旋導波路(

【数 3 8】

$$R_0 \approx 5.6 \text{ mm}$$

) に対して、これは、結合係数

【数 3 9】

$$\kappa = k/R_0 \approx 20 \text{ mm}^{-1}$$

(又は、75 μm若しくは48波長の結合長さ)に対応する。これは、例えば、1波長のオーダーの複数の結合長さを許容する、空气中でシリコンオンインシュレータを備えるリッジ導波路といった、高開口数を有する複数の導波路で容易に達成されることができる。そのような複数の構造の複数の結合長さは典型的に短くないが、代替案は、空气中において高屈折率のガラスを備えるリッジ導波路である。従って、強い結合を備える導波路は、螺旋導波路における位相不整合問題を解決すべく使用されることができる。

10

【0038】

[位相整合した複数の結合導波路の複数の特性]

位相不整合問題を取り除く他の方法は、長方形の螺旋導波路、又は、非常に僅かな複数の直線セグメントを有する螺旋形状を備える導波路を使用できる。

【0039】

位相不整合を削除する他の解決策は、分散マネージメントである。例えば、螺旋導波路12は、螺旋導波路12の複数の対面するアーム14の複数の伝搬定数 n_{eff} が、物理長における差を補償するのに丁度良い量だけ異なるように設計されることができる。伝搬定数における当該差異は、z依存性の複数の特性を有する導波路に沿う伝搬と関連付けられた付加損失を最小化すべく断熱的であることができる(波長のスケールで遅い)。位相補償に対する条件、又は、同等に、対面する複数のアーム間での位相整合に対する条件は、以下の数式(13)である。

20

【数 4 0】

$$n_{eff,1}(\theta)R_1(\theta)d\theta = n_{eff,2}(\theta+2\pi)R_2(\theta+2\pi)d\theta \quad (13)$$

$n_{eff,1}(\)$ は第1アームにおけるモードの実効屈折率であり、 $n_{eff,2}(\)$ は第2のアームにおけるモードの実効屈折率である。両方のアームに沿って、角度位置は、0と2との間で異なる。この条件は、任意の小さい角度伝搬dに沿って、アーム1(

30

【数 4 1】

$$n_{eff,1}(\theta)R_1(\theta)d\theta$$

)およびアーム2(

【数 4 2】

$$n_{eff,2}(\theta+2\pi)R_2(\theta+2\pi)d\theta$$

)における波によって蓄積される位相が同一であることを保証する。加えて、複数の実効屈折率は、2つの導波路間の交差点で連続にされることができる(すなわち、

40

【数 4 3】

$$n_{eff,1}(2\pi) = n_{eff,2}(0)$$

)。これらの関係は、任意の多数のアームへと真っ直ぐに拡大されることができる。

【0040】

連続関係を受ける数式(13)は、多くの解を有する。それらのうちの1つは、

【数 4 4】

$$n_{eff,1}(\theta)R_1(\theta) = n_{eff,2}(\theta+2\pi)R_2(\theta+2\pi)$$

が一定、例えば、螺旋導波路への入力部で

50

【数45】

$$n_{eff,1}(\theta)R_1(\theta)$$

の値に等しいという追加の条件を課すことによって見出されることが出来る（螺旋導波路に沿う何らかの他の場所が作用し過ぎるだろう）。

【0041】

数式(13)において、アルキメデスの螺旋導波路に対して半径 R_j () の依存性に対する簡単な表現を使用して、以下の数式(14)の位相整合を保証する実効屈折率分布を得るべく、 n_{eff} () の連続条件、及び、

【数44】

$$n_{eff,1}(\theta)R_1(\theta) = n_{eff,2}(\theta+2\pi)R_2(\theta+2\pi)$$

が一定という条件を受ける数式(13)を解決することは容易である。

【数46】

$$n_{eff,1}(\theta) = \frac{R_0 n_0}{R_0 - \frac{a}{2\pi}\theta} \quad (14)$$

$$n_{eff,2}(\theta) = \frac{R_0 n_0}{R_0 - \frac{a}{2\pi}(\theta+2\pi)}$$

$n_0 = n_{eff,1}(0)$ は、螺旋導波路への入力部でのモード実効屈折率である。

【0042】

図5は、上記で説明したアルキメデスの螺旋導波路に位相整合を提供する、 $n_{eff,1}$ () および $n_{eff,2}$ () の分布のプロットである。360度回転ごとにたったおよそ0.0014だけ、又は、非常に小さくて実際問題として実現するのが容易である、回転ごとに

【数47】

$$\Delta n_{eff}/n_{eff} = 0.0014/1.98 \approx 0.071\%$$

だけ異ならせて、実効屈折率が角度位置 と共に線形的に増大することを示す。例えば、これは、本質的に線形の様式で、入力から出力へと、螺旋導波路の幅または高さをゆっくりと増大することによって達成されることが出来る（長方形の屈折率プロファイルを備え、全内反射基準の導波路を仮定）。例えば、もし n_{eff} が導波路幅 w を異ならせることによって調整されるならば、基準導波路理論は、

【数48】

$$\Delta n_{eff}/n_{eff} \approx 2\Delta w/w$$

を示す。従って、所望の幅の外乱は $n_{eff}/n_{eff}/2$ であるか、又は、 $\sim 0.035\%$ だけである。4 μ m の広い導波路に対して、これは回転ごとに4 nmだけである。およそ35 mmのアーム長に対して、そのような小さな幅差異は、それが付加損失を殆ど引き起こさないほど段階的（断熱的）である。100アームのCSWに対して、この幅は、入力ポートでのものより出力ポートの方が10%だけ大きいだろう。これは、導波路が更に螺旋の至る所で単一モード化されることが出来るほど十分に小さい。

【0043】

図6は、前のシミュレーションにおけるような一定である実効屈折率の代わりに、ここでの実効屈折率は、数式(14)に従って、角度位置 に沿って異なることを除けば、上記で説明したアルキメデスの螺旋導波路と同じものに対して、結合係数の関数としての共振波長での伝送を示している。ここで、伝送は、結合係数の最も低い複数の共振値へとダウンさえする、複数の強い共振を示す（0にディップダウンする）。これらは、複数の

10

20

30

40

50

低い結合係数での、図2の位相不整合のアルキメデスの螺旋導波路で生じた複数の疑似共振と対照的に、複数の真の共振である。各共振において、伝送はほぼ最大である（ほぼ単一である）。各共振のいずれか一方の側で、伝送は0へと急峻にドロップする。この特性は、複数の非常に大きな共振値における図2の前の非位相整合のアルキメデスのCSWにおけるものと同じであるが、ここでは複数の非常に低い結合係数で生じる。この特定の例において生じる最も低い結合係数は、およそ 0.4 mm^{-1} であり、これは、普通の複数の動作波長（可視から赤外）における複数の導光路に対して妥当な結合係数である。

【0044】

図7Aおよび図7Bは、各々、共振結合係数（すなわち、 $= 0.4001 \text{ mm}^{-1}$ ）でプロットされた、図5におけるものと同じ位相整合のアルキメデスのCSWに対して算出された伝送スペクトルおよび群遅延スペクトルを示している。図3および4の場合におけるもののように、群遅延スペクトルは、群遅延が無限になる複数の非常に急峻な共振を示す。これらの急峻なピークは、伝送スペクトルにおいて、伝送が0に到達する複数の非常に急峻な共振と同時に起こる。図3および4の非位相整合のアルキメデスのCSWとの主な差異は、再び、この位相整合のアルキメデスの螺旋導波路において、これらの共振が低い共振結合係数で存在することである。

【0045】

上記で説明された複数の特定の実施形態において、導波路12はテーパを備えることができる。他の複数のアプローチは、導波路長に沿う n_{eff} における所望の変化を実現する目的で、導波路12の幅の代わりに高さを異ならせること、又は、導波路12のコア並びに/若しくはクラディング材料の屈折率を異ならせることを含むことができる。

【0046】

これらのアプローチのうち何れかにおいて、 n_{eff} における変化は、螺旋導波路12の長さに沿う結合係数 k における変化にも関連付けられる。この k での変化は、 k での共鳴条件における変化という結果を生じ、一般には低速（高速）光を生成するCSWの有効性の悪化という結果を生じるだろう。この結果による強い影響は、結合係数の変化を最小にするという結果をもたらすCSWを位相整合するためのアプローチを選択することによって、軽減され又は削除されることができる。例えば、位相整合は、モードの実効屈折率を修正して数式(14)の条件（及び、その付随する連続条件）を満たすべく、螺旋導波路12の入力から出力へと増大又は減少する厚みを備える螺旋導波路12の上に好適な屈折率の層を堆積させることによって実装されることができる。この設計は、モードの実効屈折率を変化させるが、結合係数に対して相対的に殆ど強い影響を有さない。この層は、例えば、市場で利用可能な多数のコンピュータシミュレータのうちの1つを使用して、複数の結合導光路の結合係数の複数の規格シミュレーションによって設計されることができる。残余位相不整合の複数の低速光共振に対する複数の影響、及び、 z （又は同等に）への残余結合係数依存性が、互いに部分的に又は完全に打ち消し合って最大限に強い低速光共振となるように、螺旋導波路の屈折率プロファイル、及び、その長さに沿う屈折率プロファイルの分布を選択することのような、他の複数の解決策が存在する。

【0047】

N本のアームを備える位相整合の螺旋導波路12において、伝送および群遅延は、光学周波数および結合係数によって決定される。これらは、正規化された伝搬定数 $B = 2 \pi R_0$ および正規化された結合係数 $K = 2 \pi k$ へと変換されることができる。図21は、 $N = 2$ から $N = 6$ への $B - K$ スペースにおける群遅延に対する等高線図を示している。群遅延スペクトルは、 B において、全ての N_s に対して 2π の期間で周期的である。それゆえ、各フレームは単に、僅か1期間だけに制限される、複数の B 値の狭い範囲を示す。白色領域は、複数の大きな群遅延を示し、低速光に対応する。複数の暗いエリアは、複数の小さい群遅延を示し、正常光または高速光に対応する。

【0048】

複数の白色領域において、1回転での伝搬に起因して蓄積される位相（ B ）と、結合に起因して蓄積される位相（ K ）とは、光が構成的に自身と干渉するように累算する。従っ

10

20

30

40

50

て、光は、螺旋導波路 1 2 において共振し、(例えば大きな要因によって)低速化される。しかしながら、複数の暗いエリアにおいて、位相条件は満たされず、光は、各回転後に、構成的に自身に追加しない。群速度は、正常(c が真空での光の速度であって、 c/n_{eff} に等しい)であるか、又は、正常より高い(c/n_{eff} より大きい、又は、高速光)かのいずれか一方である。全ての N_s に対して、スペクトルは、 B において 2 の期間で周期的である。一定の周波数に対して、群遅延はまた、 K において 2 の期間で周期的であるが、これは、 N が 2 又は 3 に等しい場合だけである。

【0049】

アーム N の数が増大するに連れて、共振の組 (K 、 B) の密度、及び、群遅延スペクトルの複雑性は増大する。図 2 2 は、4 つのアームを備える螺旋導波路 1 2 に対する結合への、群遅延スペクトルの依存性を示している。図 2 2 においてプロットされる代表的なスペクトル (a) - (d) は、 K の様々な値に対しての B の 3 つの期間に対する群遅延を示している。スペクトルの形状は、 K の値に依存し、従って、このデバイスは、適切な結合係数を選択することによって調整されることができる共振スペクトルの広い選択肢を提供する。全てのスペクトルにおいて、 B における各期間には、最大で 2 つの強い共振が存在する。2 は、 B における最大縮退 (ディジェネラシー) である。共振値に K が選択される場合 (例えば、図 2 2 (b) における $K = 0.695$)、光は、それらを通して伝搬する代わりに、特定の複数のアームを横切って結合する。それから、スペクトル (a) - (d) で複数の実線として示されている群遅延は、デバイスが高速光をサポートするように、スペクトル (b) で点線として示されている正常な群遅延よりも小さい。各共振値 K_r に対して、群遅延が無限になる K_r の両側で、 K_r から僅かに離調された K の 2 つの値が存在する。しかしながら、伝送はこれらの値において 0 であり、検出される光子は 1 つも無い。これは、臨界結合で操作されるリング共振器における場合と類似する。

【0050】

リング共振器において、群遅延は、結合係数が臨界結合を横切る場合に、信号を変化させる。同様に、無限の群遅延及び K_r を生成する複数の K 値間での螺旋導波路 1 2 において、群遅延がマイナスである小さい領域が存在する。適切な結合係数および周波数に対して、マイナスの群遅延は、ポジティブの群遅延と同じ最大振幅を有することができる。

【0051】

N 本のアームを備える螺旋導波路において、複数の結合係数の特定の複数のシーケンスは、干渉計の複数のスペクトル特性を適合させるべく選択されることができる。多くの考え得る例のうちの 1 つとして、図 2 3 に示されるように、 $N = 2n$ の偶数個のアームと、シーケンス ($k, 0, k, 0, \dots, 0$) に従う複数の結合係数 ($k_1, k_2, k_3, k_4, \dots, k_{2n}$) を備える位相整合のアルキメデスの螺旋導波路を考える。図における灰色領域は、結合が存在する場所を示し、その一方で、白色領域は、複数のアーム間における結合が 1 つも存在しない複数の領域を示している。これは、螺旋導波路 1 2 を幾つかの配置換えされた 2 アーム螺旋へと分割することと物理的に類似する。共振に k が選択される場合、複数の結合されたアームの各組はリング共振器のように作用し、従って、全体として、螺旋導波路は、SCISSOR といった共通の線形導波路に結合される n 本の同一のリングのように作用する。その群遅延スペクトルは、複数の結合されたアームの個々の組における群遅延スペクトルの積である。その結果として、それは、これら個々のスペクトルより幅広い。SCISSOR におけるように、複数の結合係数の適切なシーケンス処理は、広帯域の低速光となる。増大したアームの数としての伝送スペクトルにおける広がり図 2 4 に示されている。複数のシミュレーションは、図 2 5 に示されるように、複数の伝送共振の 3 - dB 帯域幅が、ほぼ $N^{1/2}$ として成長することを示している。

【0052】

より広い低速光でさえ、互いに対して複数のアームの個々の組の複数の共振周波数を僅かにシフトすることによって実現されることができる。これは、例えば、図 2 6 に示されるように、組 1 から組 2、組 n へと導波路の実効屈折率を僅かに増大することによって行われることができる。この螺旋導波路 1 2 の群屈折率スペクトルが、図 2 7 において、 N

10

20

30

40

50

= 2、6、10、14および20に対して示されている。N = 2、 $\lambda_0 = 1.549983 \mu\text{m}$ に対する共振波長が、参照として使用される。複数の連続する組間における実効屈折率の変化 $n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}$ は 10^{-8} と選択され、これは、シフトされた複数の共鳴ピークが、広い群遅延スペクトルを生成すべく互いに重複することを保証するには十分小さい。結合係数 $k = 1.46$ は、複数の共鳴ピークがおよそ同じ振幅を有し、複数の共鳴ピーク間の複数の波形が小さくなるように選択された。複数のアームの数が増大されるに連れて、群遅延スペクトルは、著しく（図27を参照）、Nと共にほぼ線形的に（図28を参照）、広がる。結合係数 k を 1.46 から 1.499 に変化させることによって、強くてかなり局在化した複数の共振を備える、完全に異なる群遅延スペクトルを生成できる（図29を参照）。これは、例えば、光学非線形変換を向上するのに非常に興味あるものとなり得る。

10

【0053】

複数の結合されたアーム14間における位相不整合の問題に対する他の解決策は、非常に僅かな直線セグメントを備える螺旋形状を使用することである。幾つかの中で1つの例は、図8に概略的に示されるような、複数の丸みを帯びたコーナーを有する、長方形を備えた導波路12である。ここで、特定のそのような複数の実施形態において、結合の殆どは、導波路12の複数の直線部分間で生じ、位相はこれらに沿って同じレートで蓄積する。位相不整合は更に、複数のコーナー領域における隣接する複数のアーム14間にも存在する。しかし、その強い影響は、複数の特定の実施形態において削除され又は低減されることができる。例えば、これは、位相不整合が2の倍数となるように、複数のコーナーの複数の長さを選択することによって行われることができる。次に、複数の波は、全ての直線区間への複数の入力と同位相である。複数のコーナーでの結合は更に、複数のピーク共振を低減するが、それは、螺旋導波路12の全長と比較される複数のコーナーの相対全長に依存する程度にまでだけである。これは、実際問題として小さく保たれ得る。必要があれば、複数の特定の実施形態において、この残余影響は、削除され又は低減されることができる。（例えば、複数の直線アーム部分間の材料と異なる低屈折率材料で、全てのコーナー周りの複数の螺旋アーム14を離間させることで、複数のコーナーにおける結合を取り除く又は低減することによる。これは、複数のアームが空気で離間されるように複数のコーナー領域に沿う複数のアーム間で複数の溝を形成することによって行われることができる。）

20

【0054】

長方形の螺旋導波路12の複数の特性が、上記で説明されたアルキメデスの螺旋導波路と同じ実効屈折率及び損失係数を備え、長さ $L = 6 \text{ mm}$ の複数の直線側とアーム間隔 $a = 3.9869 \mu\text{m}$ とを備える例示的な四角形螺旋導波路12に対して以下で説明される。図8においてA、BおよびCとラベリングされた領域における複数のコーナーは、概して、 $R_j = R_1 - (j-1)a$ に従って外側アームから内側アームへと低減する半径 R_j を有する円形である。 $R_1 = 2 \text{ mm}$ は最も外側のアームにおける半径であり、 j はアームの数である。互いに隣接して実質的に平行である全ての直線側が実質的に同じ長さを有するので、Dとラベリングされた領域における複数のコーナーは円形であることができない。この領域における複数のコーナーは、 R_j と R_{j+1} との間で線形的に変化する、すなわち、

30

【数49】

$$0 \leq \varphi < \pi/2$$

で、

【数50】

$$R_{j+1}'(\varphi) = R_j - 2a\varphi / \pi$$

による湾曲を有するとみなされる。当該シーケンス、及び、これらの値は、コーナー位相不整合が動作波長 $\lambda = 1550.00 \text{ nm}$ で 16° となるように選択される。N = 2に対する当該螺旋導波路の全長 L_t は、 $\sim 69.969 \text{ mm}$ である。この説明の複数の目的で、複数のコーナーに沿う結合が1つも無いと仮定される。線形依存性を除く、角度位置 φ に依

40

50

存する湾曲の半径

【数 5 1】

$$R_{n+1}'(\varphi)$$

に対する他の複数の依存性が考え得る。唯一の条件は、

【数 5 1】

$$R_{n+1}'(\varphi)$$

が R_n と R_{n+1} との間で異なることである。

【0055】

前述の説明から予想される通り、この構造における複数の湾曲した導波路間の全ての結合の削除は、複数の共振を大いに強化する。この振る舞いは、 \cos の関数として、 $N = 2$ に対する共振波長での当該螺旋導波路 12 の伝送をプロットしている図 9 において容易に知られることができる。ここで、複数の伝送共振は、 k において周期的である。複数のシミュレーションは、複数の強い共振が複数の弱い結合係数に対してさえも存在することを除き、この CSW の複数の特性が、アルキメデスの螺旋導波路のものと同質であることを示す。図 9 は、特に、結合における第 1 共振が 0.2 mm^{-1} と同じくらい低い結合係数に対して生じることを示している。これは、全体的に現実的である。

【0056】

図 10 は、共振結合係数 ($\kappa = 0.0622 \text{ mm}^{-1}$) で評価される当該四角形の CSW に対する性能指数 (例えば、群遅延と伝送との積) スペクトルをプロットしている。性能指数は、共振波長で再び 0 であり、共振の両側で最大値を有する。最大値は 10.4 ns に等しく、これはアルキメデスの螺旋導波路に対するものと同じである。これは、両 CSW が同じ全損失及び長さを持つので、驚くことではない。再び、主な差異は、四角形の CSW がこの結果を実際の結合係数で実現することである。

【0057】

コーナー位相不整合は波長に依存し、従って、選択された動作波長 λ_0 (及び、そのいずれか一方の側での他の小さな波長) においてだけ、 16π に等しい。特に、CSW の他の複数の共振波長の殆どにおいて、必ずしも 16π ではない。その結果として、他の複数の共振波長で、複数のコーナーにおける残余位相不整合が存在する。これは、螺旋導波路の減速光での有効性を低減させる。波長は図 10 の範囲を遥かに超えて離調されるので、コーナー位相不整合は 2π の次の倍数に近づき (又は等しくなり)、群遅延は再び、図 10 に示される最大値に近い (又は等しい) 値をとる。他の複数の CSW と異なり、複数の特定の形態における当該四角形の CSW の設計は、等しい大きさの周期的に連続する複数の共振群遅延を提供しない。この特徴は、幾つかの用途に対して不利益であるが、センシングのような、動作の単一波長が典型的に充分である他の複数のものに対しては確かに重要でない。

【0058】

シミュレートされる構造において、コーナー差分位相シフトは、 $\phi_0 = 1550.000 \text{ nm}$ で正確に 16π にセットされた。 $2n_{\text{eff}}(a/2)/\lambda_0 = 16$ である、この特定波長での当該位相整合条件を実現すべく、アーム間隔 a の値は、 $\sim 4 \mu\text{m}$ から $3.9869 \mu\text{m}$ までの目標値辺りで調整された。構造の共振波長にもまた当たる当該波長に対して、従って、当該波長で無限である群遅延に対して、複数のアームの複数の直線セグメントの長さは、 $\sim 6 \text{ mm}$ ($5999.86 \mu\text{m}$) の目標値辺りで僅かに調整された。設計における時点で、構造の全ての寸法がセットされる。コーナー位相シフトが正確に 2π の倍数である、他の複数の波長が存在する。最も近いそのような複数の波長は、 $\lambda_1 = 1377.778 \text{ nm}$ (18π の位相シフト) および $\lambda_2 = 1771.429 \text{ nm}$ (14π) である。しかしながら、一般に、これら 2 つの波長 (及び、他のそのような複数の波長) は、共振波長の近くに当たるだろうが必ずしもそうではない。その結果として、これらの波長において、群遅延は非常に大きい、概して無限ではない。全ての他の共振波長において、コーナー

10

20

30

40

50

位相シフトは2 の倍数ではなく、共振の際の群遅延は有限値を有する。

【0059】

本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、結合導波路における実効群遅延を最大化する例示的技術は、ここで説明される。上記で説明された四角形のCSWの伝送は、図11Aにおいて、波長 および正規化された結合係数 $K = L$ という2つのパラメータの関数としてプロットされている。Lは、複数のアームの複数の直線側の長さである(5999.86 μm)。2つのより暗い領域は、伝送が共振であって0に近い領域を表す。両方において、共振波長は(構造の設計で)1550.00 nmである。2つの正規化された共振結合係数は、0.374および0.411 辺りである。この共振結合において、伝送は0である。

10

【0060】

図11Bは、図11Aの四角形のCSWの群遅延に対して、及び、同じ範囲の複数のパラメータに対して、対応する等高線図を示している。この図で特定された複数の共振座標において、すなわち、 $L = 1550.00 \text{ nm}$ および $S = 0.374$ において、群遅延は無限になる。図11Cは、図11Aの四角形のCSWの波長および正規化された結合係数Kの関数としての実効群遅延を示している。実効群遅延は、共振結合係数および1550.00 nmの共振波長で0になる。図11Cにおいて4つの明るいスポットが存在し、実効群遅延が最大である複数の領域を示している。これら4つの領域は、同じ波長(1550.00 nmでの共振波長)であるが、最大群遅延を生成する2つの結合係数と異なる複数の結合係数で生じる。従って、四角形のCSWを最も高い考え得る実効群遅延で操作すべく、結合係数は、最も大きい群遅延を与える結合係数から離調されることができる。

20

【0061】

図11Dは、図11Cにおける共振波長に沿った切断面を示している。最も高い実効群遅延を与える正規化された結合係数は0.358 辺りであり、これは、最も高い群遅延に対して最適な正規化された結合である0.374よりおよそ4.3%低い。図11A 11Dなどの複数の図は、ユーザによって想起される用途に応じて、最も大きい群遅延または最も大きい実効群遅延のいずれか一方を生成することになる複数の結合係数を決定すべく、本明細書で提供される複数の方程式を使用して、数的に生成されることができる。

【0062】

図9および10は、この例示的技術を適用することなくプロットされたが、その一方で、図11A 11Dおよび12は、この例示的技術を適用しつつプロットされる。具体的には、図9および10に対しては、第1条件が $L_0 = 1550.000 \text{ nm}$ で満たされたことを確認すべく、aは3.9869 μm に選択されたが、第2条件(この波長がまた構造の共振波長に当たるように L_t を調節すること)は適用されなかった。その結果として、 L_0 は必ずしも共振ではなかったが、1550.000 nmより少し高かった。第1の結果として、 L_0 に最も近い共振で(L_0' と呼ばれ得る)、群遅延は、かなりの確率で、必ずしも無限ではない。第2の結果として、上記で説明された全長の値($\sim 6 \text{ mm}$)は、最適値ではない。最適値は、以下で説明されるように、5.99986 mmである。差は小さいが、大きな差を作ることができる。

30

【0063】

図11A 11Dの例示的技術を使用して、図12は、伝送スペクトルを示し、図13は、最も低い共振結合係数に対して算出された当該四角形のSCWの群遅延スペクトルを示している。両方のスペクトルは、複数の同じ周期的共振波長で生じる、連続する急峻な共振からなる。コーナー差分位相シフトが正確に16 (意図的に $L_0 = 1550.00 \text{ nm}$) である波長において、伝送は0にディップする。この同じ波長で、群遅延は、CORにおけるように、損失が存在する場合にでさえも、無限になる。全ての他の共振周波数で(コーナー位相シフトが2 の他の倍数である僅かな共振周波数以外で)、コーナー位相シフトは2 の倍数ではなく、群遅延は(おそらく非常に高いにも拘らず)有限値を有し、伝送は完全には0に到達しない。対照的に、CORにおいては、全てのアームが等しい長さを有し、従って、構造が全ての波長において位相整合されるので、全ての共振波長

40

50

が同じ振る舞いを有する。

【 0 0 6 4 】

この依存性は、群遅延スペクトルがより大きな波長範囲に亘ってプロットされた図 1 4 に示されている。本明細書の説明から予想されるように、それは、上記で言及された 3 つの特別な波長辺りの 3 つのスパイクを示す。群遅延は (ω_0 で) 無限であり、 (ω_1 および ω_2 で) 殆ど無限である。このスペクトルが、光が大きな群遅延を有する複数の波長だけでなく、群遅延が非常に低い (最も図 1 4 における低い複数のポイント) 複数の波長もまた示すことを留意することも面白い。群遅延は、 ω_i の近傍における複数の波長で最も低く、 0.23 p s に等しい。これは、結合 $\kappa_0 = 460 \text{ p s}$ が存在しない当該同じ螺旋を通る、およそ半分の遅延である。高速光の存在に対する物理的理由は、2つのアームを備える螺旋 (図 1 A) において容易に理解されることができる。螺旋導波路の内側を進む光が 1 回転で外側アームから内側アームに十分に結合されるように結合係数が選択される場合、その後、光は 1 回転後に螺旋を出る。光が出る時間まで、光は本質的に、螺旋導波路の半分の全長 L_t を移動した。従って、その群遅延は、

10

【 数 5 2 】

$$\sim n_{\text{eff}}(L_t/2)/c = \tau_0/2$$

、又は、 0.23 n s である。

【 0 0 6 5 】

群遅延は話の一部を伝えるだけなので、図 1 5 は、同じ広い波長範囲に亘って算出された、この同じ螺旋導波路に対する実効群遅延スペクトルを示している。このスペクトルは、図 1 0 の複数のツインピークのような、等しい振幅の連続するツインピークである。これらのツインピークはこの広い波長スケールにおいて未解決であり、図 1 5 で見受けられるものは、ピークの最大値の位置である。この図は、実効群遅延が複数の共振 ω_i のうちの 1 つの近くでは最大ではないが、僅かに離調された 2 つの波長であってこれらの共振のいずれか一方の側で最大であることを示している。 ω_0 で性能指数は 0 になることに留意する。それはまた、他の複数の特権的波長 ω_i で 0 に非常に近くなる (おそらく 0) 。これらの共振から離れて生じる実効群遅延における絶対最大値に対する理由は、これらの特権的共振波長において且つその近くで、伝送が極めて弱く、従って、群遅延と伝送との積が最適ではないからである。従って、この構造に対する最大実効群遅延は 10.4 n s (図 1 0 に示されるような共振 ω_i の近くの値) ではなく、 15.9 n s である (図 1 5 を参照) 。これは、 5 m m の同じ半径と、同じ損失係数、すなわち 15.9 n m とを備えるリング共振器に対するものと、公称で同じ値である。この最大実効群遅延は、正規化された減速要因

20

30

【 数 5 3 】

$$\tau_g T \tau_0 = 15.9/0.46 = 34.6$$

に対応する。対比用に、強いシリカ F B G における低速光共振に対して報告された最も高い測定された $\tau_g T$ 積は、 960 p s の ω_0 に対して、 $\sim 3.5 \text{ n s}$ である (Photonic s West, San Francisco, California, Proc. of SPIE Vol. 7949, 79490-E1 - E11 (Janua ry 2011) における H. Wen, G. Skolianos, M.J.F. Digonnet および S. Fan による 「Slow Li ght in Fiber Bragg Gratings」 を参照) 。これは、当該四角形の C S W に対するものより少し高い、 ~ 36 の減速要因に対応する。なぜなら、F B G はより低い全損失 (2 c m の長さに対して 0.1 m^{-1} の損失係数) を有したからである。同様に、複数のシミュレーションは、当該四角形の C S W と同じ全長と損失係数とを有する C O R が、 15.9 n s の最大値と共に、 (共振結合係数で計算された場合もまた) 同様の実効群遅延スペクトル形状を有することを示している。これらの定量比較は、本明細書で説明される複数の基本原理から予想されるように、C S W の性能が他の複数の光学共振器の性能と比較可能であることを示唆している。

40

【 0 0 6 6 】

50

多くのスキームは、本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、コーナー位相整合の波長依存性を低減または削除すべく実装されることができる。1つの魅力的な解決策は、再び、分散マネジメントである。例えば、複数のコーナーにおいて、導波路は、複数の伝搬定数が、物理長における差を補償するのに丁度良い量だけ異なるように設計されることができる。伝搬定数における当該変化は、複数のコーナーと複数の直線側との間における複数の変わり目において関連付けられた伝搬損失を最小化すべく断熱的であることができる。補償に対する条件は、 $\Delta L_r / L_r = - \Delta L_l / L_l$ である。

【数 5 4】

$$L_r \approx \pi R_1 / 2$$

10

は、コーナーの長さである。対面する複数のコーナーの複数の長さは、 $a / 2$ ごとに異なり、

【数 5 5】

$$\Delta L_r / L_r \approx a / R_1$$

である。もし a が、導波路幅 w を異ならせることによって調整され、全内反射基準の長方形の導波路を仮定するならば、

【数 5 6】

$$\Delta \beta / \beta \approx 2 \Delta w / w$$

20

である。従って、満たすべき条件は、

【数 5 7】

$$2 \Delta w / w \approx a / R_1$$

である。この外乱は、非常に小さい。例えば、上記で説明した四角形の C S W に対して (

【数 5 8】

$$a \approx 4 \mu\text{m}, R_1 \approx 2 \text{mm}$$

)、

30

【数 5 9】

$$\Delta w / w \approx 10^{-3}$$

である。複数のコーナーにおける導波路幅は、回転ごとに 0.1% だけ増大されることができる。100 アームの C S W に対して、この幅は、複数の最も外側のコーナーにおけるよりも、複数の最も内側のコーナーにおいて 10% だけ大きいだろう。これは、複数のコーナーが更に、螺旋導波路の至る所で単一モード化されることができるほど十分に小さい。

【0067】

複数の共振はまた、より多数のアームを備える複数の四角形の C S W においても存在する。この特性を示すべく、図 16 は、本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、アーム N の数への最大実効群遅延の依存性を示している。各 N に対して、波長および結合係数の両方が、この性能指数を最大化すべく最適化された。最大実効群遅延は、N に依存しないことを見出され、この特定の数的な例においては、 15.9 ns に等しい。この結果に対する理由は、以下の通り理解されることができる。C S W において、複数の光子は、例えばリング共振器で再循環するように、出力する前に多数回も再循環する。再循環の数は、干渉計のフィネス (又は Q ファクター) に関連し、共振器内を複数の光子が移動する実効長さ L_e によって数量化されることができる。群遅延は、 $\tau_g = n_{\text{eff}} L_e / c$ によって、実効長さに関連付けられる。複数の光子によって受けられる全損失は L_e であり、伝送は、およそ

40

50

【数60】

$$T \approx \exp(-\alpha L_e)$$

であると予想される。従って、実効群遅延 ${}_g T$ は、 $(n_{eff} L_e / c) \exp(-L_e)$ におよそ等しいはずである。この機能の最大値は、 $L_e = 1/\alpha$ である場合に生じ、 $({}_g T)_{max} = n_{eff} / (c\alpha)$ に等しい。それは、図16において予見されるように、 N に依存しない。上記でモデル化された四角形のCSWの複数のパラメータ値に対して、それは 15.2 ns に等しい。これは、 15.9 ns の正確にシミュレートされた最大値に近い。この最大値が N に依存しない物理的理由は、(同じ損失係数を維持して各 N に対する結合係数を最適化しつつ) N が増大するに連れて、群遅延が N と共に線形的に増大するが、伝送は(小さい全損失に対して線形的に)減少し、これら2つの反対の影響が正確に打ち消し合うからである。複数のシミュレーションは、 $({}_g T)_{max}$ もまた、当該四角形のCSWと同じ複数のパラメータ値を備えるCORに対して N に依存しないこと、及び、 $({}_g T)_{max}$ の最大値もまた 15.9 ns であることを確認する。性能指数もまた、2つのアームを備える線形CROWに対して同じ最大値(及び、リングごとに同じ境界線、並びに、同じ損失係数)を有する。

10

【0068】

[ネスト型導光路]

複数の特定の実施形態において、少なくとも1つの導光路は、図30によって概略的に示されるように、複数のネスト型導光路22を備える。ネスト型導光路22は、互いに実質的に同一平面にあることができ、上記で説明した螺旋状導光路12と同様の複数の共振特性を示すことができる。複数のネスト型導光路22は、互いに異なる複数の境界線を有して互いの内側で入れ子にされる、複数の導光路22a、22b、...を備えることができる(例えば、複数のリング共振器、又は、複数の湾曲したコーナーを備える矩形形状のような他の複数の非円形形状)。例えば、実質的に円形の複数の導光路22a、22b、...に対して、複数のリング共振器22a、22b、...の複数の直径は、互いに異なることができ、互いに同心であることができる。複数の特定の他の実施形態において、複数のネスト型導光路22は、非円形形状を有することができる(例えば、概して長方形、四角形、三角形、多角形、又は、不規則形状)。複数の特定の実施形態において、複数の導光路22a、22b、...は、互いに同心ではない。

20

30

【0069】

複数の特定の実施形態において、上記で説明された螺旋状導光路12におけるものと類似する態様で、1つの導波路22aの少なくとも一部の中を伝搬する光は、隣接する複数のネスト型導波路22a、22b間でかなりのエネルギー移送が存在するように、複数の導波路22a、22bの複数の部分と概して直交する方向において、隣接する導波路22bの少なくとも一部に光学的に結合される。例えば、導波路22aの一部、及び、導波路22bの一部は、2つの隣接する導波路22a、22b間でのエネルギー移送を可能にすべく、互いに十分に近くであることができる。複数のネスト型導光路22の各導光路22a、22b、...は、螺旋状導光路12に関して上記で説明された複数の細長部分または複数のアームと類似する、少なくとも1つの導光路の細長部分またはアームとして作用する。複数のリング間の結合は、一定であることができ、又は、リングからリングへと(例えばリング1とリング2との間における結合は、リング2とリング3との間における結合と異なることができる)、若しくは、リングに沿って(例えば、結合係数はリングに沿って方位角に異なることができる)、のいずれか一方で異なることができる。

40

【0070】

光結合器120は、結合係数 μ で複数のネスト型導光路22の少なくとも1つの導波路に光学的に結合され(例えば、外側導波路22aに光学的に結合され)、光を複数のネスト型導光路22の中へと(例えば、外側導波路22aの中へと)導入して、複数のネスト型導光路22の外(例えば、外側導波路22aの外)で光を収集すべく使用される入力/出力導波路122を備えることができる。

50

【0071】

複数の特定の実施形態において、隣接する複数の導光路は、複数の異なる湾曲半径を有するので、与えられる導波路またはアームにおけるフィールドによって蓄積される位相は隣接する導波路またはアームにおいて蓄積される位相と異なる。その結果として、隣接する複数のアーム間のパワー交換は、同形の螺旋状導光路12に関して上記で説明されたものと殆ど同じ複数の物理的理由で、完了することができない。その結果、再び、単位長さごとの結合が単位長さごとの位相不整合よりもずっと強いものでない限り、複数の共振はあまり強くないかもしれない。螺旋状導光路12に対して上記で説明されたように、非常に強い結合を可能にする導波路（例えば、空気中でのシリコンリッジ導波路）は、位相不整合の複数の影響を低減すべく、十分に強い結合を提供できる。また、螺旋状導光路12 10
 に関して上記で説明されたもののような第2の解決策は、複数のフィールドが全ての導光路において同じレートで位相を蓄積するように、各導光路22a、22b、...の導波路伝搬定数を調整することである。複数の特定の実施形態において、複数の導波路伝搬定数は、複数の内側導波路が複数の外側導波路より大きな複数の伝搬定数を有するように、例えば、複数の導光路22a、22b、...を、横断面において構造の中心に向かって徐々により大きくする（例えば、より幅広くする又はより高くする）ことによって、調整されることができ 20
 る。複数の特定の他の実施形態において、複数の導波路伝搬定数は、複数の外側導波路から複数の内側導波路へと徐々に増大する屈折率を有することによって調整されることができ 20
 る。これは、実際問題として、螺旋状導光路12の複数の導波路の段階的テーパリングより容易に実現することができる。なぜならば、各々のネスト型導光路22の複数の寸法が、複数の導波路22の角度位置に対して変化するよりもむしろ一定だからである。代数的に、もし β_j がアームjの伝搬定数であって R_j がアームjの半径であるならば、位相整合に対する関係性は、 $j = 1$ から N の間で、複数の導波路22の全ての組に対し、 $\beta_j R_j = \beta_{j-1} R_{j-1}$ として表されることができ 20
 る。 N は、構造におけるネスト型導波路の数である。この条件もまた、全ての導波路22が同じ光学的長さ $2 \sum_{j=1}^N R_j$ を有し、従って、全ての導波路22が同じ複数の共振周波数を有することを保証する。

【0072】

ネスト型導波路構造の数学的モデルにおいて、結合器でのフィールド振幅 a 、 b 、 c および d は（例えば、図31において定義される）、以下の数式（15）によって、結合器フィールド結合係数 μ および結合器電界通信 t と関連付けられる。 30

【数61】

$$\begin{aligned} d &= i\mu a + tc \\ b &= i\mu c + ta \quad \text{and} \quad t^2 + \mu^2 = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

【0073】

複数の導波路において、複数の結合された方程式は、螺旋導波路構造に対するものと同様である。

【0074】

各導波路jにおいて、定常電磁場は、 $E_j(z) = U_j(z)\exp(i\beta_j z)\exp(i\omega t)$ として表されることができ 40
 る。 $U_j(z)$ は波の振幅であり、 β_j は角周波数であり、 t は時間であり、 z は導波路に沿う線形座標である（ $0 < z < S_j$ 、 S_j はリングjの境界線である）。複素伝搬定数 β_j は、以下の数式（16）である。

【数62】

$$\beta_j = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} + i\frac{\alpha}{2} \quad (16)$$

$\lambda = 2\pi c / \omega$ は波長であり、 α は導波路モードのパワー損失係数であり（これは基本的な直線偏光モードであると仮定されることができ 50
 る）、 n_{eff} は実効屈折率である。螺旋導波路におけるものと同じ態様で定義される複数の円柱座標（ r 、 θ ）において、各導波路に沿うこれらのNフィールドの発達を記載している複数の結合された方程式は、以下の

数式 (1 7) である。

【数 6 3】

$$\frac{dU_j(\theta)}{d\theta} = i\beta_j R_j U_j(\theta) + k_{j-1,j}(\theta) U_{j-1}(\theta) + k_{j+1,j}(\theta) U_{j+1}(\theta) \quad (17)$$

【0075】

数式 (1 7) において、第 1 項は、導波路のセグメント j を通るモードの伝搬 (位相および振幅) を表わす。それは、導波路 j の半径である R_j に比例する。当該項は、様々な導波路における伝搬位相差の原因となる。第 2 項は、導波路 j と前の導波路 $j - 1$ との間における結合を説明しており、複数の複雑な結合係数 $k_{j-1,j}$ によって特徴付けられる。第 1 導波路 ($j = 1$) に対して、前の導波路は 1 つも存在せず、従って、この項は消滅する ($k_{0,1} = 0$)。第 3 項は、導波路 j と次の導波路 $j + 1$ との間における結合を説明しており、複数の結合係数 $k_{j,j+1}$ によって特徴付けられる。最後の導波路 ($j = N$) に対して、次の導波路は 1 つも存在せず、従って、この項は消滅する ($k_{N+1,N} = 0$)。保存されるエネルギーに対して、複数の湾曲した導波路間の結合に対する複数の結合係数は、損失が有ろうが無かろうが、 $k_{j-1,j} = -k_{j,j-1}^*$ を満たすべきである。複数のフィールドは、2 以上の複数の導波路に対して、角度位置 $\theta = 0$ で連続であるべきであり、一方で、以下の数式 (1 8)、数式 (1 9) で、第 1 導波路は結合器と結合できる。

【数 6 4】

$$U_j(0) = U_j(2\pi) e^{i\beta_j S_j} \quad j > 1 \quad (18)$$

【数 6 5】

$$\begin{aligned} U_1(0) &= i\mu E_{in} + tU_1(2\pi)^* e^{i\beta_1 S_1} \\ E_{out} &= i\mu U_1(2\pi)^* e^{i\beta_1 S_1} + tE_{in} \\ \mu^2 + t^2 &= 1 \end{aligned} \quad (19)$$

【0076】

従って、 N 個のネスト型導波路 (例えば複数のリング) を備えるネスト型導波路デバイス (例えば干渉計) に対して、 N 個の結合された微分方程式および $N + 2$ 個の境界条件が存在する。この複数の方程式のセットは、例えば転送行列法を数的に使用して、解かれることができる。

【0077】

図 3 2 は、結合係数 μ の関数として、 $N = 2$ の単一モード導波路 (例えば複数のリング) を備えるネスト型構造の共振周波数でシミュレートされた伝送を示している。構造に対する複数のパラメータ値は、第 1 リングに対して $R_1 = 5 \text{ mm}$ 、並びに、第 2 リングに対して $R_2 = 4.994 \text{ mm}$ の半径 ($4 \text{ }\mu\text{m}$ の複数のリング間の中心間距離) と、複数のリング間の回転ごとの結合比 $K =$ である。 K は、 2 として定義され、 θ はラジアンごとの結合である。 $1.55 \text{ }\mu\text{m}$ の近傍における動作波長、及び、 0.16 m^{-1} の同じ損失係数が、図 3 2 によって示されるシミュレーションにおいて使用された。位相整合を実現すべく、基本的モードの実効屈折率は、第 1 (外側) リングにおいて $n_1 = 1.98$ 、及び、第 2 (内側) リングにおいて $n_2 = 1.9816$ であると見なされた。この選択は、 $n_1 R_1 = n_2 R_2$ であることを保証した。 μ が 0 から増大されるに連れて、共振の際の伝送は、幾つかの最適結合 μ_{opt} で単一 ($\mu = 0$ の場合に複数のリングへの入力はなく、従って、全ての光は出力ポートで出てくる) から 0 へと減少し、次に、 μ が μ_{opt} から 1 へと増大されるに連れて、単一に向かって再び増大する。 $\mu = \mu_{opt}$ において、光は、複数の結合共振器の周りで最も強く共振し、群遅延は最も低い。この複数のパラメータ値のセットに対して、 $\mu_{opt} = 0.0712$ である。

【0078】

10

20

30

40

50

図33は、 $\mu = \mu_{opt}$ で操作される図32のネスト型構造の伝送スペクトルを示している。水平軸は、1回転における、複数のリングのうち何れかの周りで蓄積される位相である。図33は、周波数ドメインにおける共振が非常に狭いことを示している。図34は、図33に示されているのと同じ共振の近傍で、光波長の関数として、当該構造において光によって受けられるシミュレートされた群遅延を示している。リング共振器または螺旋状導光路におけるもののように、共振の際、群遅延は無限になる。

【0079】

群遅延と伝送とを掛けた積のスペクトル（例えば、図33におけるスペクトルと、図34のスペクトルとの積）が、図35においてプロットされている。螺旋導波路におけるように、このスペクトルは、共振における深い最小値によって分離された2つの最大値を示す（図35を図10と比較する）。 τ_g 積における2つの最大値は、同じ値（例えば10.4 ns）を有する。この最大 τ_g 積がその絶対最大値に到達するまで、複数の結合係数 μ およびKの複数の値を調節する場合、得られる値はおよそ15.8 nsである。予想されるように、これは、5 mmの同じ半径と同じ損失係数とを備えるリング共振器に対するものと公称で同じ値である（上記で言及されたように、15.9 nsである）。

【0080】

[光デバイスの複数の使用]

複数の特定の形態において、本明細書で説明されるような少なくとも1つの導光路（例えば、螺旋状導光路12または複数のネスト型導光路22）を備え、1又は複数の低速光共振を示す光デバイス10は、例えば歪み、温度変化、又は、屈折率変化といった幾つかの量Xを測定するように構成されるセンサとして使用される。光は、伝送スペクトル共振ピーク、又は、0ではない傾きを含む伝送スペクトルにおける共振ピークの一部（例えば、共振ピークの最も急勾配の部分）と適合される波長を有する光と共に、少なくとも1つの導光路の中へと導入されることができる。例えば、狭い線幅のレーザ光（例えば、実質的に伝送スペクトル共振ピークの線幅より狭い線幅を有するレーザ光）は、少なくとも1つの導光路の中へと導入されることができる。

【0081】

図17は、本明細書で説明される複数の特定の形態による、例示的センサシステム100を概略的に示している。センサシステム100は、光源110（例えばレーザ）と、少なくとも1つの光結合器120と、少なくとも1つの導光路130（例えば、本明細書で説明される螺旋導波路12に従うCSW、又は、本明細書で説明されるような複数のネスト型導波路22）と、少なくとも1つの光検出器140（例えば、光子検出器）とを備えることができる。小さい外乱dXは、少なくとも1つの導光路130の複数の寸法、および/または、少なくとも1つの導光路130の複数の材料の屈折率、および/または、少なくとも1つの導光路130の複数のアーム間の結合を変化させるだろう。これは、結果として、少なくとも1つの導光路130の伝送スペクトルにおけるシフトをもたらすだろう。このシフトは、結果として、少なくとも1つの導光路130によって伝送されるパワーにおける変化をもたらすだろう。これは、少なくとも1つの導光路130から放出される光を受信して、放出される光を示す信号（例えば、コンピュータシステム150に伝送される信号）を生成するように構成される少なくとも1つの光検出器140で検出される。

【0082】

複数の特定の形態において、少なくとも1つの導光路130（例えば、分布結合を示す、螺旋状導光路12または複数のネスト型導光路22）は、複数のアーム間に生じる結合の強度に影響を与える、複数のメカニズム又は複数のパラメータを検出するように構成されるセンサとして使用される。例えば、本明細書で説明される複数の特定の形態は、複数の導波路アームを分離する材料の屈折率における変化を検出すべく使用されることができる。導波路を複数のレセプターでコーティングすることによって、本明細書で説明される複数の特定の形態は、これらのレセプターにラッチする生物種を検出でき、それにより、導波路の上の材料の屈折率を変化させ、従って、モード及び結合係数を変化

10

20

30

40

50

させる。複数の特定の他の実施形態は、加速度、音場、又は、歪みを検出すべく使用されることができる。例えば、図 18 において概略的に示されるように、少なくとも 1 つの導光路 130 (例えば、結合螺旋導波路 12、又は、複数の結合されたネスト型導光路 22) は、中心支持型ディスク又は周縁支持型ディスク上に取り付けられることができ、加速度、歪み、又は、音場を検出すべく使用されることができる。少なくとも 1 つの導光路 130 の円形ジオメトリは、他の複数の測定変量 (例えば、磁場、電流、半径方向の歪み) を検出すべく適合されることができる。

【0083】

他の例として、本明細書で説明される複数の特定の実施形態は、代替的に、歪みを検出すべく使用されることができる。少なくとも 1 つの導光路に加えらる縦歪は、(とりわけ、) 複数の特定の実施形態の少なくとも 1 つの導光路の幾つかの長さに亘って、複数のアーム間の間隔を変化させ得る。これは、結合係数を変え、従って、伝送を変える。伝送における当該変化は、歪みを検出し、定量化し、又は、直すべく、測定されることができる。アーム間隔は長い距離に亘って変化され得るので、少なくとも 1 つの導光路の構成によって、結合係数における当該変化は、長い距離に亘って統合されることができ、その結果として、かなりの影響がもたらされる。複数の特定の実施形態において、同じ原理が、代わりに、複数の温度変化を、複数の構造的変化、又は、結果として少なくとも 1 つの導光路の複数の温度変化から生じる複数の屈折率変化によって測定すべく使用されることができる。

【0084】

少なくとも 1 つの導光路 130 の出力は、本明細書で説明される複数の特定の実施形態による、多数の方法で収集されることができる。1 つの方法は、検出器を少なくとも 1 つの導光路 130 の出力端に配置することである (例えば、図 1 A または図 8 の P_{out} 、又は、図 1 B の E_{out} を検出すべく配置される)。他の方法は、高反射器 (例えば高反射性を有する要素) を少なくとも 1 つの導光路 130 の出力端に配置して、(例えば、ファイバ結合器又はプレーナ型結合器のような光結合器を使用して) 入力ポートでの出力を収集することである。特定のそのような複数の実施形態において、結合器は、少なくとも 1 つの導光路 130 の出力面上に堆積される多層コーティングであることができ、又は、サニャック反射器であることができる。複数の特定の実施形態において、少なくとも 1 つの導光路 130 は、反射器を使用するよりむしろ、図 19 A によって概略的に示されるような、自身を通過して巻かれる螺旋導波路 12 を備えることができる。複数の特定の実施形態において、図 19 B によって概略的に示されるように、螺旋導波路 12 の内側端部は、螺旋導波路 12 の外の光を、少なくとも 1 つの光検出器 140 に運ぶべく、(例えば直線で、) (例えば、螺旋導波路 12 によって画定される領域から螺旋導波路 12 によって画定されない領域へと、) 螺旋導波路 12 の複数のアームを横切って延伸することができる。

【0085】

複数の特定の実施形態において、少なくとも 1 つの導光路 130 は、図 20 において概略的に示されるように、複数のオフセットされたループを有する螺旋導波路 12 を備えることができる。複数の特定の実施形態において、この構成は、螺旋導波路 12 によって囲まれる領域の外側に配置される螺旋導波路 12 の出力端を有することができる。これは、それに対して検出器を配置することをより容易にし、又は、他の導波路又は光ファイバのいずれか一方で、出力信号をより遠隔の検出器へと運ぶことをより容易にする。このオフセットされた螺旋導波路構成の他の利益は、複数の特定の実施形態において、全てのアーム 14 が実質的に同じ長さを有し、これより前と言及された位相不整合問題を解消でき、又は、大きく低減できることである。特定のそのような複数の実施形態において、複数のオフセットされたループは、互いに実質的に同一平面にあり、導波路の複数の部分が互いに交差する。これは、損失を誘発し得、結合を不連続にし得る。

【0086】

コンピュータシステム 150 (例えばコントローラ) は、少なくとも 1 つの光検出器 140 から複数の信号を受信して、螺旋導波路 130 の少なくとも一部によって受けられた

10

20

30

40

50

複数の外乱に関する情報を得るべく、受信した信号を分析するように構成されることができる。

【0087】

コンピュータシステム150は、電子ハードウェア、コンピュータソフトウェア、又は、両方の複数の組み合わせとして実装されることができる。ハードウェアとソフトウェアとの当該互換性を明らかに示すべく、コンピュータシステム150は、概してその機能性に関して上記で説明されてきた。そのような機能性がハードウェアとして実装されるかソフトウェアとして実装されるかは、特定の用途、及び、全体システムに課される複数の設計上の制約次第である。説明される機能性は、各々の特定の用途に対して異なる複数の方法で実装されることができるが、そのような複数の実装決定は、本開示の範囲からの逸脱を生じさせるように解釈されるべきではない。

10

【0088】

コンピュータシステム150は、本明細書で説明される複数の機能を実行するように設計された、汎用プロセッサ、デジタル信号プロセッサ(DSP)、特定用途向け集積回路(AASIC)、フィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)若しくは他のプログラマブルロジックデバイス、離散ゲート若しくはトランジスタロジック、複数の離散ハードウェアコンポーネント、又は、それらの任意の組み合わせを実装されることができ、又は、これらと共に実行されることができる。汎用プロセッサは、マイクロプロセッサであることができるが、代替案では、プロセッサは、任意の従来のプロセッサ、コントローラ、マイクロコントローラ、又は、ステートマシンであることができる。プロセッサはまた、例えば、DSPとマイクロプロセッサとの組み合わせ、複数のマイクロプロセッサ、DSPコアと一体化した1又は複数のマイクロプロセッサ、又は、何らかの他のそのような構成といった、複数のコンピューティングデバイスの組み合わせとして実装されることができる。

20

【0089】

コンピュータシステム150は、ハードウェアに、プロセッサによって実行されるソフトウェアモジュールに、又は、その2つの組み合わせに、直接埋め込まれることができる。ソフトウェアモジュールは、RAMメモリ、フラッシュメモリ、ROMメモリ、EPROMメモリ、EEPROMメモリ、複数のレジスタ、ハードディスク、リムーバブルディスク、CD-ROM、又は、当該分野で既知のコンピュータ可読記憶媒体の何らかの他の形に存在することができる。例示的な有形コンピュータ可読記憶媒体は、プロセッサが記憶媒体からの情報を読込んで、記憶媒体に情報を書き込むことができるように、プロセッサに結合される。代替案において、記憶媒体は、プロセッサと一体的であることができる。プロセッサおよび記憶媒体は、AASICに存在することができる。AASICは、ユーザー端末に存在することができる。代替案において、プロセッサおよび記憶媒体は、ユーザー端末における複数の離散コンポーネントとして存在することができる。

30

【0090】

本明細書で説明される複数の特定の実施形態は、多数の用途において使用されることができる。これらの用途は、複数の光遅延線、複数のスペクトロメータ、生体医学的、生化学的並びに他の複数のセンサ、複数の波長可変レーザ、複数の光学スイッチ、複数の分散制御デバイス、及び、非線形光学周波数変換を含む。既存の複数のCROW構造に対する、複数の特定の実施形態における螺旋導波路の複数のメリットは、複数のアーム間における結合に対して、より高い感度を有するといった前述のメリットだけでなく、コンパクト性である。

40

【0091】

様々な実施形態が、上記で説明された。本発明は、これらの特定の実施形態を参照して説明されているが、複数の説明は例示を意図したものであって、限定することを意図したものではない。当業者にとって、特許請求の範囲で定義される本発明の真の主旨および範囲から逸脱することなく、様々な変形および用途が生じ得る。

【図 1 A】

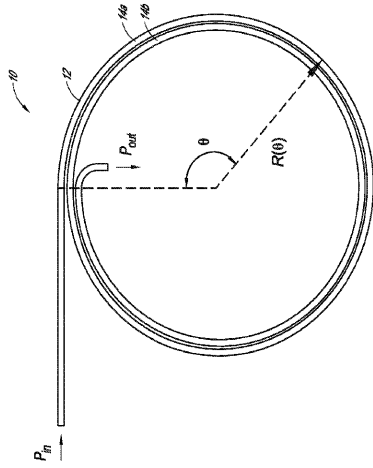
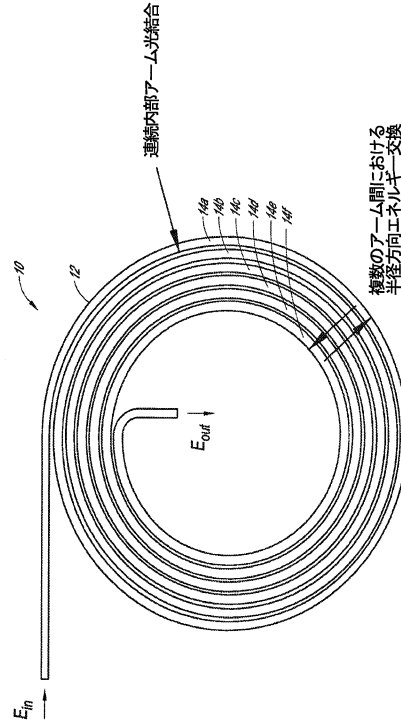
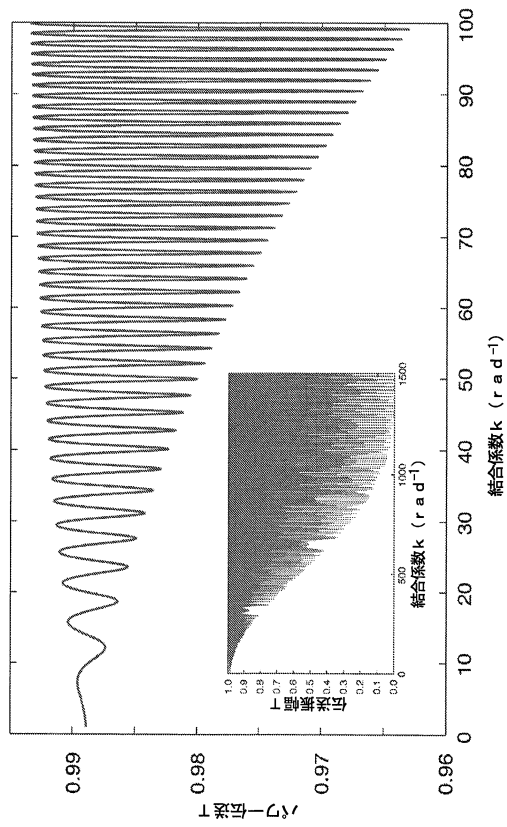


Figure 1A:

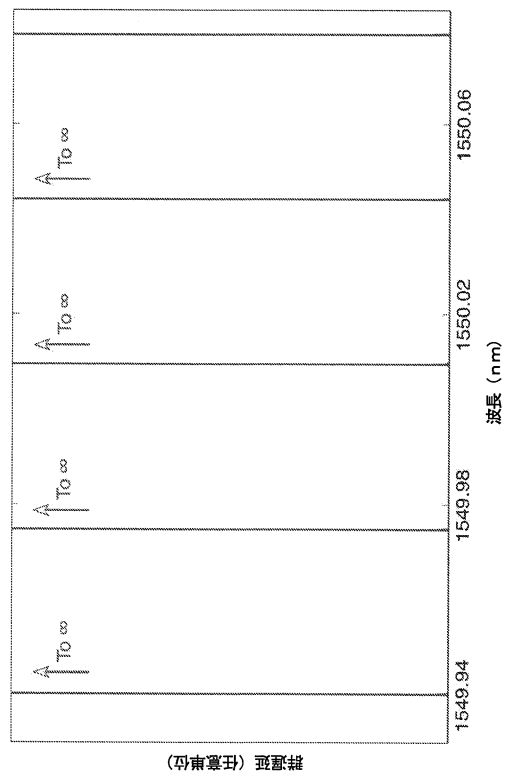
【図 1 B】



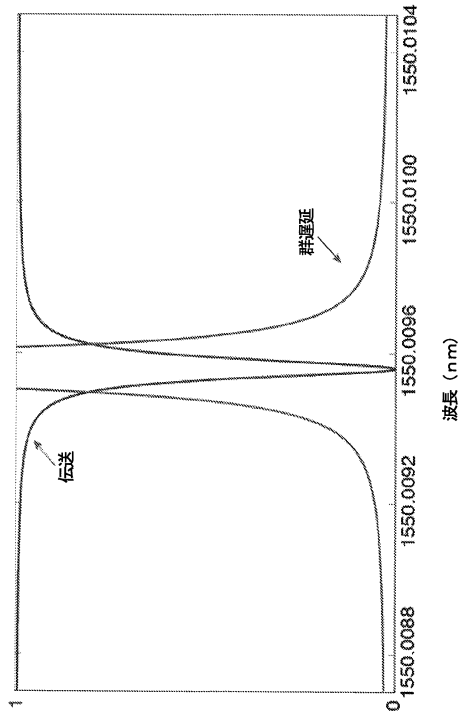
【図 2】



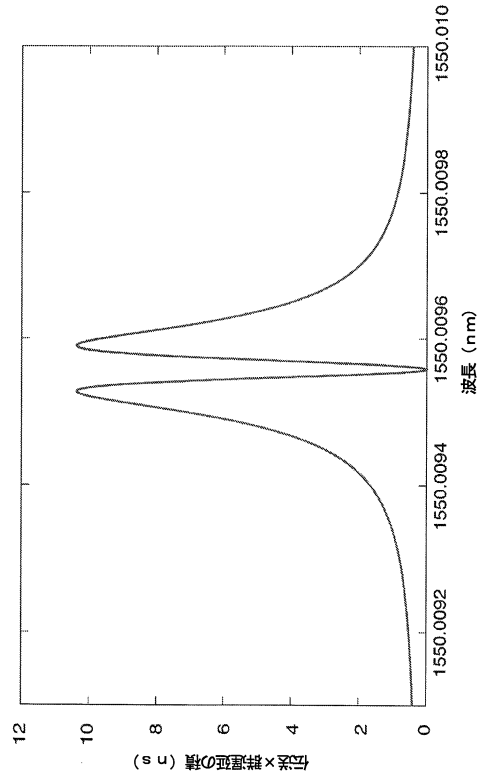
【図 3】



【 図 4 A 】



【 図 4 B 】



【 図 5 】

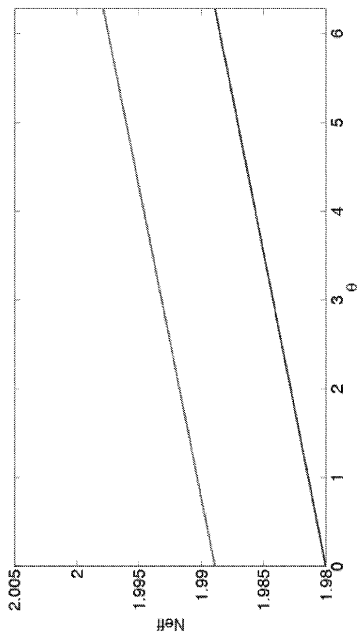
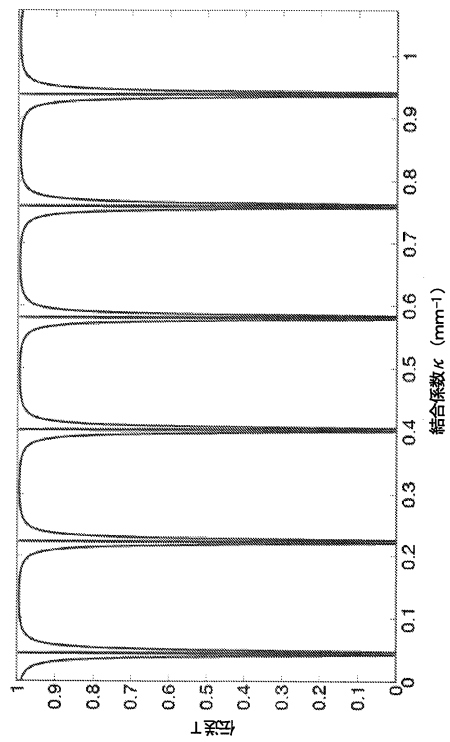
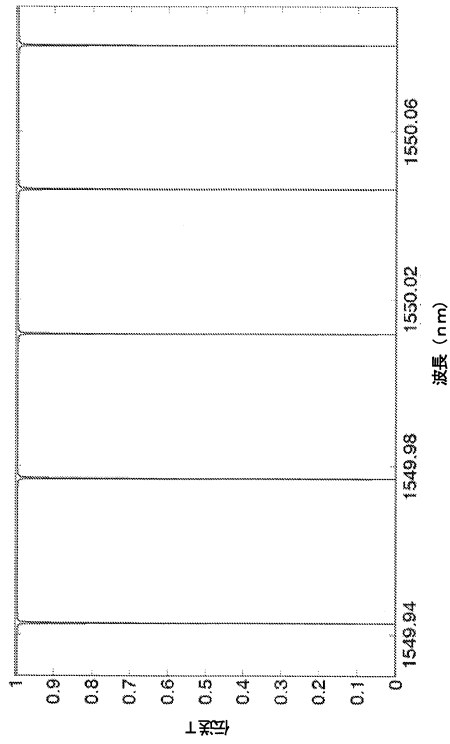


Figure 5:

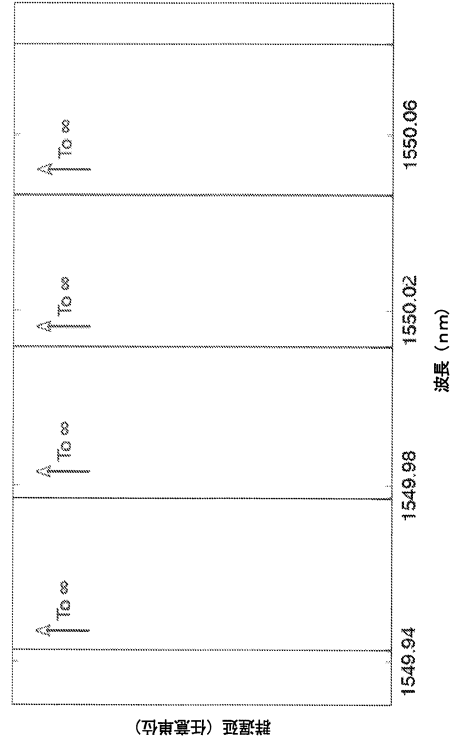
【 図 6 】



【 図 7 A 】



【 図 7 B 】



【 図 8 】

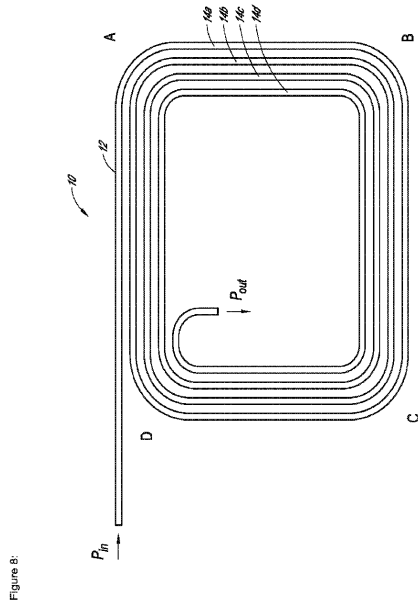
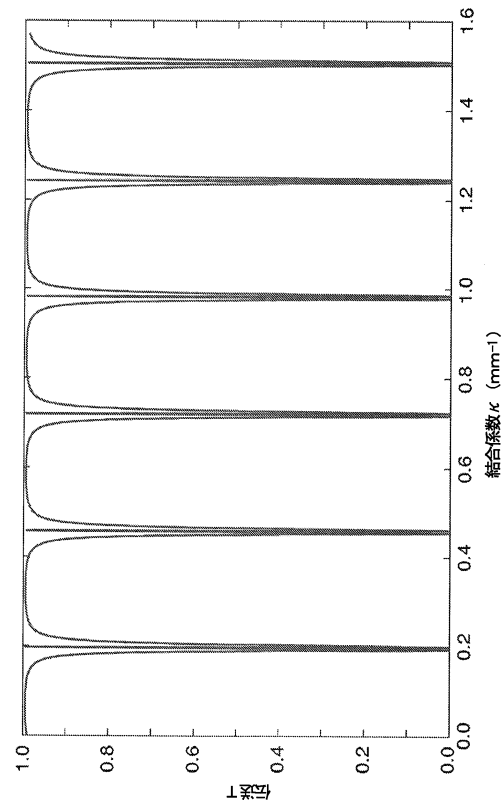
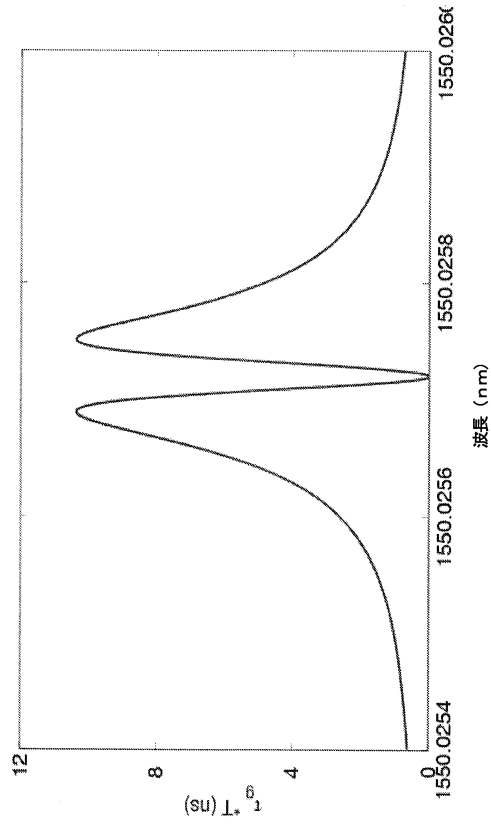


Figure 8

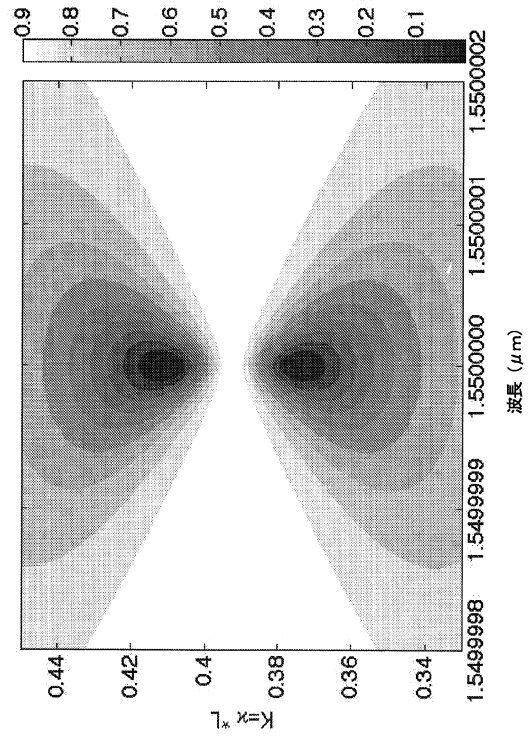
【 図 9 】



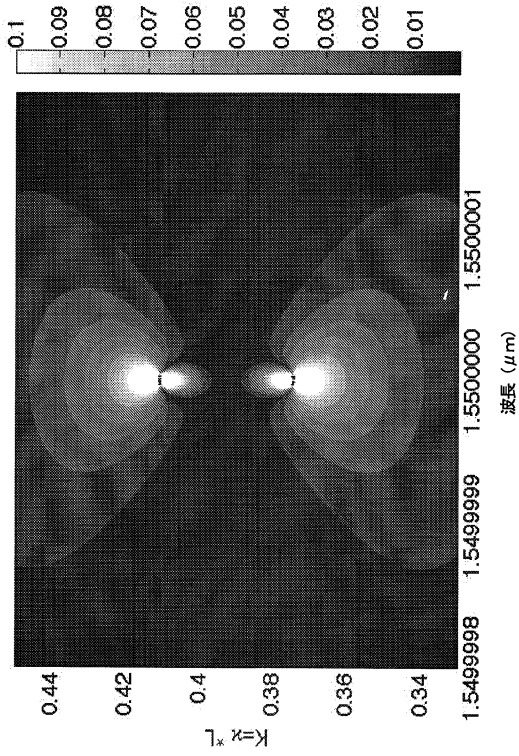
【 図 1 0 】



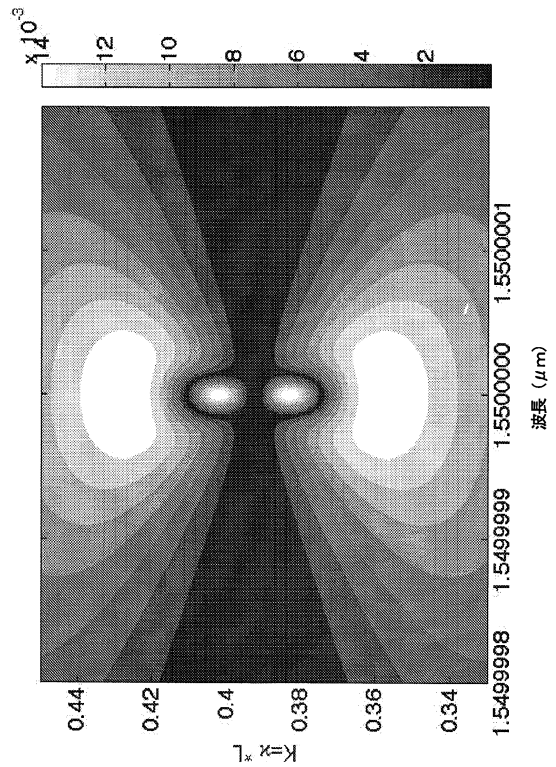
【 図 1 1 A 】



【 図 1 1 B 】



【 図 1 1 C 】



【 図 1 1 D 】

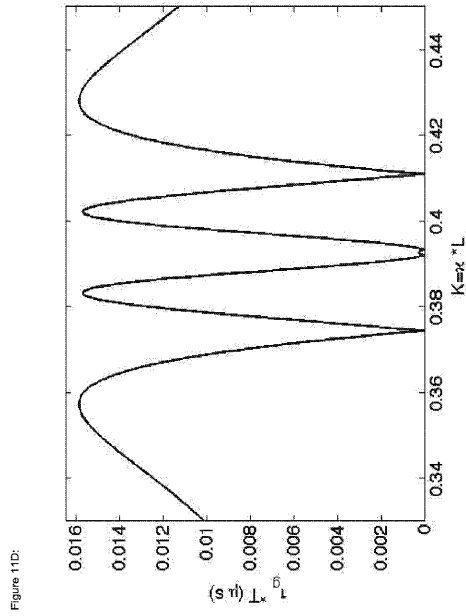
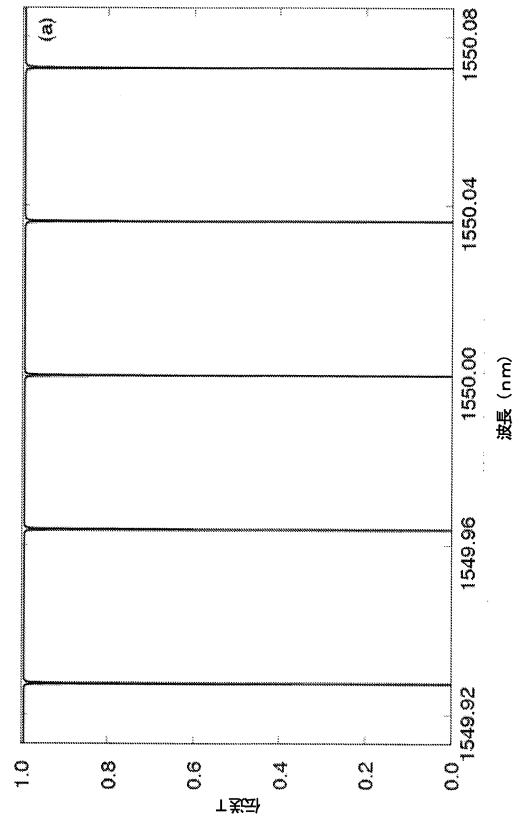
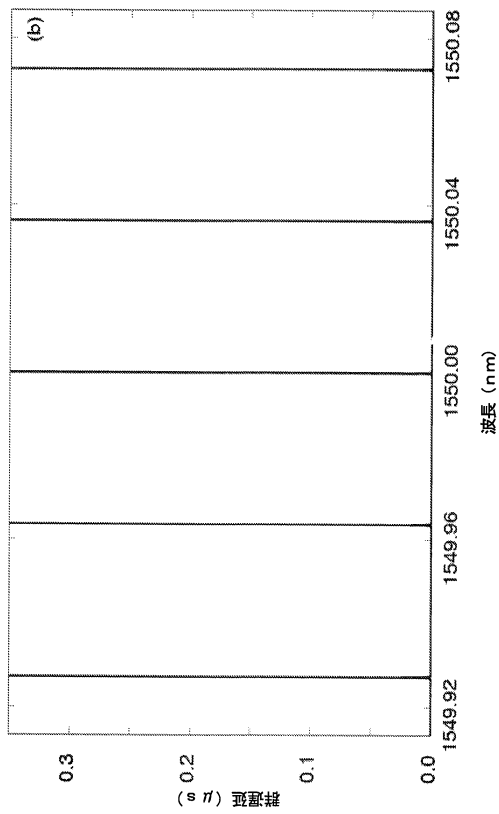


Figure 11D:

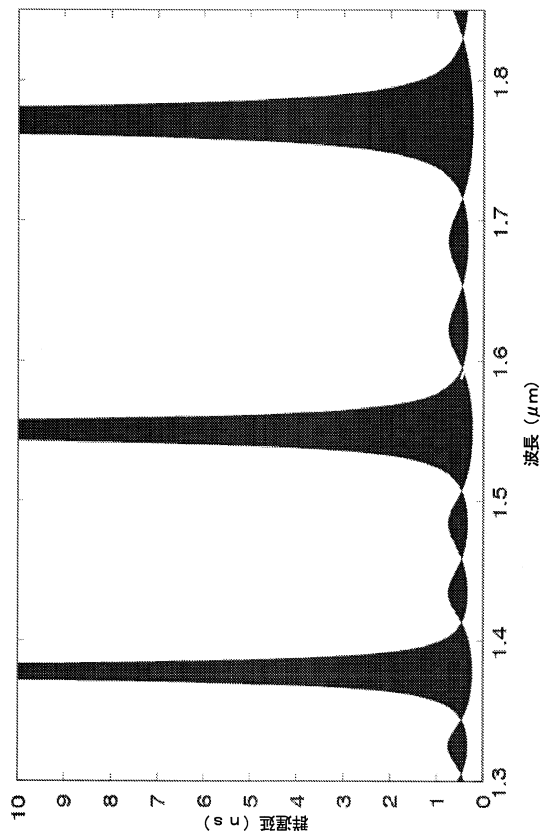
【 図 1 2 】



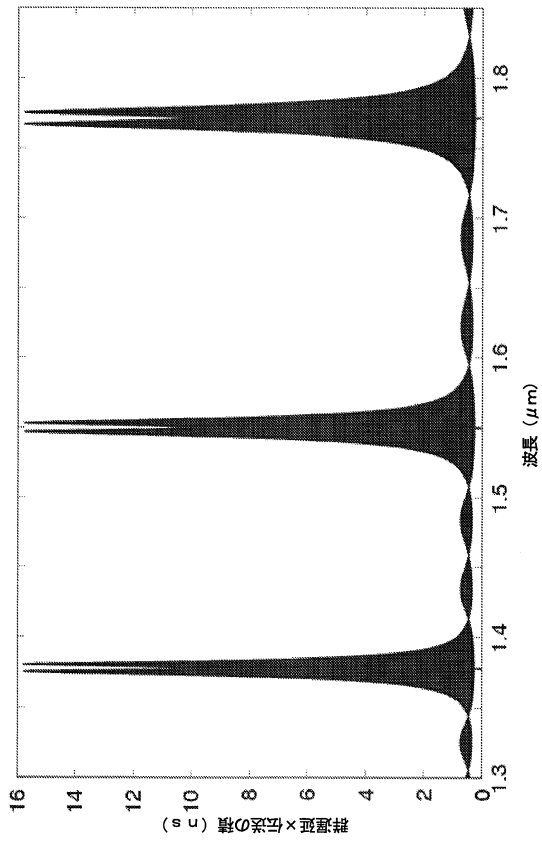
【 図 1 3 】



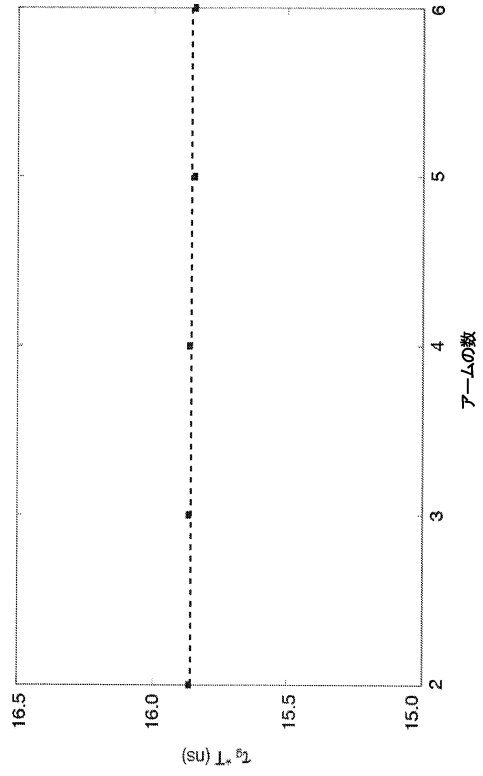
【 図 1 4 】



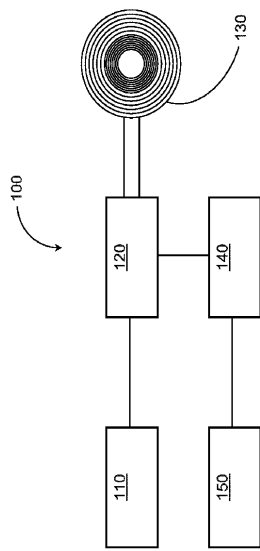
【図 15】



【図 16】



【図 17】



【図 18】

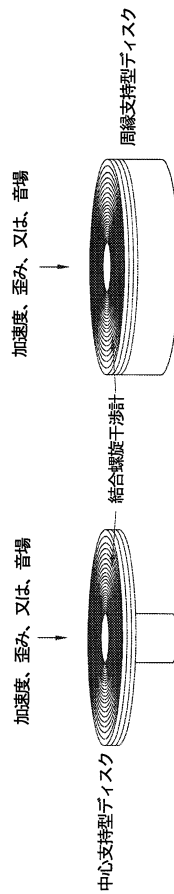
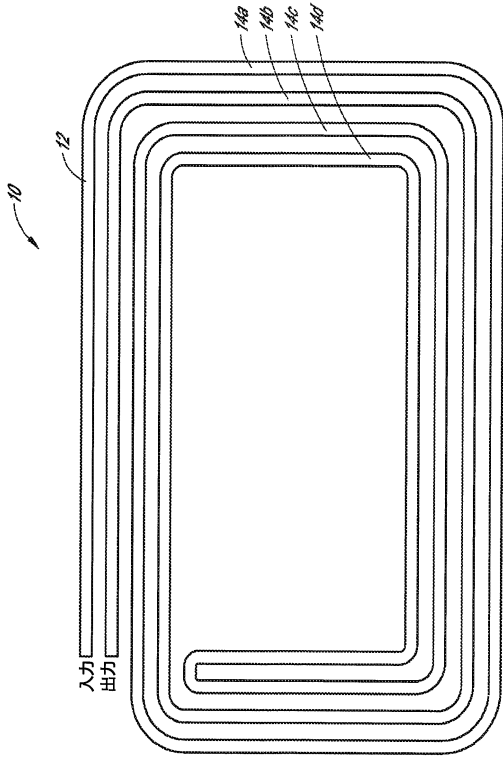
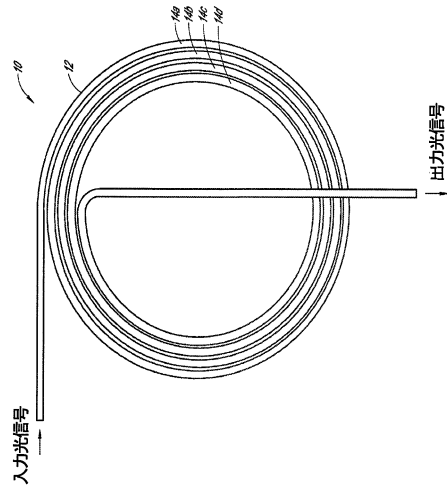


Figure 17:

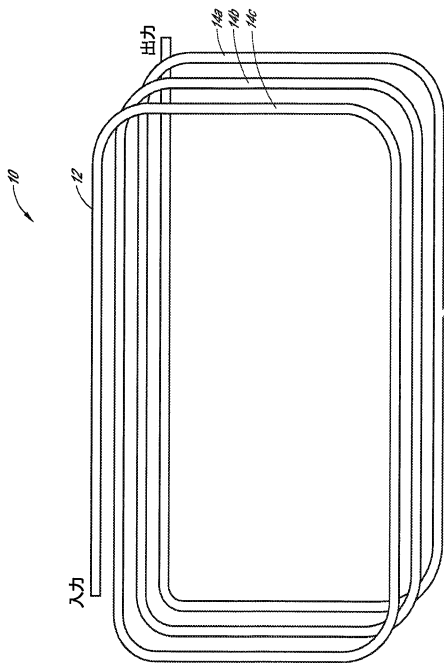
【図19A】



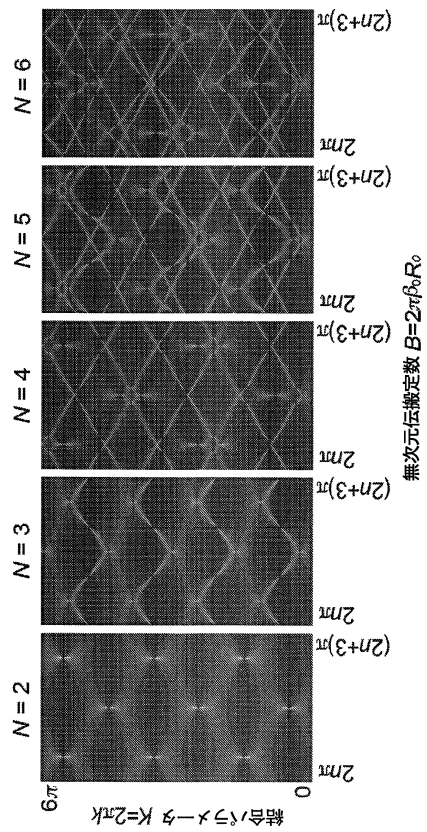
【図19B】



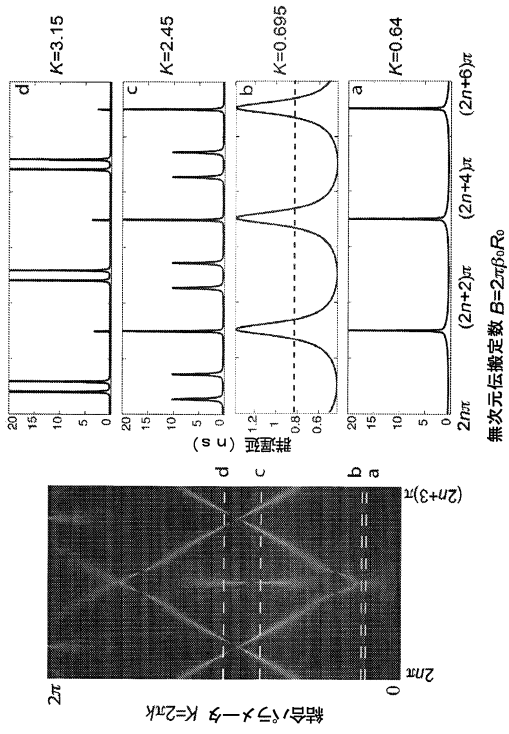
【図20】



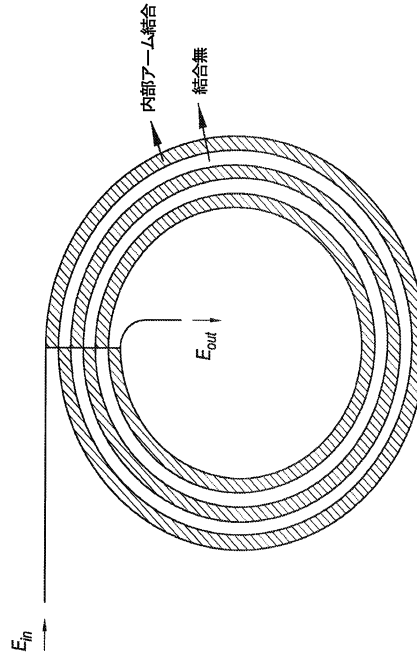
【図21】



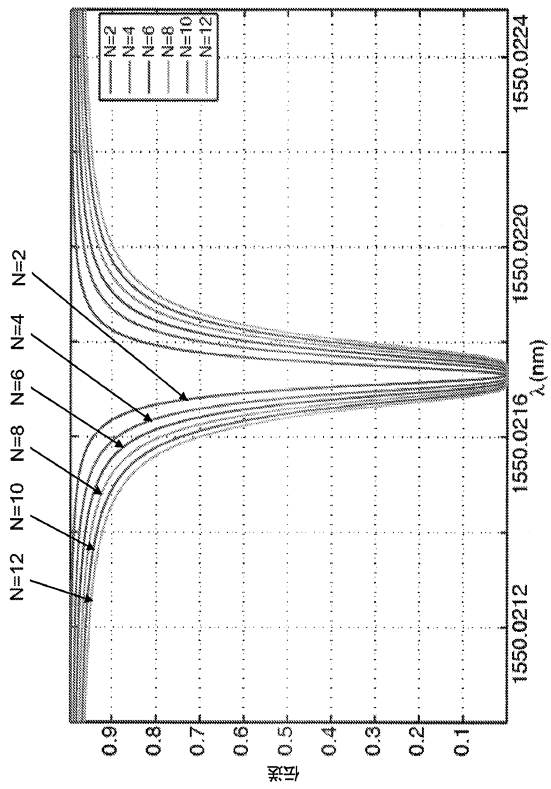
【図 2 2】



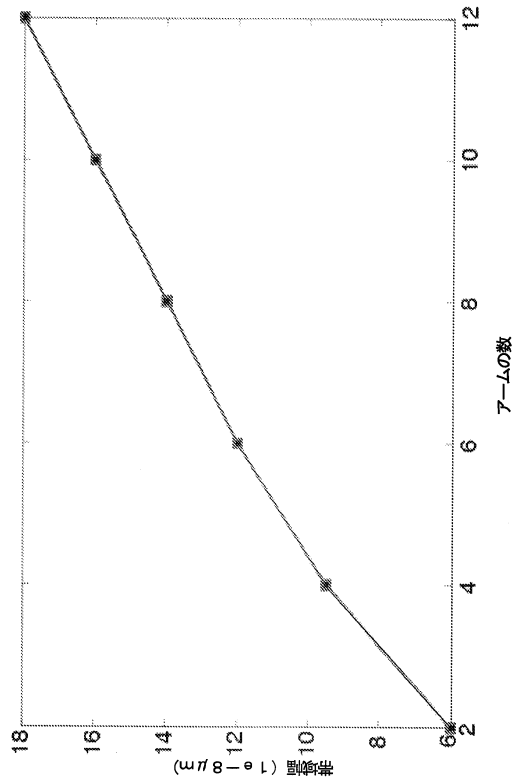
【図 2 3】



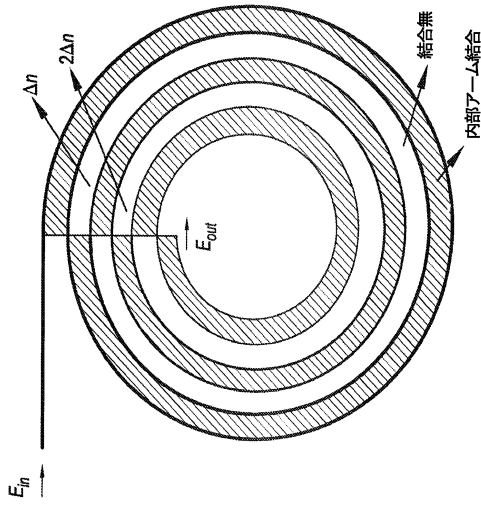
【図 2 4】



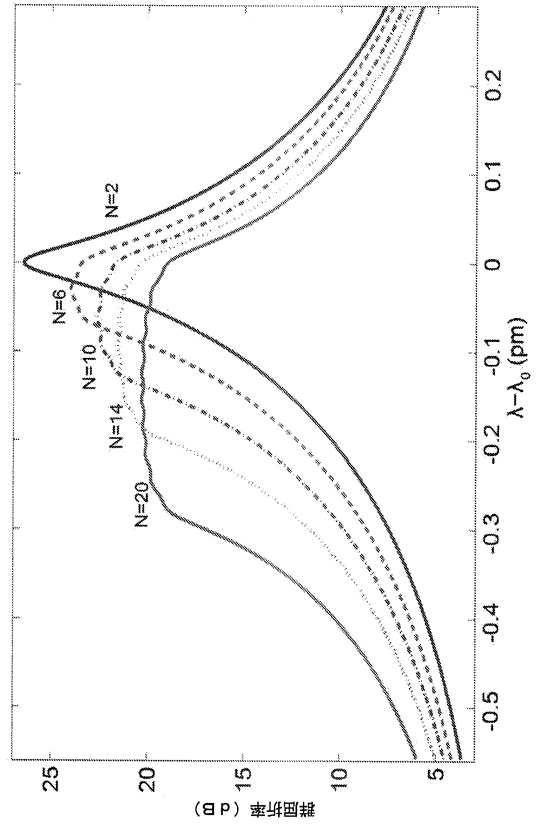
【図 2 5】



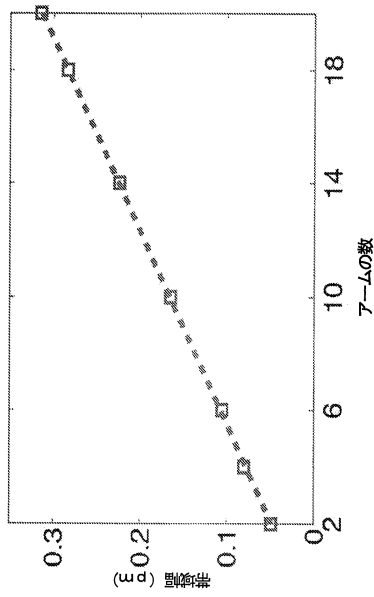
【 図 2 6 】



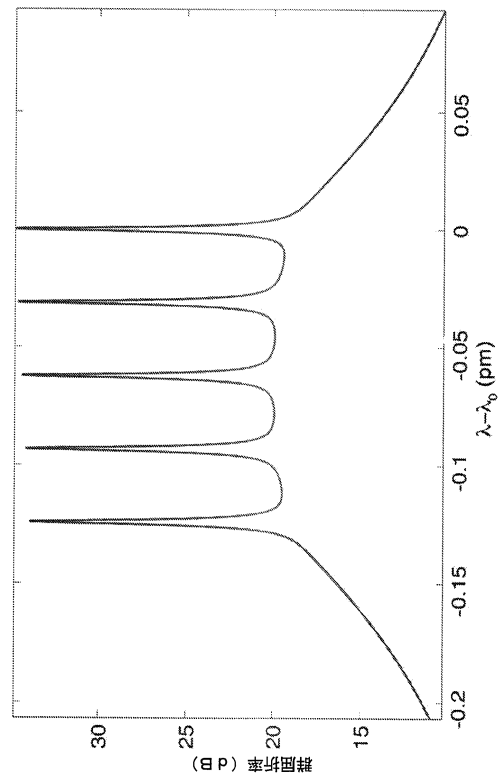
【 図 2 7 】



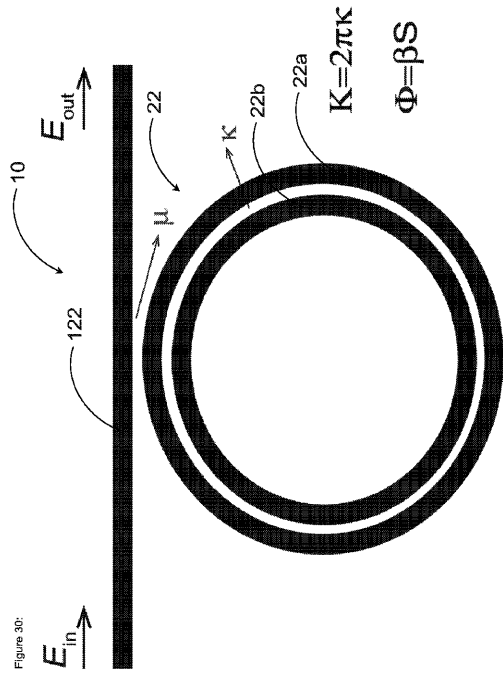
【 図 2 8 】



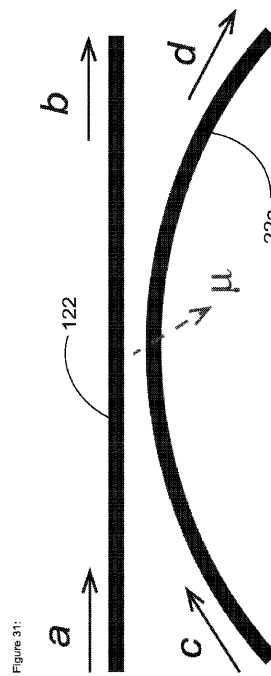
【 図 2 9 】



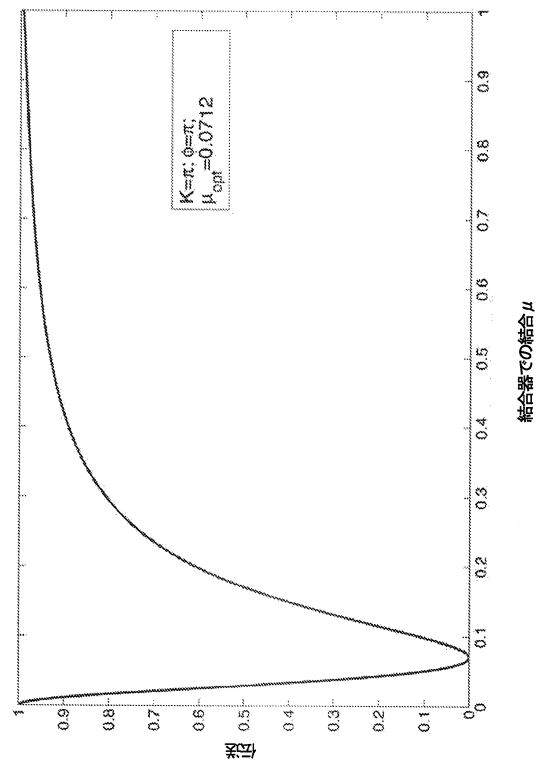
【 図 3 0 】



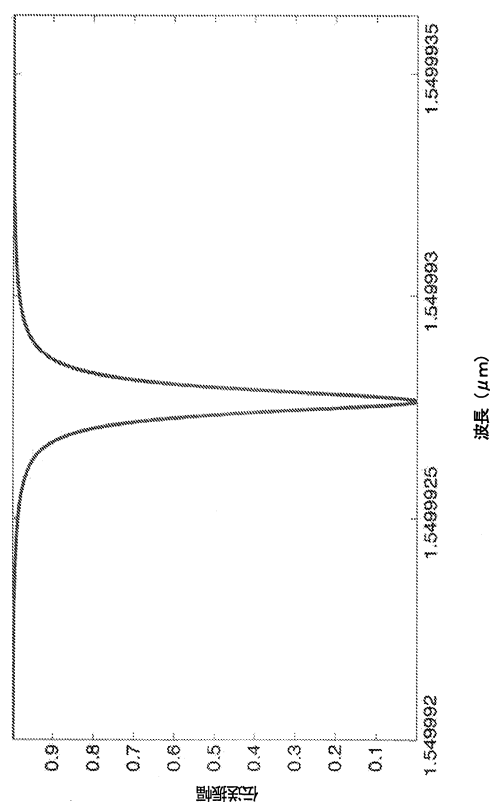
【 図 3 1 】



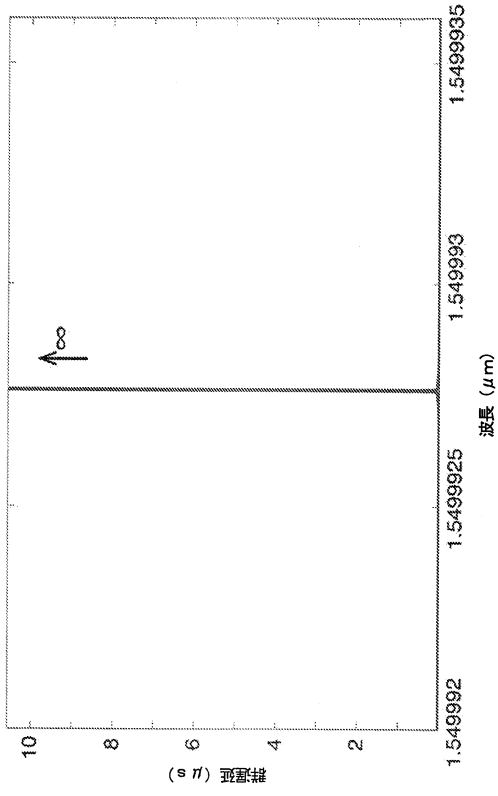
【 図 3 2 】



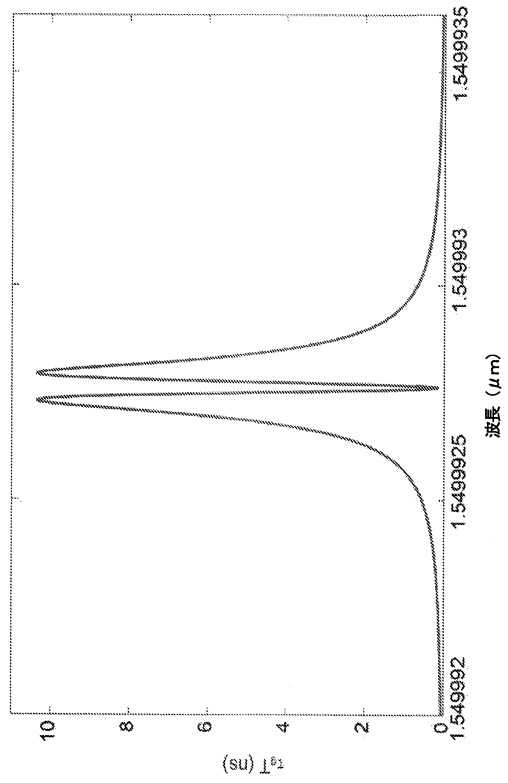
【 図 3 3 】



【 図 3 4 】



【 図 3 5 】



フロントページの続き

(72)発明者 グオ、ウェンジョン

アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94306-1106、パロ アルト エル カミノ リアル 1705 ザ ボード オブ トラスティーズ オブ ザ リーランド スタンフォード ジュニア ユニバーシティー内

(72)発明者 ディゴネ、ミッシェル、ジェイ・エフ・

アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94306-1106、パロ アルト エル カミノ リアル 1705 ザ ボード オブ トラスティーズ オブ ザ リーランド スタンフォード ジュニア ユニバーシティー内

審査官 下村 一石

(56)参考文献 米国特許第04630885 (US, A)

特開平05-346516 (JP, A)

特表2010-505125 (JP, A)

特開2009-063673 (JP, A)

特開昭48-049394 (JP, A)

米国特許第04775214 (US, A)

特開昭60-247606 (JP, A)

実開昭56-117722 (JP, U)

特開昭55-103509 (JP, A)

特開昭64-064283 (JP, A)

BOGAERTS, Wim et al, Silicon microring resonators, Laser and Photonics Reviews, ドイツ, Wiley-VCH, 2011年 9月13日, Vol.6, No.1, pp.47-73

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/12 - 6/14

G01C19/64 - 19/72

G01D 5/26 - 5/40