

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2017-520791  
(P2017-520791A)

(43) 公表日 平成29年7月27日(2017.7.27)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO2F 3/00 (2006.01)</b>	GO2F 3/00	2H137
<b>GO2B 6/12 (2006.01)</b>	GO2B 6/12 301	2H147
<b>GO2B 6/122 (2006.01)</b>	GO2B 6/122 301	2K102
<b>GO2B 6/26 (2006.01)</b>	GO2B 6/26	
<b>GO2B 6/126 (2006.01)</b>	GO2B 6/12 371	
審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 27 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2016-574167 (P2016-574167)  
 (86) (22) 出願日 平成27年6月15日 (2015. 6. 15)  
 (85) 翻訳文提出日 平成29年1月12日 (2017. 1. 12)  
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2015/063340  
 (87) 国際公開番号 W02015/193240  
 (87) 国際公開日 平成27年12月23日 (2015. 12. 23)  
 (31) 優先権主張番号 14172566.3  
 (32) 優先日 平成26年6月16日 (2014. 6. 16)  
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(71) 出願人 516376341  
 ユニバーシティ オブ コペンハーゲン  
 デンマーク国 コペンハーゲン ケー 1  
 165, ノッレゲイド 10  
 (74) 代理人 110000659  
 特許業務法人広江アソシエイツ特許事務所  
 (72) 発明者 モウモーディアン, サハンド  
 デンマーク国 コペンハーゲン ディーケ  
 ー1038, トラネハブガルド 22  
 (72) 発明者 ソレナー, インモ ナサニエル  
 デンマーク国 コペンハーゲン オー  
 ディーケー2100, ソバサーゲン 2

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 映進面对称導波管を使用する効率的なスピン光子インターフェース

(57) 【要約】

平面導波管(12)および量子発光体(18)を備える光学デバイス(1)が、提示される。平面導波管(2)は、第1の側(6)および第2の側(8)を備えた長手方向に延びる誘導領域(4)を備える。第1のナノ構造体(7)は、誘導領域(4)の第1の側(6)に配置され、第2のナノ構造体(9)は、誘導領域(4)の第2の側(7)に配置される。平面導波管(2)は、第1のナノ構造体(7)および第2のナノ構造体(9)が、平面導波管(2)の誘導領域(4)周りにほぼ映進面对称で配置される第1の長手方向領域(10)を含み、量子発光体(18)は、平面導波管(18)の第1の長手方向領域(10)に結合される。

【選択図】 図2

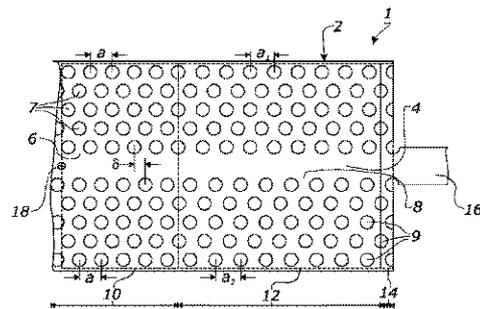


Fig. 2

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

平面導波管(12)および量子発光体(18)を備える光学デバイス(1)であって、前記平面導波管(2)は、

第1の側(6)および第2の側(8)を備えた長手方向に延びる誘導領域(4)と、

前記誘導領域(4)の前記第1の側(6)に配置された第1のナノ構造体(7)と、

前記誘導領域(4)の前記第2の側(8)に配置された第2のナノ構造体(9)と、を備え、

前記平面導波管(2)は、前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)が前記平面導波管(2)の前記誘導領域(4)周りにほぼ映進面对称で配置される第1の長手方向領域(10)を含み、

前記量子発光体(18)は、前記平面導波管(2)の前記第1の長手方向領域(10)に結合され、

前記量子発光体(18)は、円偏光される光学遷移を含み、前記平面導波管の前記誘導領域内に埋め込まれている、光学デバイス(1)。

## 【請求項 2】

前記量子発光体(18)は、量子ドットのような単一光子源である、請求項1に記載の光学デバイス。

## 【請求項 3】

前記平面導波管(2)が、フォトニック結晶導波管である、請求項1~2のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 4】

前記平面導波管(2)が、前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)が前記平面導波管(2)の前記誘導領域(4)周りにほぼ鏡対称で配置される第2の長手方向領域(14)を備える、請求項1~3のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 5】

前記平面導波管(2)が、有利には前記第1の長手方向領域(10)と前記第2の長手方向領域(14)の間に配置された遷移領域(12)を備え、前記第1および前記第2のナノ構造体(7、9)のジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する、請求項1~4のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 6】

リッジ導波管またはストリップ導波管などの従来の導波管(16)が、前記第2の長手方向領域または前記遷移領域に結合される、請求項4~5のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 7】

前記平面導波管(2)が、前記第1の長手方向領域(10)の反対の長手方向側に追加の第2の長手方向領域(14')を備え、ここでは前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)は、前記平面導波管(2)の前記誘導領域(4)周りに、好ましくは、前記第1の長手方向領域(10)と前記追加の第2の長手方向領域(14')の間に追加の遷移領域(12')を配置して鏡対称で配置され、前記第1および前記第2のナノ構造体(7、9)の前記ジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する、請求項1~6のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 8】

前記平面導波管(2)が、III-V半導体材料などの誘電材料から作製される、請求項1~7のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 9】

前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)が、第1の格子構造および第2の格子構造にそれぞれ配置され、有利には、三角形格子で格子定数aを有して配置される、請求項1~8のいずれか一項に記載の光学デバイス。

## 【請求項 10】

10

20

30

40

50

格子定数  $a$  が、 $100 \sim 500 \text{ nm}$ 、または  $150 \sim 400 \text{ nm}$ 、または  $200 \sim 300 \text{ nm}$ 、たとえば約  $250 \text{ nm}$  の間隔内にある、請求項 9 に記載の光学デバイス。

【請求項 1 1】

前記平面導波管が、 $0.2a$  から  $1a$  の間、または  $0.4a$  から  $0.8a$  の間、または  $0.3a$  から  $0.7a$  の間、たとえば、約  $0.5a$  または  $0.6a$  の厚さを有する、請求項 9 ~ 10 のいずれか一項に記載の光学デバイス。

【請求項 1 2】

請求項 1 ~ 1 1 のいずれか一項に記載の光学デバイスを備える、単一光子トランジスタ。

【請求項 1 3】

請求項 1 ~ 1 1 のいずれか一項に記載の光学デバイスを備える、制御 NOT ゲート。

【請求項 1 4】

平面導波管 (2) を備える光学デバイスであって、前記平面導波管 (2) は、第 1 の側 (6) および第 2 の側 (8) を備えた長手方向に延びる誘導領域 (4) と、前記誘導領域 (4) の前記第 1 の側 (6) に配置された第 1 のナノ構造体 (7) と、前記誘導領域 (4) の前記第 2 の側 (8) に配置された第 2 のナノ構造体 (9) と、を備え、前記平面導波管 (2) は、

前記第 1 のナノ構造体 (7) および前記第 2 のナノ構造体 (9) が前記導波管 (2) の前記誘導領域 (4) 周りに映進面对称で配置される、第 1 の長手方向領域 (10) と、前記第 1 および前記第 2 のナノ構造体 (7、9) のジオメトリが、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する、遷移領域 (12) と、を備える、光学デバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、平面導波管および量子発光体を備える光学デバイスに関する。

【背景技術】

【0002】

日常的に使用するコンピュータ上のデータは、0 および 1 の 2 進シーケンスであるビットで構成される。これらのビットは、ハードドライブ上に磁氣的にまたはフラッシュドライブ上に電氣的に記憶され得る。過去数十年の間に、量子ビットまたは「キュービット (qubit)」を使用する量子情報処理が、算出の全く新しい形として出現してきた。ビットとは異なり、単一キュービットは、量子力学的オブジェクトであり、ゼロおよび 1 の状態の組み合わせまたは重ね合わせになることができる。キュービットは、算出タスクを実行するために走査され処理され得る。

【0003】

キュービットを表す 2 つの一般的な方法は：荷電粒子の量子化された角運動量またはスピン、たとえばスピナップ = 0、およびスピндаウン = 1 を使用すること、または量子、たとえば量子が存在しない = 0、量子が存在する = 1 を使用することを含む。

【0004】

半導体量子ドット (QD) は、静止キュービットの優れた候補であることが、提案されている。その光学遷移の大きな振動子強度により、スピン状態のすばやい初期化、光学操作および読み出しが可能になる。加えて、これらの発光体のソリッドステート性質は、それらの環境をナノメートル長さスケールで構造化することを可能にし、したがってフォトリック結晶構造の作製により、光学状態のその光子局所状態密度 (LDOS) の操作が可能になる。特定の方向に沿って光を誘導するために、そのようなフォトリック結晶 (photonic crystal) は、通常、ナノ構造体が、誘導領域周りに鏡対称 (または上下対称) で配置されるジオメトリを利用する。しかし、そのようなフォトリック結晶導波管の対称性により、これらの導波管は、誘導領域に対して偶関数または奇関数である電場を有し、直線偏光した電場によって支配される。したがって、円偏光した双極子モーメントを有する量子ドットまたは任意の集積量子発光体の異なるスピン状態は、そのよう

10

20

30

40

50

な導波管に効率的に結合することはできない。

【0005】

非特許文献1は、Bタイプの導波管を開示しており、ここでは、誘導領域の各側のフォトリック結晶格子は、半周期だけ長手方向にシフトされ、それによって映進面对称を有する。Bタイプの導波管は、導波管を通して伝播する直線偏光した光の面外放射損失を低減するために使用される。

【0006】

非特許文献2は、本発明者グループによって開示されたものであり、これは、フォトリックナノ構造体内に埋め込まれた単一量子ドット内の励起子を用いて量子光学の概要を提供する。

【0007】

全体として、円偏光した遷移双極子モーメントを有する量子発光体のオンチップの効率的な読み出しを可能にする導波管に対する必要性が依然として存在する。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】Adam Mockら：「Space group theory and Fourier space analysis of two-dimensional photonic crystal waveguides」、Physical Review B、81巻、no.14

【非特許文献2】Peter Lodahlら：「Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures」、2013年12月4日、ArXiv

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の目的は、従来技術の欠点の少なくとも1つを克服または改善する、または有用な代替策を提供する光学デバイスを得ることである。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明によれば、これは、平面導波管および量子発光体を備える光学デバイスであって、平面導波管は、

- 第1の側および第2の側を備えた長手方向に延びる誘導領域と、
- 誘導領域の第1の側に配置された第1のナノ構造体と、
- 誘導領域の第2の側に配置された第2のナノ構造体と、を備え、
- 平面導波管は、第1のナノ構造体および第2のナノ構造体が導波管の誘導領域周りにほぼ映進面对称で配置される第1の長手方向領域を含み、
- 量子発光体は、平面導波管の第1の領域に結合される、光学デバイスによって得られる。

【0011】

誘導領域周りに映進面对称のナノ構造体を備えた平面導波管は、強い平面内円形偏光を有する電場を有するモードの導波管となる。構造体のモードは、遷移双極子モーメントが円偏光される、量子ドットまたは任意の集積量子発光体の異なるスピン状態に結合することができる。したがって、本発明は、光子キュービットがスピンキュービットと非常に効率的に相互作用することを可能にするフォトリックナノ構造体を提供し、それによって高効率を有する量子発光体が平面導波管に結合することができ、読み出されることが可能であるデバイスを提供する。「円偏光したモード」は、従来の意味における円偏光したものではないことに留意されたい。本発明および平面導波管に関して、電場ベクトルは、発光体の位置において構造体の平面内で円偏光される。

【0012】

量子発光体は、円偏光した光学遷移を含むことができる。したがって、量子発光体は、単一光子発光体として機能し、これは、光子を円偏光したモードで発する。そのような遷移は、ほぼ映進面对称のナノ構造体を有する平面導波管に非常に効率的に結合することが見出されている。

【 0 0 1 3 】

量子発光体は、平面導波管の誘導領域上に配置されてよく、またはその中に埋め込まれてよい。量子発光体は、たとえば、分子線エピタキシ法または堆積法によるエピタキシャル成長のものでよい。

【 0 0 1 4 】

長手方向という用語は、誘導領域が、必ずしも真っすぐな線に沿って配置されることを意味するものではないことに留意されたい。これは、光が、全体的に導波管の所与の方向に伝播することを意味する。

10

【 0 0 1 5 】

また、ナノ構造体という用語もまた、限定しすぎる形で理解されるべきではないことに留意されたい。これは、単に、ナノ構造体が、たとえば数10ナノメートルから数千ナノメートルまでのサイズの相対的に小さい寸法を有することを意味するにすぎない。さらに、用語「光学的」もまた、限定しすぎる形で理解されるべきではなく、光学範囲は、赤外光、可視光、および紫外光の両方を含むことが、認識される。さらに、本発明は、マイクロ波、X線などにも適用可能であることもまた、考えられる。したがって、用語は、そのような周波数および波長を包含することもできる。ナノ構造体は、当然ながら、所与の周波数および波長範囲にしたがって設計されなければならない。

20

【 0 0 1 6 】

通常、第1のナノ構造体および第2のナノ構造体は、なんらかの種類の周期性を有して配置される必要があり、第1のナノ構造体および第2のナノ構造体の周期性は、平面導波管の長手方向に相互にシフトされまたは並進され、こうして、鏡対称性は破られる。「ほぼ映進面对称」とは、2つのナノ構造体が、構造体の周期の25%~75%で、平面導波管の長手方向に、好ましくは約半周期で相互にシフトされることを意味する。25%シフト(または同様に75%シフト)であっても、スピン結合の結合効率性を大きく改善することが、留意される。しかし、結合効率性を最大限にするには、シフトは、およそ半周期であるべきである。したがって、相互シフトは、有利にはナノ構造体周期の30~70%、より有利には40~60%、さらにより有利には45~55%になることができ、たとえば約半周期でシフトされ得る。

30

【 0 0 1 7 】

したがって、本発明が、平面導波管および量子発光体を備える光学デバイスであって、平面導波管は、

- 第1の側および第2の側を備えた長手方向に延びる誘導領域と、
- 誘導領域の第1の側に周期性を有して配置された第1のナノ構造体と、
- 誘導領域の第2の側に前記周期性を有して配置された第2のナノ構造体と、を備え、
- 平面導波管は、第1のナノ構造体および第2のナノ構造体が、周期の25%~75%で導波管の長手方向に相互にシフトされる第1の長手方向領域を含み、
- 量子発光体は、平面導波管の第1の領域に結合される、光学デバイスを提供することも分かる。

40

【 0 0 1 8 】

ナノ構造体は、有利には、格子構造で配置され、すなわち第1のナノ構造体は、第1の格子構造で配置され、第2のナノ構造体は、第2の格子構造で配置される。ナノ構造体は、ほぼ映進面对称で配置されるため、これは、第1の格子構造および第2の格子構造が、ほぼ半周期または格子定数で導波管の長手方向に相互にシフトされることを意味する。

【 0 0 1 9 】

好ましい実施形態によれば、量子発光体は、量子ドットまたは別のタイプの単一光子源である。しかし、映進面对称を有する平面導波管はまた、たとえば、原子、イオンまたは

50

分子を有する他のシステムに適用することもできる。

【0020】

量子ドットは、有利には、1 ~ 10 nmの高さおよび10 ~ 70 nmの範囲の面内サイズを有する。量子ドットは、10<sup>4</sup>から10<sup>6</sup>数の原子からなることができる。

【0021】

平面導波管は、有利には、フォトニック結晶導波管である。

【0022】

さらに別の有利な実施形態によれば、平面導波管は、第1のナノ構造体および第2のナノ構造体が導波管の誘導領域周りに鏡対称で配置される第2の長手方向領域を含む。それにより、平面導波管を通して伝播する光は、従来の導波管と効率的に結合することができる。

10

【0023】

特定の有利な実施形態によれば、平面導波管は、有利には第1の長手方向領域と第2の長手方向領域の間に配置された遷移領域を含み、この中で第1および第2のナノ構造体のジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する。それにより、誘導されたモードは、円形偏光から直線偏光に、少ない損失でまたは損失無く徐々に変更され、従来の導波管により効率的に結合され得る。

【0024】

遷移領域の長手方向の範囲は、有利には、3 ~ 30格子定数a（またはナノ構造体周期）の範囲または4 ~ 20格子定数aの範囲内、または5 ~ 15格子定数aの範囲内であり

20

【0025】

1つの実施形態によれば、中間遷移領域の第1のナノ構造体の格子定数および/または第2のナノ構造体の格子定数は、第1の領域のものとは異なる。実際、遷移は、数多くの方法で設計され得る。第1の領域および第2の領域のナノ構造体は、たとえば、同じ格子定数aを有することができる。遷移領域の第1のナノ構造体は、格子定数a + a（またはa - a）を有することができ、一方で遷移領域の第2のナノ構造体は、第1の領域および第2の領域と同じ格子定数を（またはその逆の形で）有することができる。代替的には、遷移領域の第1のナノ構造体は、格子定数a + 0.5 aを有することができ、一方で遷移領域の第2のナノ構造体は、格子定数a - 0.5 aを有することができる。

30

【0026】

別の実施形態によれば、第1の領域の格子定数は、第2の領域の格子定数と同一である。しかし、原理上、2つの領域の格子定数は、たとえば、異なるモードプロファイルに対応するために異なることも可能である。

【0027】

さらに別の実施形態によれば、リッジ導波管またはストリップ導波管などの従来の導波管が、第2の長手方向領域または遷移領域に結合される。

【0028】

有利な実施形態によれば、平面導波管は、第1の長手方向領域の反対側に対応する設計を含むことができる。したがって、平面導波管は、第1の長手方向領域の反対の長手方向側に追加の第2の長手方向領域を備えることができ、ここでは第1のナノ構造体および第2のナノ構造体は、導波管の誘導領域周りに、好ましくは、第1の長手方向領域と追加の第2の長手方向領域の間に追加の遷移領域を配置して鏡対称で配置され、この中では第1および第2のナノ構造体のジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する。こうして、量子発光体が第1の長手方向領域内に結合され、次いで、誘導領域内で、第2の長手方向領域または追加の第2の長手方向領域に向かって伝播する実施形態が、提供されることが分かる。発せられた光子は、高い確率で、光子のスピン状態に応じた特有の伝播方向に結合する。

40

【0029】

別の有利な実施形態によれば、平面導波管は、III-V半導体材料などの誘電材料か

50

ら作製される。材料は、たとえば、ヒ化ガリウム ( Gallium Arsenide ) ( GaAs )、インジウムガリウムヒ化物 ( Indium Gallium Arsenide ) ( InGaAs )、またはヒ化アルミニウム ( Aluminum Arsenide ) ( AlAs ) から作製されてよい。これは、たとえば量子ドットに特に適合される導波管を提供する。量子ドットはまた、好ましくは、III-V 半導体材料から作製される。

【0030】

有利には、第1のナノ構造体および/または第2のナノ構造体は、空気孔を含む。しかし、原理上、ナノ構造体はまた、平面導波管材料の他の部分とは異なる材料で、他の部分のものとは異なる屈折率を有して作製されてもよい。

10

【0031】

1つの実施形態では、平面導波管は、2~5、または2.5~4.5の範囲内、たとえば約3.5の屈折率を有する材料で作製され、すなわち、この材料は、たとえば、高屈折率誘電体から作製される。別の実施形態では、平面導波管材料および第1および第2のナノ構造体の屈折率の相違は、1~4、または1.5~3.5の範囲内、たとえば約2.5である。

【0032】

さらに別の実施形態では、平面導波管は、620~1200nmの範囲内の波長間隔内で光を誘導するように適合され、量子発光体は、前記間隔内の波長を有する光子を発する。

20

【0033】

有利な実施形態によれば、第1のナノ構造体および第2のナノ構造体は、第1の格子構造および第2の格子構造でそれぞれ配置され、有利には、三角形格子で格子定数  $a$  を有して配置される。通常、ナノ構造体の設計、たとえば、フォトニック結晶導波管の格子構造は、所望の誘導されるモードに合致させなければならない。導波管内波長は、たとえば、格子定数の長さの2倍になり得る。

【0034】

別の有利な実施形態によれば、格子定数  $a$  は、100~500nm、または150~400nm、または200~300nm、たとえば約250nmの間隔内にある。

【0035】

1つの実施形態では、ナノ構造体は、ほぼ円形に成形され、 $0.2a$  から  $0.4a$  の間、たとえば約  $0.3a$  の直径を有する。

30

【0036】

誘導領域は、たとえば、100~1000nmの範囲内になり得る。誘導領域は、しばしば、穴列を取り除くことによって形成される。したがって、第1の側および第2の側の近位のナノ構造体の中心(たとえば穴)間の横断方向距離は、格子定数  $a$  の3倍である。

【0037】

平面導波管は、有利には、 $0.2a$  から  $1a$  の間、または  $0.4a$  から  $0.8a$  の間、または  $0.3a$  から  $0.7a$  の間、たとえば、約  $0.5a$  または  $0.6a$  の厚さを有することができる。代替的には、平面導波管は、50~500nm、または75~350nm、または100~250nmの範囲内、たとえば約150nmの厚さを有することができる。したがって、平面導波管がスラブ導波管であり、またはこの技術分野では膜と呼ばれるものでもあることが分かる。

40

【0038】

平面導波管は、有利には、平面導波管の少なくともかなりの部分に沿って浮体構造体として設計される。そのような設計は、光が面外で結合されることを最小限にすることによって損失を最小限にする。

【0039】

光学デバイスは、たとえば、量子コンピュータ、光学コンピュータ、および量子情報技

50

術の必須の構築ブロックである単一光子トランジスタまたは制御NOT (cNot) ゲートでよく、または同じようにして、本発明は、

- 前述の実施形態のいずれかによる光学デバイスを備える単一光子トランジスタ、または
- 前述の実施形態のいずれかによる光学デバイスを備える制御NOTゲートを提供する。

【0040】

本発明の目的はまた、平面導波管（または平面導波管を備える光学デバイス）によって達成され、ここでは平面導波管は、

- 第1の側および第2の側を備えた長手方向に延びる誘導領域と、
- 誘導領域の第1の側に配置された第1のナノ構造体と、
- 誘導領域の第2の側に配置された第2のナノ構造体と、を備え、  
導波管は、
- 第1のナノ構造体および第2のナノ構造体が、導波管の誘導領域周りにほぼ映進面对称で配置される、第1の長手方向領域と、
- 第1および第2のナノ構造体のジオメトリが、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する、遷移領域と、を備える。

【0041】

これは、効率的に、量子発光体から発せられた光子をインカップルし、光子を他の光学デバイスにアウトカップルするように特に適合された平面導波管を提供する。

【0042】

第1のナノ構造体および第2のナノ構造体は、有利には、格子配置、好ましくは三角形配置で配置される。平面導波管は、有利には、フォトニック結晶導波管である。通常、平面導波管は、前述の実施形態のいずれかによる設計を有することができる。したがって、用語「長手方向」および「ほぼ映進面对称」に関連する定義はまた、前記平面導波管にも適用する。

【0043】

本発明は、図に示す実施形態を参照して以下で詳細に説明される。

【図面の簡単な説明】

【0044】

【図1】鏡対称ナノ構造体を有する従来のフォトニック結晶導波管を示す図である。

【図2】本発明による平面導波管の第1の図である。

【図3a】図1に示す従来のフォトニック結晶導波管内の電場振幅を示す図である。

【図3b】図1に示す従来のフォトニック結晶導波管内の電場振幅を示す図である。

【図3c】本発明による平面導波管内の電場振幅を示す図である。

【図3d】本発明による平面導波管内の電場振幅を示す図である。

【図4】本発明による平面導波管の第2の図である。

【図5】量子ドット内の荷電励起子のレベルスキームである。

【図6】本発明による、導波管内の両側の円偏光を有する双極子の発光強度の数値モデル化を示す図である。

【図7】本発明による、平面導波管を実装する光学デバイスの第1の実施形態を示す図である。

【図8】本発明による、平面導波管を実装する光学デバイスの第2の実施形態を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0045】

図1は、上下対称とも呼ばれる、誘導領域周りに鏡対称ナノ構造体を有する従来の導波管を示す。図内の円は、GaAsなどの高屈折率の誘電材料の空気穴のナノ構造体を表す。格子は、図に示す中央領域である誘導領域内に光を誘導することを可能にする光子バンドギャップを有し、ここには円は存在しない。

【0046】

図3aおよび3bは、屈折率  $n = 3.46$ 、半径  $r = 0.3a$ 、および導波管厚さ  $t =$

10

20

30

40

50

0.6aを有する対称フォトニック結晶膜導波管における代表的なモードの電場を示しており、ここでaは、格子周期である。図3aは、電場のx成分を示し、図3bは、y成分を示す。鏡対称により、これらの導波管は、導波管中心(y=0)に対して偶関数または奇関数である電場を有し、そのような導波管モードは、直線偏光される電場によって支配される。

#### 【0047】

円形双極子に効率的に結合するのに必要とされる場のタイプは、その場において、上記の対称制限を有する伝播モードの最大値を得ることは不可能である。したがって、効率的なオンチップのスピンの読み出しの必要性が依然として存在する。

#### 【0048】

これは、本発明により、図2に示すような光学デバイス1によって得られる。光学デバイス1は、第1の側6および第2の側8を備えた長手方向に伸びる誘導領域4を備える平面導波管2を備える。格子定数aで三角形格子構造に配置された穴を含む第1のナノ構造体7が、誘導領域4の第1の側6に位置付けられ、格子定数aで三角形格子構造に配置された穴を含む第2のナノ構造体9が、誘導領域4の第2の側8に位置付けられる。

#### 【0049】

平面導波管2は、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体9が平面導波管2の誘導領域4周りにほぼ映進面对称で配置される、第1の長手方向セクション10を含む。たとえば量子ドットの形態の量子発光体18が、第1の長手方向領域10の誘導領域4内に埋め込まれる。本発明において定義するように、用語「ほぼ映進面对称」は、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体9が、長手方向に並進長さで相互にシフトされまたは並進されることを意味し、ここで並進長さは、0.25a~0.75aの範囲内であり、好ましくは、は、およそ0.5aである。

#### 【0050】

誘導領域4周りに映進面对称ナノ構造体7、9を備えた平面導波管2は、強い面内円偏光を有する電場を有するモードの導波管である。構造体のこのモードは、遷移双極子モーメントが円偏光される、量子ドットまたは任意の集積量子発光体の異なるスピン状態に結合することができる。したがって、本発明は、光子キュービットがスピンキュービットと非常に効率的に相互作用することを可能にするフォトニックナノ構造体を提供し、それによって高効率の量子発光体18が平面導波管2に結合することができ、読み出されることが可能である、デバイスを提供する。

#### 【0051】

この技術的効果が、図3cおよび3dに示され、これらの図は、図1に示す例と同じ屈折率および格子特性を有する映進面对称導波管のモードの電場の大きさを示す。ここでは、場は、右側および左側の円偏光した場成分に関連して示される。 $E_R$ は、 $E_L$ がゼロであるとき最大になることが分かり得る。したがって、このモードは、強い面内円偏光を有する。右伝播モードの強い右側の円偏光を有する位置は、左電場モードの強い左側の円偏光を有する。ここで与えられた例は、フォトニック結晶導波管に基づくが、この映進面对称は、場合によっては、任意のナノ構造化された導波管に実装することができる。

#### 【0052】

平面導波管は、有利には、III-V半導体材料などの誘電材料から作製される。材料は、たとえば、ヒ化ガリウム(GaAs)、インジウムガリウムヒ化物(InGaAs)、またはヒ化アルミニウム(AlAs)から作製されてよい。これは、たとえば量子ドットに特に適合される導波管を提供する。量子ドットはまた、好ましくは、III-V半導体材料から作製される。量子ドットは、有利には、1~10nmの高さ、および10~70nmの範囲内の面内サイズを有し、およそ10<sup>5</sup>の原子からなることができる。1つの有利な実施形態では、平面導波管2は、GaAsから作製され、量子ドットは、InGaAsから作製される。量子発光体は、たとえば、分子線エピタキシャル成長のものでよい。

#### 【0053】

10

20

30

40

50

通常、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体9は、なんらかの種類の周期構造または格子構造を有して配置される必要があり、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体の構造は、図1に示すような鏡対称ナノ構造体を有する導波管と比較して、平面導波管2の長手方向に相互にシフトされることが、認識される。格子周期の25%の小さいシフト（または同様に75%シフト）であっても、スピン結合の結合効率性を大きく改善することが、留意される。しかし、結合効率性を最大限にするには、シフトは、およそ半周期であるべきである。

【0054】

図2に示すように、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体9は、格子定数 $a$ を有する三角形格子で配置され得る。格子定数 $a$ は、有利には、100~500nm、たとえば約250nmの間隔内にあることができる。ナノ構造体は、ほぼ円形に成形されてよく、 $0.2a$ から $0.4a$ の間、たとえば約 $0.3a$ の直径を有することができる。

10

【0055】

誘導領域は、たとえば、100~1000nmの範囲内であってよい。誘導領域は、しばしば、穴列を取り除くことによって形成される。したがって、第1の側および第2の側の近位のナノ構造体（たとえば穴）の中心間の横断方向距離は、格子定数 $a$ のおよそ3倍である。

【0056】

第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体9は、空気穴を含むことができる。しかし、原理上、ナノ構造体7、9はまた、平面導波管材料の他の部分とは異なる材料で、他の部分のものとは異なる屈折率を有して作製されてもよい。平面導波管2は、620~1200nmの範囲内の波長間隔内で光を誘導するように適合されてよく、これに対応して、量子発光体は、前記間隔内の波長を有する光子を発する。

20

【0057】

平面導波管2は、有利には、約 $0.5a$ ~ $0.6a$ 、または同様に125~150nmの範囲内の厚さを有することができる。したがって、平面導波管2がスラブ導波管であり、またはこの技術分野では膜と呼ばれるものでもあることが分かる。平面導波管2は、有利には、平面導波管2の少なくともかなりの部分に沿って浮体構造体として設計される。そのような設計は、光が面外で結合されることを最小限にすることによって損失を最小限にする。

30

【0058】

全体として、量子発光体18を平面導波管2の第1の長手方向領域10内に配置するまたは埋め込むことにより、極めて効率的なスピン光子インターフェースがもたらされることが分かる。しかし、このインターフェースは、量子情報技術システム内に実装するために、標準的なオンチップ導波管技術と組み合わせられる必要が依然としてある。

【0059】

スピン光子インターフェースを標準的な導波管技術への読み出しと組み合わせるために、平面導波管2は、第2の長手方向領域14を備え、この中で、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体9は、誘導領域4周りにほぼ鏡対称（または上下対称）で配置される。遷移領域12が、第1の長手方向セクション10と第2の長手方向セクション14の間に配置され、この中で、第1のナノ構造体7および第2のナノ構造体10のジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する。それにより、誘導されたモードは、円形偏光から直線偏光に、少ない損失でまたは損失無く徐々に変更される。光は、それによって、より効率的に変換され、図2に示すようにリッジ導波管16などの従来の導波管技術に結合され得る。

40

【0060】

第1の長手方向領域10の長手方向範囲は、有利には、1~30格子定数 $a$ （またはナノ構造体周期）の範囲、たとえば約5~6格子定数 $a$ でよい。遷移領域12の長手方向範囲は、有利には、3~30格子定数 $a$ （またはナノ構造体周期）の範囲内または4~20格子定数 $a$ の範囲内、または5~15格子定数 $a$ の範囲内、たとえば約8格子定数 $a$ でよ

50

い。適切な変換が遷移領域 1 2 を通して得られる限り、第 2 の長手方向領域 1 4 の長さに関してそれ自体として制限は存在しない。したがって、第 2 の長手方向領域 1 4 は、そのようにして遷移領域 1 2 の端部だけを構成することができる。

【 0 0 6 1 】

1 つの実施形態によれば、中間遷移領域 1 2 の第 1 のナノ構造体 7 の格子定数および / または第 2 のナノ構造体 9 の格子定数は、第 1 の領域 1 0 のものとは異なる。実際、遷移は、数多くの方法で達成され得る。第 1 の領域 1 0 および第 2 の領域 1 4 のナノ構造体は、たとえば、同じ格子定数  $a$  を有することができる。遷移領域 1 2 の第 1 のナノ構造体 7 は、格子定数  $a_1 = a + a$  (または  $a_1 = a - a$ ) を有することができ、一方で遷移領域 1 2 の第 2 のナノ構造体 9 は、第 1 の領域 1 0 および第 2 の領域 1 4 と同じ格子定数 ( $a_2 = a$ ) を (またはその逆の形で) 有することができる。代替的には、遷移領域 1 2 の第 1 のナノ構造体 7 は、格子定数  $a_1 = a + 0.5 a$  を有することができ、一方で遷移領域 1 2 の第 2 のナノ構造体 9 は、格子定数  $a_2 = a - 0.5 a$  を有することができる。通常、遷移は、 $a / 2 a$  周期にわたって得ることができることが分かる。

10

【 0 0 6 2 】

好ましくは、第 1 の長手方向領域 1 0 の格子定数は、第 2 の長手方向領域 1 4 の格子定数と同一である。しかし、原理上、2 つの領域の格子定数は、たとえば、異なるモードプロファイルに対応するために異なることも可能である。

【 0 0 6 3 】

円偏光した光学遷移を有する量子発光体が、平面導波管 2 の第 1 の長手方向領域 1 0 に関して示すような映進面对称導波管内に配置される場合、発せられる光子の発光方向は、遷移の掌性によって決定される。発光の指向性結合確率  $\Gamma_{dir}$  は、提案された構造体内の値に到達し、1 に近づく。この指向性結合の効率性は、光子が導波管に結合する確率と、これが正しい方向に伝播する確率  $F_{dir}$  との積である。これは直接的に、発光体のスピンをうまく読み出す確率となり、これは、量子情報技術において提案された用途の利点の重要事項である。図示する実施形態では、量子ドット 1 8 は、映進面对称導波管に結合されるが、この考えは、いかなる量子発光体にも拡張することができる。

20

【 0 0 6 4 】

これらの構造体内の高い指向性発光は、量子ドット内の単一電子のスピン状態を読み出すために使用することができる。縮退したトリオン遷移と共鳴した直線偏光  $\pi$  パルスは、量子ドット群を、図 5 に示すように、基底状態の初期のスピン配向に応じて 2 つの励起された状態のうち 1 つに移す。発光を確実にする伝播方向は、減衰チャネルの遷移双極子の偏光に強く相関付けられる。発せられた光子が正しい方向に伝播する確率として定義される成功確率は、 $P_s = \Gamma_{dir}$  によって与えられ、一方で、光子が間違った方向に伝播する確率は、 $P_{err} = (1 - F_{dir})$  によって与えられる。

30

【 0 0 6 5 】

これは、単一量子ドットとこれらが発する光子との間にスピン経路のもつれを生み出すために活用される。スピニアップ  $|\uparrow\rangle$  またはスピンドアウン  $|\downarrow\rangle$  のスピキュービットの初期化は、適切に円偏光したレーザを用いて 2 つの遷移のうち 1 つを駆動することによって光学的に行われ得る。この後にスピンの  $\pi/2$  回転が続けられて、これを 2 つの基底状態のコヒーレント重ね合わせ状態に置く。 $\pi$  パルス励起は、単一光子の発光を導き、その伝播方向は、スピンともつれ合う。

40

【 数 1 】

$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{B_{xy, \pi/2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \xrightarrow{\pi} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow, R\rangle + |\downarrow, L\rangle),$$

式中、 $|\downarrow, L\rangle$  および  $|\downarrow, R\rangle$  は、左および右の伝播光子を示す。

【 0 0 6 6 】

発せられた光子は、2方向に発せられ得るため、平面導波管はまた、追加の第1の長手方向領域10'と、追加の遷移領域12'と、追加の第2の長手方向領域14'とを備え、これらの領域は、図4に示すように、第1の長手方向領域10の反対の長手方向側に位置決めされ、第1の長手方向領域10、遷移領域12、および第2の長手方向領域14それぞれと同じジオメトリ特性を有する。同様に、追加の第2の長手方向領域14'は、リッジ導波管16'または別の従来の導波管に結合され得る。こうして、量子発光体18が第1の長手方向領域10、10'内に結合され、次いで、誘導領域4内を第2の長手方向領域14または追加の長手方向領域14'に向かって伝播する平面導波管2が提供されることが分かる。発せられた光子は、高い確率で、光子のスピン状態に応じた特有の伝播方向に結合する。

10

## 【0067】

図5は、スピナップおよびスピンドアウン基底状態を有する、量子ドット内の負の荷電励起子の電子レベルを示す。これらの基底状態のいずれかが共鳴して励起される場合、これらは、自発的に光子を発し、同じ基底状態に戻る。発光プロセスの遷移双極子モーメントは、光子のスピン基底状態に応じて決まる。スピナップ基底状態の場合、双極子モーメント $\mu_{+}$ は、右側の円偏光した双極子モーメントを有し、一方でスピナップ基底状態は、左側の円偏光した双極子モーメント $\mu_{-}$ を有する。点線の直交線は、双極子の「許されない」遷移を示す。

## 【0068】

2つの双極子モーメント $\mu_{+}$ 、 $\mu_{-}$ は、両側の円偏光を有するため、量子発光体18から発せられた光子は、図4に示す平面導波管内の右または左に結合される。2つの遷移双極子モーメント $\mu_{+}$ 、 $\mu_{-}$ は、こうして、種々の方向に伝播するモードに結合し、量子ドット内の電子のスピンは、発せられた光子の方向を決定する。これは図6に示され、この図では、両側の円偏光を有する双極子の発光の数値モデル化を示し、この場合、図6aは、左側の円偏光した双極子 $\mu_{-}$ が左伝播モードに結合することを示し、一方で図6bは、右側の円偏光した双極子 $\mu_{+}$ が右方向の伝播モードに結合することを示す。

20

## 【0069】

映進面導波管モードで伝播する光子と発光体の相互作用はまた、発光体の電子状態に強く相関付けられる。量子発光体の内部状態を制御することにより、単一光子トランジスタおよび制御NOT(cNOT)ゲートを構築することができ、これらのいずれも、量子情報技術の基本的な構築ブロックである。

30

## 【0070】

以下では、本発明による、平面導波管2を実装する光学デバイスのさまざまな例が、説明される。

## 【0071】

[実施例1：スピンの読み出しおよび単一光子ダイオード]

図7は、本発明による、平面導波管2を実装する第1の光学デバイス101を示し、ここで図7cは、Heitlerレジームにおけるオンチップスピン読み出しに提案されるマッハツェンダー(Mach-Zehner)干渉計を示す。量子ドットとの相互作用は、経路A内に置かれた映進面対称導波管(GPW)2のセクション内で起こる。経路Bは、干渉計が正しくバランスをとることを確実にするために必要である位相制御を含む。図7aは、外部磁場 $B_{ext}$ を示し、この成長方向に沿って、双極子 $\mu_{+}$ および $\mu_{-}$ で示された2つの円偏光した遷移を分割する。2つの円遷移をエネルギー的に分割することに加えて、外部磁場は、点線の矢印によって示す直交遷移を抑制する。図7bは、指向性係数の関数として、GPW内に前方散乱する単一光子の位相および確率振幅を示す。図7dは、成功した、および間違っただけのスピン読み出しの確率を示し、これらは、指向性係数の関数として光子損失確率と並べてプロットされる。ここでは、入射単一光子が、幅 $\Gamma_i$ 、 $\Gamma_r = 0.02$ のローレンツスペクトル(Lorentzian spectral)振幅を有することが想定され、式中 $\gamma$ は、励起状態減衰速度である。図7eは、 $\Gamma_{dir} = 0.98$ の場合の単一光子スペクトラル幅の関数としてプロットされた同じ3つの確率を

40

50

示す。これは、Heitler レジームでは入来光子の幅に対していかに敏感に作用するかを示している。

【0072】

図7cに示すように、平面導波管2をオンチップマッハツェンダー干渉計(MZI)に組み入れることにより、荷電量子ドット(QD)のスピ基底状態を読み出し、単一光子ダイオードを構築することが可能である。MZIは、アーム1に入射する単一光子が、アーム4を通って退出するようにバランスがとられる。経路Aに沿って $\pi$ と共鳴して伝播する単一光子は、量子ドットがスピアップ( $| \uparrow \rangle$ )基底状態である場合、経路Bに沿って伝播する光子に対して追加の $\pi$ 位相シフトを得る。この結果、アーム1内に入射する単一光子は、アーム3を通して退出し、一方でQDが状態( $| \uparrow \rangle$ )である場合の単一光子入射は、アーム4内に退出する。こうして、これは、QDスピ状態のオンチップ読み出しを構成する。指向性係数 $\beta_{dir}$ の低減はどのようなものも、全透過率を低下させ(光子損失)、MZIビジビリティを低減させる。非単一性のビジビリティは、スピ読み出しに誤差を引き起こし、QDが $| \uparrow \rangle$ である場合であっても光子の一部分をアーム4内に間違えて通す。他方で、状態 $| \uparrow \rangle$ にあるスピキュービットは、外部磁場 $B_{ext}$ による2つの遷移エネルギー間の大きな分割のために常に完璧に検出される。散乱遷移と比較して、スペクトル的に非常に狭い単一光子の限界内では、スピ読み出しの成功、スピ読み出しの誤り、ならびに光子損失の確率は、以下の式によって与えられる。

10

【数2】

$$P_s \simeq \frac{\beta_{dir}^2 + 1}{2}, \quad P_{err} \simeq \frac{(1 - \beta_{dir})^2}{2}, \quad \text{及び} \quad P_{loss} \simeq \beta_{dir} - \beta_{dir}^2.$$

20

【0073】

狭いが、有限であるスペクトル幅の単一光子パルスのこれらの確率に対する正確な解決策は、図7dに示される。これは、単一光子散乱形式を使用して算出する簡単な方法であり、図7eでは、 $\beta_{dir} = 0.98$ の場合の単一光子のスペクトラル幅の関数として上記で示した確率が、示される。

【0074】

同じデバイスはまた、アーム1をアーム3内で起こる望ましくない後方反射から分離して、単一光子ダイオードとして使用することもできる。このために、スピは、状態 $| \uparrow \rangle$ であり、 $\pi$ 遷移と共鳴する単一光子は、アーム1に入り、アーム3を通して退出し、この場合、これらは、部分的に反射されて、後方伝播方向にMZI内に再度入ることが想定される。十分に高い $B_{ext}$ の場合、 $\pi$ 光子は、 $| \uparrow \rangle$ から完全に離調され、QDを理想的には相互作用を引き起こさずに進め、アーム2内で干渉計を退出する。このダイオードの透過確率は、 $P_s$ によって与えられ、一方で、アーム3内の後方反射した光子がアーム1内に戻るようにルーティングされる確率は、 $P_{31} = (1 - F_{dir})^2$ によって与えられる。

30

【0075】

[実施例2：量子非破壊測定]

単一電子スピキュービットのコヒーレント制御を加えることにより、2つの単一電子基底状態の任意の重ね合わせを生み出し、さらなる用途を達成可能にすることが可能になる。そのような制御は、光学的方法によって、およびマイクロ波源によって生み出される面内振動磁場 $\mu_w$ を通して達成することができ、これは、図8aに概略的に示される。この制御を使用して、単一光子量子非破壊(QND)検出器が、それ自体知られている方法に従うことによって構築され得る。状態( $| \uparrow \rangle$ )のスピキュービットの初期化は、 $\pi$ 遷移を駆動することによって光学スピポンピングによって行われ得る。次に、スピキュービットの $\pi/2$ 回転が、実施されて以下のように変換を行い、

40

## 【数 3】

$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle), \text{ 及び } |\downarrow\rangle \xrightarrow{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{2}} (-|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle).$$

これは、 $\mu_w$ によって行われ得る。 $\mu_w$ 遷移に共鳴した単一光子、 $|k_b\rangle$ は、量子ドットが状態 $|\uparrow\rangle$ にあるときにのみ位相シフトを得る。単一光子が、相互作用領域を過ぎた後、スピキュビットの別の $\pi/2$ 回転が施される。総合的なシーケンスは、以下のように考えられ、

10

## 【数 4】

$$\begin{aligned} |\uparrow\rangle &\xrightarrow{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \xrightarrow{k_b} \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{t}_k |\uparrow, k_b\rangle + |\downarrow, k_b\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{t}_k |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |k_b\rangle \xrightarrow{\pi/2} \frac{1}{2} ((\bar{t}_k - 1) |\uparrow\rangle + (\bar{t}_k + 1) |\downarrow\rangle) |k_b\rangle \end{aligned}$$

このとき、単一光子は相互作用領域に進む。このシーケンスの第2のステップでは、光子物質状態は、相互作用後に分離可能であることが必須であり、それによってこれは、変更されない光子状態 $|k_b\rangle$ および2つのスピン基底状態のコヒーレント重ね合わせの積として書き直すことができる。理想的な場合では、スピン状態の成分の1つは、発光体との相互作用により、 $\pi$ 位相シフトを得ている。シーケンスの最後のステップにおける $\pi/2$ 回転は、コヒーレント重ね合わせをスピナップまたはスピンドアウン状態に戻すようにマッピングする。理想的な散乱の場合( $\bar{t}_k = 1$ )の場合、元のスピン状態は、光子が相互領域に進んだときに戻され、光子が相互領域に進んでいない場合、(以下の式で分かるように)スピン状態は反転される。

20

## 【数 5】

$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \xrightarrow{\pi/2} |\downarrow\rangle$$

## 【0076】

前の式から、スピン状態の完璧な初期化、制御、および読み出しを想定して、QND測定の成功確率は、 $B_{\text{air}}^2$ となること分かる。上記で提案した方法の1つをここで使用して、単一光子のストリームまたは弱いコヒーレント場を用いてスピンの状態を読み出すことができ、こうして量子非破壊単一光子検出を完了する。非破壊検出器の振幅は、上記で論じたような双極子の「許されない」遷移の非ゼロ分岐比によって限定される。

## 【0077】

[実施例3：単一光子トランジスタおよびcNotゲート]

実施例1では、MZIを使用して、トリオンの単一スピン基底状態を効率的に読み出すことができることが示され、実施例2では、単一光子を使用していかにして量子ドットの内部状態を制御することができるかが、示された。

40

## 【0078】

この例では、これら2つの考えを単一光子トランジスタ/スイッチに組み合わせ、ここでは単一ゲート光子が、以降の光子の流れを制御する。ここでもトリオンは、成長方向に沿って向く外部磁場として使用される。これは、図8aに示され、ここでは成長方向に沿った外部磁場 $e_x$ は、双極子モーメント $\mu$ および $\mu_w$ で示された2つの円偏光した遷移を分割する。2つの円遷移をエネルギー的に分割することに加えて、外部磁場は、点線の矢印によって示すような直交遷移を抑制する。スピキュビットのコヒーレント制御は、電子スピン遷移、 $\mu_w$ と共鳴したマイクロ波源によって生成された振動面内磁場

50

を通して得ることができる。図 8 b は、G P W 内の高い指向性 係数の位置に置かれた Q D を示す。矢印は、導波管内で、それぞれの遷移が相互作用する伝播方向がどのようなものかを示す。図 8 c は、単一光子トランジスタおよび決定論的 c N O T ゲートの実験的な実証のためのサンプル設計の概略図を示す。

#### 【 0 0 7 9 】

G P W は、リッジ導波管 M Z I のアームの一方内にあり、調製可能な位相制御、 は、他方内にある。アドドロップ ( a d d / d r o p ) フィルタは、図には明示的に示されないが、2つのリッジ導波管 ( 2<sub>2</sub>' と A<sub>2</sub> ) の間または平面導波管 2 内に結合した後で実現することができる。

#### 【 0 0 8 0 】

2つの単一電子基底状態間のコヒーレント制御がマイクロ波パルス、  $\mu_w$  によって可能になることに加えて、外部磁場  $e_{x t}$  は、数十 G H z 程度で2つの円形遷移間のゼーマン ( Z e e m a n ) 分割をもたらす。この分割により、図 8 a のように、  $\sigma_+$  および  $\sigma_-$  の円形遷移を処理する光子の2つの別個の経路が可能になり、これらの経路は、図 8 b および 8 c において  $\sigma_+$  および  $\sigma_-$  でマークされる。狭い帯域のアドドロップフィルタは、比較的小さいスペクトル相違を活用し、2つのスペクトルモードを光学回路の異なる経路内に通すことを可能にするために必要とされる。ここで、アーム 2<sub>2</sub>' 内に入射した単一ゲート光子は、Q N D 測定に関して上記で提示したような類似のスキームを使用して Q D の内部状態の制御を可能にする。しかし、このシーケンス内の2番目の  $\pi / 2$  パルスは、 $-\pi / 2$  パルスによって置き換えられ、発光体をその初期状態に戻るようにマッピングし、このときこれは、光子と相互作用しない。図 8 c 内の M Z I の位相制御 は、アーム 1<sub>2</sub> 内に入射する単一光子が、むき出しの干渉計のアーム 4<sub>2</sub> 内で、すなわち、  $\sigma_+$  遷移とは相互作用せずに退出し、一方では、これは、発光体がスピンアップ状態に初期化されたときはアーム 3<sub>2</sub> 内に退出するように設定される。このとき、以下のシーケンスが、単一光子トランジスタを実装するために使用され得る。

- 1 . 発光体は、スピンアップ状態に初期化される。
- 2 . スピンの  $\pi / 2$  回転により、  $1 / \sqrt{2} ( | \uparrow \rangle + | \downarrow \rangle )$  がもたらされる。
- 3 . アーム 2<sub>2</sub>' 内に入射する単一光子が存在する場合、これは、  $\sigma_-$  遷移を散乱させ、2つのスピン成分間に  $\pi$  位相シフトを引き起こす、すなわち  $1 / \sqrt{2} ( | \uparrow \rangle - | \downarrow \rangle )$  )。入射光子が無い場合、状態は、  $1 / \sqrt{2} ( | \uparrow \rangle + | \downarrow \rangle )$  のままである。(遷移と共鳴しており、光子線幅は、発光体と比較して狭く、  $\beta_{d i r}$  は、1 に近づくことが想定される)。
- 4 . スピンの後続の  $-\pi / 2$  回転は、  $1 / \sqrt{2} ( | \uparrow \rangle - | \downarrow \rangle )$  を  $| \uparrow \rangle$  にマッピングし、一方でアーム 2<sub>2</sub>' 内に入射する光子が無い場合、スピンは、回転してその初期状態に戻る。
- 5 . 単一ゲート光子が存在した場合、アーム 1<sub>2</sub> 内に入射する単一光子列は、ここでアーム 4<sub>2</sub> 内に退出し、ゲート光子が発光体と相互作用しなかった場合、アーム 3<sub>2</sub> 内に退出する。

#### 【 0 0 8 1 】

この単一光子トランジスタのパフォーマンスを評価するために、これは、2つの部分、すなわちゲート光子による発光体の切り替え、および M Z I 内の単一光子のルーティングに分割される。最初、アーム 2<sub>2</sub>' 内に入射する単一光子が発光体の内部状態を切り替える全確率を説明する発光体の切り替え確率、  $P_{s w i t c h}$  が、見出される。ここで、必要なマイクロ波パルスシーケンスに対する完璧な制御が、想定される。非常に狭い帯域のゲート光子の限界内では、これは、

$$P_{s w i t c h} \approx \beta_{d i r}$$

をもたらす。これは、Q N D 検出の成功確率とは異なるが、その理由は、ゲート光子の出て行く状態は、ほぼ無関係であるためである。1ではない指向性 係数により、ゲート光

10

20

30

40

50

子が正しいモードに散乱されない場合の半分の場合、正しいスピン状態は、依然として最後に得られる。これは、QND測定のものを上回る  $\beta_{\text{dir}} - \beta_{\text{dir}}^2$  のさらなる成功確率をもたらす。発光体がうまく切り替えられたとき、アーム 4<sub>2</sub> に出てくる単一光子の流れが、オンにされる。MZI は、発光体との相互作用がないときは完璧に作用することが想定されるため、単一光子のさらなる誤差は生じない。しかし、ゲート光子が存在せず、発光体がスピンアップの基底状態のままであるとき、アーム 4<sub>2</sub> 内へのいくらかの残留漏出

$$P_{\text{leak}} \approx (1 - \beta_{\text{dir}})^2$$

が生じる。

#### 【0082】

この考えは、他の3つを迂回する追加のアーム、図8c内のアーム 1<sub>2</sub>' を加えるだけで、決定論的 cNOTゲートとして作動するよう拡張され得る。この cNOTゲートの算出ベースは、制御キュービット、 $|0_c\rangle = |1_2\rangle$  および  $|1_c\rangle = |2_2\rangle$ 、ならびに標的キュービット  $|0_t\rangle = (1_2, 3_2)$  および  $|1_t\rangle = (2_2, 4_2)$  によって与えられる。トランジスタに関するマイクロ波パルスと同じシーケンスを使用することにより、図8内の光子回路は、1つの追加のステップを必要とするだけで cNOTゲートとして作動することが、示され得る。スピン状態の別の回転の後で、たとえば弱いコヒーレント場を使用するスピン読み出しが、続けられる。この追加のステップは、実験的に実証されているように、スピン状態のもつれをほどくために必要とされる。さらなる誤差は、このステップにおいて付加されない。スピン読み出しの結果に応じて、出力状態の単一キュービット回転が、正しい状態を得るために必要になり、これらの回転は、すでに、以下の計算内に含まれている。ゲートの機能性を例示する方法は、直交する2つの光子の基礎状態の完全セットに対する真理値表を示すことによるものである。以下の2つの表は、最後のスピン状態が、状態  $| \rangle$  または  $| \rangle$  それぞれにおいて測定されたときの本発明者のゲートの予想される真理値表に対応する。

20

#### 【0083】

##### 【表1】

$ \uparrow\rangle$	$ 1_c, 1_t\rangle_{out}$	$ 1_c, 0_t\rangle_{out}$	$ 0_c, 1_t\rangle_{out}$	$ 0_c, 0_t\rangle_{out}$
$ 1_c, 1_t\rangle_{in}$	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2 \beta_{\text{dir}}^2$	$(1 + \beta_{\text{dir}}^2 - \beta_{\text{dir}})^2$	0	0
$ 1_c, 0_t\rangle_{in}$	$(1 + \beta_{\text{dir}}^2 - \beta_{\text{dir}})^2$	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2 \beta_{\text{dir}}^2$	0	0
$ 0_c, 1_t\rangle_{in}$	0	0	$\beta_{\text{dir}}^2$	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2$
$ 0_c, 0_t\rangle_{in}$	0	0	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2$	$\beta_{\text{dir}}^2$

$ \downarrow\rangle$	$ 1_c, 1_t\rangle_{out}$	$ 1_c, 0_t\rangle_{out}$	$ 0_c, 1_t\rangle_{out}$	$ 0_c, 0_t\rangle_{out}$
$ 1_c, 1_t\rangle_{in}$	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2 \beta_{\text{dir}}^2$	$(1 + \beta_{\text{dir}}^2 - 3\beta_{\text{dir}})^2$	0	0
$ 1_c, 0_t\rangle_{in}$	$(1 + \beta_{\text{dir}}^2 - 3\beta_{\text{dir}})^2$	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2 \beta_{\text{dir}}^2$	0	0
$ 0_c, 1_t\rangle_{in}$	0	0	$\beta_{\text{dir}}^2$	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2$
$ 0_c, 0_t\rangle_{in}$	0	0	$(1 - \beta_{\text{dir}})^2$	$\beta_{\text{dir}}^2$

#### 【0084】

異なる損失モードへの散乱は、このテーブルでは明示的に示されておらず、これが、列の各々の全確率が1になっていない理由である。損失確率は、入力状態の2つの光子の1つが、どれだけ頻繁に失われるかを示し、すなわち、両方の入力光子が回路を通り抜けるイベントだけが、表に含まれる。表の左上象限（対角線要素）内の誤差は、単一光子が、

50

アーム  $2_2'$  内の回路を通過してうまく透過されるが、量子ドットのスピン基底状態を反転させず、 $(1 - \text{dir})^2$ 、したがって  $+$  遷移をアクティブに保つ確率によって与えられる。これは、以降の標的光子が、 $-$  遷移との相互作用の後で正しく MZI を通って透過される確率  $\text{dir}^2$  と乗算される。右底象限では、確率は、アクティブ遷移を含む MZI を通る透過確率によって与えられる。左底および右上象限は、すべてゼロであり、これは、アーム  $1_2'$  と  $2_2'$  の間にクロストークが存在しないためである。ここでは、すべての検出器クリックが、本発明者の回路内の光子によって引き起こされ、追加の誤差は、実験的実証において、非ゼロの背景およびダークカウントによって生成されることが、想定されている。

【0085】

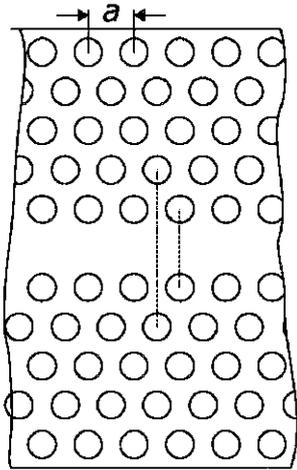
本発明は、有利な実施形態を参照して説明されてきた。しかし、本発明の範囲は、例示する実施形態に限定されず、代替策および変形形態が、特許請求の範囲によって定義される本発明の範囲から逸脱することなく実施され得る。

【符号の説明】

【0086】

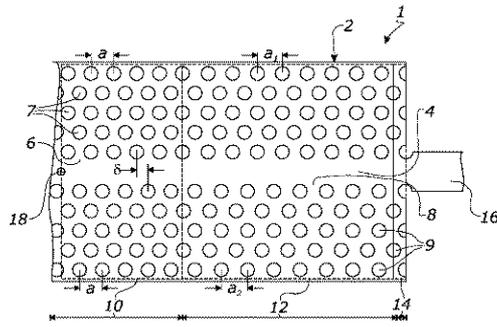
1、101、201	光学デバイス
2	平面導波管
4	誘導領域
6	第1の側
7	第1のナノ構造体
8	第2の側
9	第2のナノ構造体
10、10'	第1の長手方向領域
12、12'	遷移領域
14、14	第2の長手方向領域
16、16'	リッジ導波管
18	量子発光体／量子ドット
a	格子定数
$a_1$	遷移領域内の第1のナノ構造体の格子定数
$a_2$	遷移領域内の第2のナノ構造体の格子定数
$\delta$	第1のナノ構造体と第2のナノ構造体の間の相互シフト／並進
$\sigma_+$	右側の円偏光した双極子
$\sigma_-$	左側の円偏光した双極子

【 図 1 】



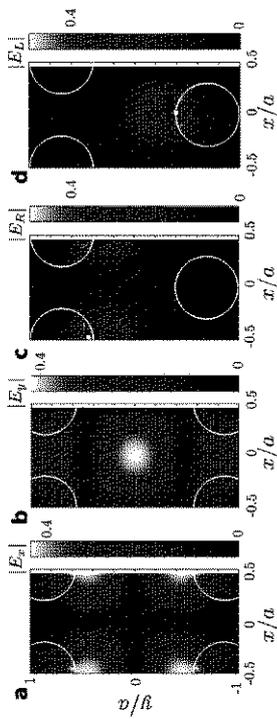
**Fig. 1**

【 図 2 】



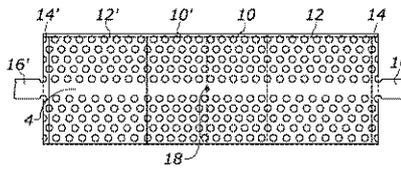
**Fig. 2**

【 図 3 】



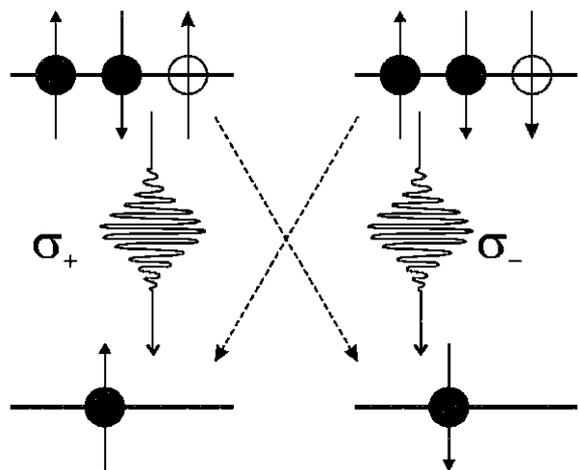
**Fig. 3**

【 図 4 】



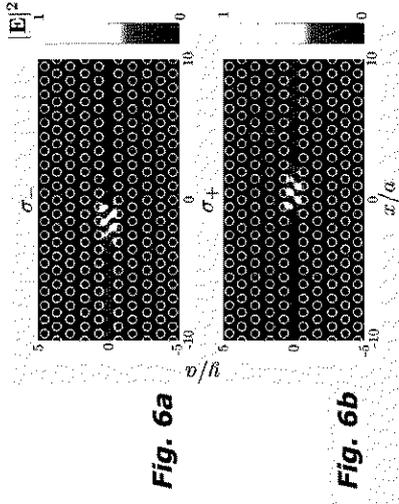
**Fig. 4**

【 図 5 】

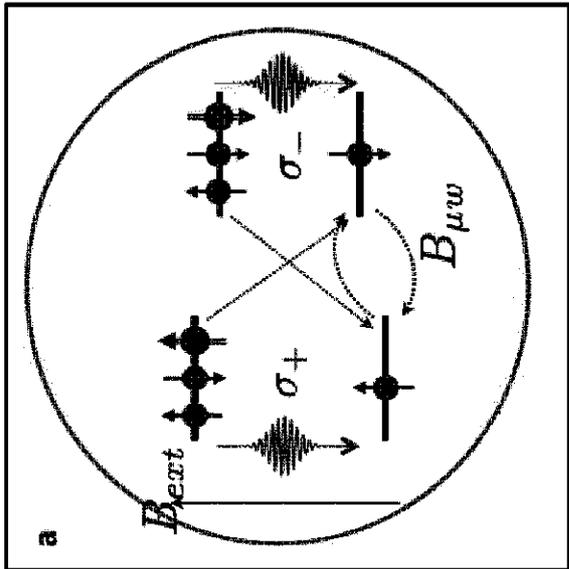


**Fig. 5**

【 図 6 a - 6 b 】



【 図 8 a 】



【 図 7 】

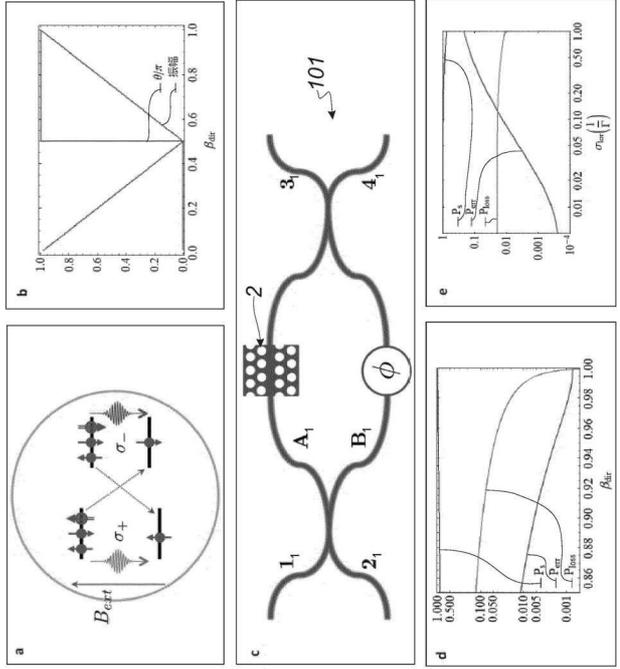
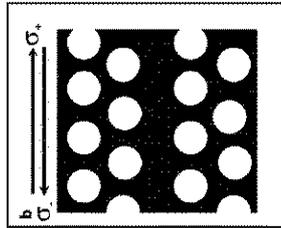
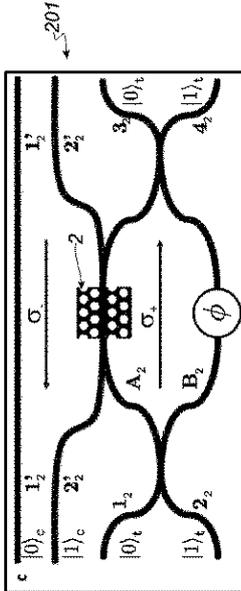


Fig. 7

【 図 8 b 】



【図 8 c】



## 【手続補正書】

【提出日】平成28年6月23日(2016.6.23)

## 【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

平面導波管(12)および量子発光体(18)を備える光学デバイス(1)であって、前記平面導波管(2)は、

第1の側(6)および第2の側(8)を備えた長手方向に延びる誘導領域(4)と、前記誘導領域(4)の前記第1の側(6)に配置された第1のナノ構造体(7)と、前記誘導領域(4)の前記第2の側(8)に配置された第2のナノ構造体(9)と、を備え、

前記平面導波管(2)は、前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)が前記平面導波管(2)の前記誘導領域(4)周りにほぼ映進面对称で配置される第1の長手方向領域(10)を含み、

前記量子発光体(18)は、前記平面導波管(2)の前記第1の長手方向領域(10)に結合され、

前記量子発光体(18)は、円偏光される光学遷移を含み、円偏光モードで光子を発する単一光子発光体になるように前記平面導波管の前記誘導領域内に埋め込まれ、

前記平面導波管(2)の前記第1の長手方向領域(10)は、前記電場が、前記量子発光体(18)の位置において前記平面導波管の平面内に円偏光を有するモードを支援するように構成され、それにより、前記単一光子発光体からの前記光子は、前記平面導波管(

30

40

50

2) に効果的に結合される、光学デバイス(1)。

【請求項2】

前記単一光子発光体が、量子ドットである、請求項1に記載の光学デバイス。

【請求項3】

前記平面導波管(2)が、フォトニック結晶導波管である、請求項1~2のいずれか一項に記載の光学デバイス。

【請求項4】

前記平面導波管(2)が、前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)が前記平面導波管(2)の前記誘導領域(4)周りにほぼ鏡対称で配置される第2の長手方向領域(14)を備える、請求項1~3のいずれか一項に記載の光学デバイス。

10

【請求項5】

前記平面導波管(2)が、有利には前記第1の長手方向領域(10)と前記第2の長手方向領域(14)の間に配置された遷移領域(12)を備え、前記第1および前記第2のナノ構造体(7、9)のジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する、請求項4に記載の光学デバイス。

【請求項6】

リッジ導波管またはストリップ導波管などの従来の導波管(16)が、前記第2の長手方向領域または前記遷移領域に結合される、請求項4~5のいずれか一項に記載の光学デバイス。

【請求項7】

前記平面導波管(2)が、前記第1の長手方向領域(10)の反対の長手方向側に追加の第2の長手方向領域(14')を備え、ここでは前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)は、前記平面導波管(2)の前記誘導領域(4)周りに、好ましくは、前記第1の長手方向領域(10)と前記追加の第2の長手方向領域(14')の間に追加の遷移領域(12')を配置して鏡対称で配置され、前記第1および前記第2のナノ構造体(7、9)の前記ジオメトリは、映進面对称から鏡対称に徐々に変化する、請求項4~6のいずれか一項に記載の光学デバイス。

20

【請求項8】

前記平面導波管(2)が、III-V半導体材料などの誘電材料から作製される、請求項1~7のいずれか一項に記載の光学デバイス。

30

【請求項9】

前記第1のナノ構造体(7)および前記第2のナノ構造体(9)が、第1の格子構造および第2の格子構造にそれぞれ配置され、有利には、三角形格子で格子定数aを有して配置される、請求項1~8のいずれか一項に記載の光学デバイス。

【請求項10】

格子定数aが、100~500nm、または150~400nm、または200~300nm、たとえば約250nmの間隔内にある、請求項9に記載の光学デバイス。

【請求項11】

前記平面導波管が、0.2aから1aの間、または0.4aから0.8aの間、または0.3aから0.7aの間、たとえば、約0.5aまたは0.6aの厚さを有する、請求項9~10のいずれか一項に記載の光学デバイス。

40

【請求項12】

請求項1~11のいずれか一項に記載の光学デバイスを備える、単一光子トランジスタ。

【請求項13】

請求項1~11のいずれか一項に記載の光学デバイスを備える、制御NOTゲート。

## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2015/063340
---------------------------------------------------

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> INV. B82Y20/00 G02B6/122 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B82Y G02B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	ADAM MOCK ET AL: "Space group theory and Fourier space analysis of two-dimensional photonic crystal waveguides", PHYSICAL REVIEW B, vol. 81, no. 15, 19 April 2010 (2010-04-19), XP055158665, ISSN: 1098-0121, DOI: 10.1103/PhysRevB.81.155115 figures 1(a)-(b),2 abstract pages 155115-3, left-hand column, paragraph 1 equation (1)	1-14
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents :		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search  10 September 2015		Date of mailing of the international search report  16/09/2015
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer  Verbandt, Yves

1

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2015/063340
---------------------------------------------------

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	<p>Peter Lodahl ET AL: "Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures",  4 December 2013 (2013-12-04), XP055158721,  Retrieved from the Internet:  URL:http://arxiv.org/abs/1312.1079  [retrieved on 2014-12-15]  page 14, right-hand column, paragraph 1  abstract  page 15, left-hand column, last paragraph  page 18, left-hand column, last paragraph;  table 2(a)  penultimate sentence;  page 47, left-hand column  -----</p>	1-14
A	<p>US 2005/158898 A1 (SCHERER AXEL [US])  21 July 2005 (2005-07-21)  -----</p>	1-14

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/EP2015/063340**Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of Item 2 of first sheet)**

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1.  Claims Nos.:  
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
  
2.  Claims Nos.:  
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
  
3.  Claims Nos.:  
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

**Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of Item 3 of first sheet)**

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

see additional sheet

1.  As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
  
2.  As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
  
3.  As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
  
4.  No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

**Remark on Protest**

- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

International Application No. PCT/ EP2015/ 063340

**FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210**

This International Searching Authority found multiple (groups of) inventions in this international application, as follows:

## 1. claims: 1-14

Nanophotonic device

## 1.1. claim: 14

Photonic crystal waveguide mode converter

## 1.2. claims: 1-13

Nanophotonic device coupling quantum emitter to photonic crystal waveguide  
---

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International application No  
PCT/EP2015/063340

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2005158898	A1	21-07-2005	NONE

## フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
 B 8 2 Y 20/00 (2011.01) G 0 2 B 6/126  
 B 8 2 Y 20/00

(81)指定国 AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IR,IS,JP,KE,KG,KN,KP,KR,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US

(72)発明者 ストッベ, ソレン  
 デンマーク国 コペンハーゲン ブイ ディーケー - 1 6 0 0 , ダンネブログスゲイド 3 1 , サ  
 ード フロア レフト

(72)発明者 ロダール, ペーター  
 デンマーク国 ピアケレズ ディーケー - 3 4 6 0 , ジェイ . エヌ . ヴィンサーズ ベジ 1 1

F ターム(参考) 2H137 AA17 AB01 AB11 BA43 BA48 BA53 BB01 FA00  
 2H147 AA00 AB04 AB21 BA05 BA15 BD16 BE01 BF03 BF08 BF13  
 CD15 EA12A EA12B EA25B FD20  
 2K102 AA37 BA31 BB10 BC01 BD03 DA04 DA09 DA16 DB04 DD03