

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-16458
(P2014-16458A)

(43) 公開日 平成26年1月30日(2014.1.30)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO2B 6/02 (2006.01)	GO2B 6/10 C	2G059
GO2F 1/365 (2006.01)	GO2F 1/365	2H150
GO1N 21/41 (2006.01)	GO1N 21/41 Z	2K002

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 (22) 出願日 (出願人による申告) 独立行政法人科学技術振興機構戦略的イノベーション創出推進プログラム「フォトンクスポリマーによる先進情報通信技術の開発」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願	特願2012-153479 (P2012-153479) 平成24年7月9日 (2012.7.9)	(71) 出願人 504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 (74) 代理人 110000925 特許業務法人信友国際特許事務所 (72) 発明者 白田 耕藏 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内 (72) 発明者 ナヤク カリ プラサンナ 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内 Fターム(参考) 2G059 AA02 BB12 CC16 DD01 EE02 EE17 JJ17 2H150 AA01 AA21 AC04 AC32 AC33 AF01 AF40 AG02 2K002 AB09 DA10 EA07 HA13
---	--	--

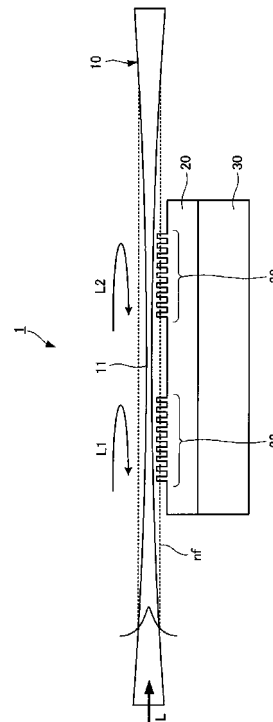
(54) 【発明の名称】 ナノファイバーフォトニック結晶

(57) 【要約】

【課題】 より容易に製造可能であり、かつ、設計自由度も向上させることができるナノファイバーフォトニック結晶を提供する

【解決手段】 ナノファイバーフォトニック結晶1を、表面に光透過性を有する凹凸構造体が形成された光学的機能部材20と、伝搬光の波長以下の径を有する光導波路部11を有するナノ光ファイバー10とを備える構成とする。そして、ナノ光ファイバー10は、凹凸構造体22, 23上に配置され、かつ、光導波路部11に光が伝搬した際に生成される近接場nfと凹凸構造体22, 23の一部とが重なるような位置に配置されている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

表面に光透過性を有する凹凸構造体が形成された光学的機能部材と、伝搬光の波長以下の径を有する光導波路部を有し、前記凹凸構造体上に配置され、かつ、前記光導波路部に光が伝搬した際に生成される近接場と前記凹凸構造体の一部とが重なるような位置に配置されたナノ光ファイバーとを備える
ナノファイバーフォトニック結晶。

【請求項 2】

前記凹凸構造体が、所定周期のグレーティングであり、前記グレーティングを構成する凸部の延在方向が、前記光導波路部の延在方向と直交する
請求項 1 に記載のナノファイバーフォトニック結晶。

10

【請求項 3】

前記凹凸構造体が、ポリマーで形成されている
請求項 1 又は 2 に記載のナノファイバーフォトニック結晶。

【請求項 4】

前記ナノ光ファイバーが、コア及びクラッドを含む光ファイバー部と、前記光導波路部及び前記光ファイバー部間を接続し、径が前記光導波路部から前記光ファイバー部に向かって連続的に大きくなる接続部とを有する
請求項 1～3 のいずれか一項に記載のナノファイバーフォトニック結晶。

20

【請求項 5】

前記ナノ光ファイバーが、前記光導波路部の表面にポリマーで形成されたコーティング層を有する
請求項 1～4 のいずれか一項に記載のナノファイバーフォトニック結晶。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、数ミクロンオーダーからサブミクロンオーダーの範囲の径を有する光ファイバー（以下、ナノ光ファイバーという）を用いて構成されたフォトニック結晶に関する。

30

【背景技術】

【0002】

従来、屈折率が周期的に変化するナノサイズの構造体（以下、ナノ構造体という）を設けて所定の機能を発現させるフォトニック結晶が種々提案されている（例えば、非特許文献 1、非特許文献 2 参照）。

【0003】

非特許文献 1 には、シリコン基板に、微小穴を形成して構成されたシリコン系フォトニック結晶が記載されている。具体的には、非特許文献 1 には、シリコン基板に、複数の微小な円孔を一次元に配列して構成したフォトニック結晶ナノビーム共振器が開示されている。

40

【0004】

また、非特許文献 2 には、石英等の誘電体からなるナノ光ファイバーを用いたフォトニック結晶（以下、ナノファイバーフォトニック結晶という）が提案されている。非特許文献 2 に記載のナノファイバーフォトニック結晶では、その表面に FIB 加工法を用いて、ファイバーブラッググレーティング（FBG）が形成されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】P. B. Deotare, M. W. McCutcheon, I. W. Frank, M. Khan, M. Loncar: "High quality factor photonic crystal nanobeam cavities", Applied Physics Le

50

tters, Vol.94, 121106, 2009

【非特許文献2】K. P. Nayak, Fam Le Kien, Y.Kawai, K.Hakuta, K. Nakajima, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto: "Cavity formation on an optical nanofiber using focused ion beam milling technique", OPTICS EXPRESS, Vol.19, pp.14040-14050, 2011

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上述のように、従来、種々のフォトニック結晶が提案されているが、特に、ナノファイバーフォトニック結晶においては、その製造の容易性及び設計自由度の向上が求められている。本発明は、この要求に応えるためになされたものであり、本発明の目的は、より容易に製造可能であり、かつ、設計自由度も向上させることができるナノファイバーフォトニック結晶を提供することである。

10

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するために、本発明のナノファイバーフォトニック結晶は、表面に光透過性を有する凹凸構造体が形成された光学的機能部材と、伝搬光の波長以下の径を有する光導波路部を有するナノ光ファイバーとを備える。そして、ナノ光ファイバーは、凹凸構造体上に配置され、かつ、光導波路部に光が伝搬した際に生成される近接場と凹凸構造体の一部とが重なるような位置に配置されている。

20

【発明の効果】

【0008】

本発明のナノファイバーフォトニック結晶では、ナノ光ファイバーと、それに所定の光学的機能を付与する光学的機能部材とを互いに別個の部材で構成する。それゆえ、本発明のナノファイバーフォトニック結晶によれば、より容易に製造することができ、かつ、設計自由度も向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本発明の一実施形態に係るナノファイバーフォトニック結晶の概略構成図である。

【図2】本発明の一実施形態に係るナノファイバーフォトニック結晶で用いるナノ光ファイバーの概略外観図である。

30

【図3】本発明の一実施形態に係るナノファイバーフォトニック結晶で用いる光学的機能部材の概略外観斜視図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下に、本発明の一実施形態に係るナノファイバーフォトニック結晶の一例を、図面を参照しながら説明する。しかしながら、本発明は、以下に示す例に限定されない。

【0011】

[ナノファイバーフォトニック結晶の構成]

本発明の一実施形態に係るナノファイバーフォトニック結晶の構成を、図1を参照しながら説明する。図1は、本実施形態のナノファイバーフォトニック結晶の概略構成図である。なお、図1には、後述するナノ光ファイバー10の極細部11付近の構成のみを示す。

40

【0012】

ナノファイバーフォトニック結晶1は、ナノ光ファイバー10と、光学的機能部材20と、基板30とを備える。なお、本実施形態では、ナノファイバーフォトニック結晶1が、ナノファイバー光反射器として作用する例を説明する。以下に、各部の構成及び機能、並びに、各部間の配置関係について説明する。

【0013】

(1) ナノファイバー

50

まず、図2を参照しながら、ナノ光ファイバー10の構成を説明する。なお、図2は、本実施形態で用いたナノ光ファイバー10の概略外観図である。

【0014】

ナノ光ファイバー10は、コア部14と、コア部14の周囲に形成されたクラッド部15とを備える。ナノ光ファイバー10は、光導波特性の優れた（光子吸収の少ない）、例えば石英等の材料で形成される。なお、図2では、ナノ光ファイバー10の構成を明確にするために、クラッド部15（クラッド）の径に対するコア部14（コア）の径の比率を実際の比率より大きくして図示するが、実際の比率は、コア部14の径：クラッド部15の径 = 1：10程度である。

【0015】

また、ナノ光ファイバー10は、図2に示すように、極細部11（光導波路部）と、その両端にそれぞれ設けられた接続部12と、各接続部12の極細部11側とは反対側の端部に設けられた光ファイバー部13とを備える。このような構成のナノ光ファイバー10は、従来の通信システムで用いられるコア及びクラッドを有する通信用光ファイバーの一部（極細部11に対応する領域）を加熱延伸して作製することができる。

【0016】

なお、ナノ光ファイバー10において、接続部12内のコアカットオフの径以下になる領域では、伝搬光に対して光ファイバーのコア部14とクラッド部15との区別は実質無くなり、コア部14のみの状態と同等になる。すなわち、本実施形態のナノ光ファイバー10の極細部11は、実質、コア部14のみの状態となり、極細部11の周囲の領域（自由空間）がクラッド部の役割を果たす。

【0017】

極細部11は、その径が伝搬光の波長程度以下のサイズに設定された光導波路である。それゆえ、極細部11では、伝搬光は、近接場光として伝搬し、該伝搬光の一部が周囲の領域（自由空間）にしみ出した状態で伝搬する。すなわち、極細部11に光が伝搬した際には、極細部11及びその周囲の表面付近には、近接場n_f（図1中の破線）が生成される。

【0018】

接続部12は、極細部11から光ファイバー部13に向かって延在した光導波路であり、その径は極細部11から光ファイバー部13に向かって連続的に大きくなる。すなわち、接続部12は、その径が極細部11から光ファイバー部13に向かってテーパ状に広がる光導波路である。

【0019】

光ファイバー部13は、従来の通信用光ファイバーと同様に、コア部14と、その周囲に設けられたクラッド部15とで構成される。また、光ファイバー部13の径も、従来の通信用光ファイバーの径と同様のサイズにすることができる。この場合、光ファイバー部13は、外部の光ファイバー網（情報通信網）に、直接、接続することができる。それゆえ、本実施形態で作製されたナノファイバーフォトニック結晶1では、極細部11を伝搬する光を、光ファイバーの伝搬モード（ファイバーモード）で、直接、外部の光ファイバー網（情報通信網）に射出することができる。

【0020】

なお、ナノ光ファイバー10の構成は、図2に示す構成に限定されず、例えば、クラッド部15の周囲に、加工性に優れた例えばポリマー等の材料からなるコーティング層を形成してもよい。この場合には、例えば、ナノ光ファイバー10に微小な凹凸パターン（例えばFBGや微小凹部等）を形成することが容易になる。

【0021】

(2) 光学的機能部材20

次に、図3を参照しながら、光学的機能部材20の構成を説明する。なお、図3は、本実施形態で用いた光学的機能部材20の概略外観斜視図である。

【0022】

10

20

30

40

50

光学的機能部材 20 は、例えば、石英、ポリマー等の光透過性材料で形成された板状部材である。光学的機能部材 20 は、略板状の本体部 21 と、該本体部 21 の一方の表面上に形成された、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 (凹凸構造体) とを備える。

【0023】

なお、本実施形態では、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 間の対向方向 (光 L の伝搬方向: 図 3 中の太実線矢印) に沿って、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 を 1 次元的に配置し、かつ、両者を所定距離、離して配置する。また、この際、各グレーティング部 (グレーティング) を構成する複数の凸部の周期方向 (凸部の延在方向と直交する方向) が、光 L の伝搬方向と一致するように、各グレーティング部を配置する。

10

【0024】

さらに、本実施形態では、第 1 グレーティング部 22 の構成は、第 2 グレーティング部 23 の構成と同じとする。また、各グレーティング部は、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 間の対向方向と直交する方向に延在した複数の凸部を、例えば、数十 nm ~ 数百 nm 程度のピッチで等間隔に配置することにより構成される。

【0025】

なお、各グレーティング部の構成 (例えば、グレーティングの幅、深さ、ピッチ等) は、例えば、極細部 11 を伝搬する光の波長や反射すべき波長帯域などに応じて適宜設定される。例えば、本実施形態のように、ナノファイバーフォトリソニック結晶 1 を、ナノファイバー光反射器として動作させる場合には、各グレーティング部の構成は、伝搬光に対してブラッグの反射条件が満たされるように設定することができる。

20

【0026】

また、本実施形態では、本体部 21 と、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 とを同じ材料 (光透過性材料) で一体的に形成する。この場合、通常、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 は、本体部 21 の一方の表面を加工して作製されるので、光学的機能部材 20 の形成材料としては、例えば、ポリマー等の加工性に優れた光透過性材料を用いることが好ましい。また、この場合、各グレーティング部の形成手法としては、例えば、FIB 加工法、フォトリソ法、ナノインプリント法等の従来の半導体加工技術で用いられる手法を用いることができる。

30

【0027】

なお、光学的機能部材 20 の構成は、本実施形態の構成 (図 1 ~ 3 の構成) に限定されず、例えば用途等に応じて、適宜変更することができる。例えば、本実施形態では、光学的機能部材 20 にグレーティング構造の凹凸パターンを形成する例を説明したが、本発明はこれに限定されず、例えば用途等に応じて、任意の凹凸パターンのナノ構造体を形成してもよい。この場合、光学的機能部材 20 に形成されるナノ構造体の凹凸パターンに応じて、ナノ光ファイバー 10 の延在方向の配置方向も適宜変更する。

【0028】

また、例えば、本実施形態では、グレーティング部を 2 個設ける例を説明したが、本発明はこれに限定されず、例えば用途等に応じて、グレーティング部の個数を任意に変更することができる。また、例えば、上記実施形態では、本体部 21 の一方の面内において、複数のグレーティング部 (凹凸パターン部) を光 L の伝搬方向に沿って 1 次元的に配置する例を説明したが、用途等に応じて、本体部 21 の一方の面内において、光 L の伝搬方向に直交する方向に沿って、複数のグレーティング部を配置してもよい。さらに、本実施形態では、例えば用途等に応じて、複数のグレーティング部を、光 L の伝搬方向、及び、その直交方向の両方に沿って配置してもよい。すなわち、本体部 21 の一方の面内において、複数のグレーティング部 (凹凸パターン部) を、2 次元的に配置してもよい。

40

【0029】

さらに、本実施形態では、第 1 グレーティング部 22 の構成 (形状、寸法等) を、第 2 グレーティング部 23 の構成と同じとしたが、両者の構成を互いに異ならせてもよい。ま

50

た、光学的機能部材 20 の本体部 21 の形成材料が、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 の形成材料と異なってもよい。

【0030】

(3) 基板 30

基板 30 は、光学的機能部材 20 を保持する部材であり、十分な剛性を有する基板であれば、任意の基板で構成することができる。また、基板 30 の形成材料は、光透過性材料であってもよいし、不透明材料であってもよい。

【0031】

例えば、本実施形態において、基板 30 を熱伝導性の良い材料で構成すれば、基板 30 に温調装置を取り付けることにより、各グレーティング部（光学的機能部材 20）の熱膨張特性を利用して、各グレーティング部の凸部のピッチ（グレーティングピッチ）を、常に、最適なピッチに制御することができる。この場合、グレーティング部（光学的機能部材 20）の形成材料としては、例えば、熱膨張率の大きなポリマー材料を用いることが好適である。

【0032】

なお、基板 30 の主な機能は、上述のように、光学的機能部材 20 を保持することであるので、光学的機能部材 20 が十分な剛性を有する場合には、基板 30 を設けなくてもよい。

【0033】

(4) 各部の配置

本実施形態のナノファイバーフォトリック結晶 1 では、図 1 に示すように、光学的機能部材 20 が基板 30 上に設けられる。この際、光学的機能部材 20 は、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 が形成された面と反対側の面が、基板 30 と接するように配置される。

【0034】

ナノ光ファイバー 10 は、光学的機能部材 20 の第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 が形成された面上に配置される。この際、ナノ光ファイバー 10 の延在方向（光 L の伝搬方向）と、各グレーティング部の凸部の延在方向とが、互いに直交するように、ナノ光ファイバー 10 が配置される。

【0035】

また、本実施形態では、ナノ光ファイバー 10 の極細部 11 は、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 の形成領域上に配置される。この際、極細部 11 に光を伝搬させたときに極細部 11 及びその周囲に生成される近接場 n f が、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 の凸部の上端を含む一部と重なるように、ナノ光ファイバー 10 及び光学的機能部材 20 間の距離が設定される。なお、ナノ光ファイバー 10 の極細部 11 は、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 に接触していてもよいし、離れていてもよい。

【0036】

[ナノファイバーフォトリック結晶の動作]

次に、本実施形態のナノファイバーフォトリック結晶 1 の動作を、図 1 を参照しながら説明する。まず、図 1 に示すように、ナノファイバーフォトリック結晶 1 の一方の端部から光 L を入射する。これにより、ナノ光ファイバー 10 の極細部 11 には、伝搬光（近接場光）の一部が周囲の領域（自由空間）にしみ出した状態で、光が伝搬する（近接場 n f が生成される）。

【0037】

しかしながら、本実施形態のナノファイバーフォトリック結晶 1 では、上述のように、極細部 11 の領域に生成される近接場 n f が、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 の凸部の一部と重なるように、ナノ光ファイバー 10 の極細部 11 が第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 の形成領域上に配置されている。それゆえ、極細部 11 を伝搬する光（近接場光）は、各グレーティング部の形成領域におい

10

20

30

40

50

て、周期的に変化する屈折率の影響を受け、光の一部が各グレーティング部で反射する（図 1 中の反射光 L 1 及び L 2）。本実施形態では、このようにして、ナノファイバーフォトリック結晶 1 がナノファイバー光共振器として動作する。

【0038】

[各種効果]

上述のように、本実施形態のナノファイバーフォトリック結晶 1 では、ナノ光ファイバー 10 に対して所定の光学的機能（本実施形態では光の反射機能）を付加するための光学的機能部材 20 を、ナノ光ファイバー 10 とは別部材として作製する。この場合、上述のように、光学的機能部材 20 の作製手法として、従来の半導体加工技術で確立されている凹凸パターン形成手法を用いることができる。それゆえ、本実施形態では、ナノ光ファイバーに直接、凹凸構造体（ナノ構造体）を形成してナノファイバーフォトリック結晶を作製する従来の手法（例えば非特許文献 2 の手法）に比べて、容易にナノファイバーフォトリック結晶 1 を作製することができる。

10

【0039】

また、本実施形態では、ナノ光ファイバー 10 と光学的機能部材 20 とを別個に独立して設計することができるので、設計の自由度が向上する。さらに、本実施形態では、ナノ光ファイバー 10 と光学的機能部材 20 とを別個に作製するので、ナノ光ファイバー 10 及び光学的機能部材 20 間の相対的な位置制御や、一つのナノファイバーフォトリック結晶 1 において種々の凹凸構造体（ナノ構造体）を設けることなどが可能になり、機能面での設計自由度も向上する。

20

【0040】

以上のことから明らかなように、本実施形態では、ナノファイバーフォトリック結晶 1 をより容易に製造することができ、かつ、ナノファイバーフォトリック結晶 1 の設計自由度も向上させることができる。

【0041】

なお、本実施形態では、光学的機能部材 20 にのみ屈折率が所定パターンで変化するナノ構造体を設ける例を説明したが、本発明はこれに限定されず、光学的機能部材 20 だけでなく、ナノ光ファイバー 10 にもナノ構造体を設けてもよい。例えば、ナノ光ファイバー 10 の極細部 11 に、微小凹部、又は、複数の微小凹部からなる一次元の微小凹部列を設けてもよい。この場合には、例えば量子発光体（量子ドット）を含む物質、バイオ関連物質、非線形光学物質等の所定の物質を微小凹部に充填することができ、後述のように様々な用途への応用が可能になる。

30

【0042】

[応用例]

ここで、本発明のナノファイバーフォトリック結晶の各種応用例について説明する。上記実施形態のナノファイバーフォトリック結晶 1（図 1 参照）において、第 1 グレーティング部 22 及び第 2 グレーティング部 23 間のナノ光ファイバー 10 の極細部 11 の領域に、量子発光体（量子ドット）を含む物質を添加した場合には、ファイバーモード（ファイバーインライン）単一光子発生素子（ナノ光ファイバー共振器）を実現することができる。この場合、ナノファイバーフォトリック結晶から高効率で単一光子を光ファイバーの導波モードで取り出すことができる。なお、「量子発光体」とは、エネルギー準位が離散的な状態となり、単一励起が可能となる状態に置かれた（すなわち、量子的な特性を有する）、例えば、原子、分子、量子ドット（人工原子）等のナノメートルサイズの発光体のことである。

40

【0043】

また、上記実施形態のナノファイバーフォトリック結晶 1 において、ナノ光ファイバー 10 の極細部 11 上に、バイオ関連物質を塗布した（付着させた）場合には、バイオセンサーを実現することができる。この場合、バイオ関連物質における光学的な変化（例えば、光増強変化や屈折率変化など）を高感度（分子単位）で検出することができる。

【0044】

50

さらに、上記実施形態のナノファイバーフォトリック結晶1において、各グレーティング部でFBGを構成した場合には、ナノファイバーフォトリック結晶1を高感度の温度センサとして用いることができる。また、上記実施形態のナノファイバーフォトリック結晶1において、第1グレーティング部22の構成(グレーティングパターン)を第2グレーティング部23のそれと異なるようにすることにより、ナノ光ファイバー回路の実現も可能になる。

【0045】

なお、上述のように、ナノ光ファイバー10の極細部11に、複数の微小凹部からなる微小凹部列を設けて、複数の微小凹部の少なくとも一つに量子発光体(量子ドット)を含む物質を充填(添加)した場合にも、ファイバーモード単一光子発生素子を実現することができる。また、複数の微小凹部の少なくとも一つにバイオ関連物質を充填した場合にも、バイオセンサーを実現することができる。

10

【0046】

さらに、複数の微小凹部の少なくとも一つに非線形光学物質を充填した場合には、ファイバーインライン非線形光子素子を実現することができる。この場合、ナノファイバーフォトリック結晶は、伝搬光に対して例えば変調作用、位相調整作用、光のスイッチング作用等の各種非線形作用(効果)を発現させることができる。

【0047】

なお、このような伝搬光に対する非線形効果は、光導波路の断面の面積が小さくなるほど大きくなる。例えば、ナノ光ファイバーの極細部の径は、従来の光通信用ファイバーのその数十分の1程度であるので、ナノ光ファイバーの極細部における非線形効果は、従来の光通信用ファイバーのその数百倍になる。それゆえ、ナノ光ファイバー10の極細部11に設けられた複数の微小凹部の少なくとも一つに非線形光学物質を充填した場合には、非常に高い非線形効果を有するファイバーインライン非線形光子素子を実現することができる。

20

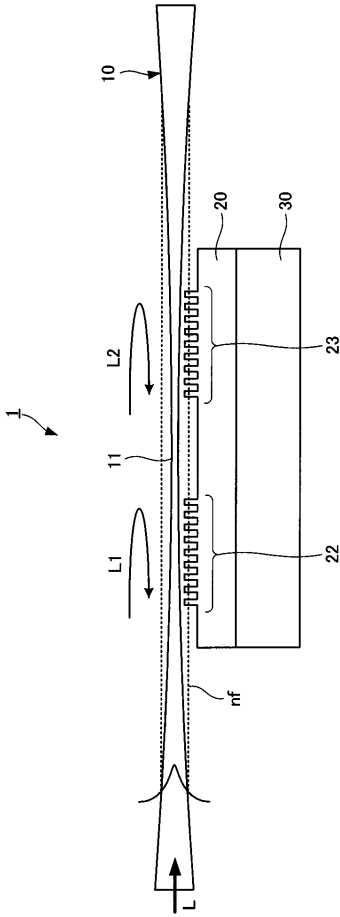
【符号の説明】

【0048】

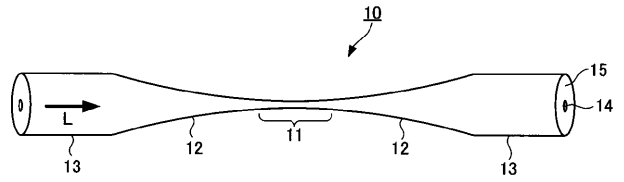
1...ナノファイバーフォトリック結晶、10...ナノ光ファイバー、11...極細部、12...接続部、13...光ファイバー部、20...光学的機能部材、21...本体部、22...第1グレーティング部、23...第2グレーティング部、30...基板

30

【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】

