

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(10) 国際公開番号

WO 2009/104691 A1

PCT

(43) 国際公開日

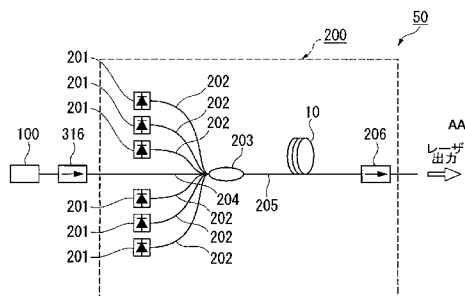
2009年8月27日(27.08.2009)

- (51) 国際特許分類:
H01S 3/06 (2006.01) G02B 6/024 (2006.01)
G02B 6/00 (2006.01) G02B 6/036 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2009/052918
- (22) 国際出願日: 2009年2月19日(19.02.2009)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2008-038005 2008年2月19日(19.02.2008) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社フジクラ (Fujikura Ltd.) [JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場1丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 北林 和大 (KITABAYASHI, Tomoharu) [JP/JP]; 〒2858550 千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジクラ 佐倉事業所内 Chiba (JP).
- (74) 代理人: 志賀 正武, 外 (SHIGA, Masatake et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, 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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

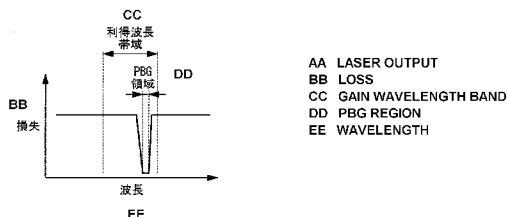
(54) Title: OPTICAL FIBER LASER

(54) 発明の名称: 光ファイバレーザ

[図1A]



[図1B]



(57) Abstract: An optical fiber laser comprises a master oscillator serving as a laser oscillator for generating seed light and a power amplifier serving as an optical amplifier for amplifying and outputting laser light emitted from the master oscillator, which is connected at a stage subsequent to the master oscillator. The power amplifier includes plural excitation beam sources, excitation ports which are respectively connected to the plural excitation beam sources and on which excitation beams emitted from the excitation beam sources are incident, a signal port on which the laser light emitted from the master oscillator is incident, an optical coupler having an emission port for emitting the respective excitation beams incident from the excitation ports and the laser light incident from the signal port together, and an optical fiber connected to the emission port. The optical fiber is a photonic bandgap fiber, and has a loss wavelength characteristic in which the photonic bandgap region is narrower than the gain wavelength band in a graph with the horizontal axis representing the wavelength and the vertical axis representing the amount of loss.

(57) 要約:

[続葉有]



本発明の光ファイバレーザは、種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプと、を備えた光ファイバレーザであって、前記パワーアンプは、複数の励起光源と、前記複数の励起光源に各々が接続され、前記励起光源から出射された励起光が入射する励起ポートと、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光が入射される信号ポートと、前記励起ポートから入射された各前記励起光と、前記信号ポートから入射されたレーザ光とをあわせて出射する出射ポートを有した光結合器と、前記出射ポートに接続された光ファイバと、を備え；前記光ファイバは、フォトリソバンドギャップファイバであり；前記光ファイバは、横軸が波長、縦軸が損失量を示すグラフにおいて、フォトリソバンドギャップ領域が利得波長帯域よりも狭い損失波長特性を有している。

明 細 書

光ファイバレーザ

技術分野

[0001] 本発明は、光ファイバレーザに関し、より詳しくは信号波長領域にのみフォトニックバンドギャップ領域となるように調整されたフォトニックバンドギャップファイバを用い、寄生発振が抑制された光ファイバレーザに関する。

本願は、2008年02月19日に、日本国に出願された特願2008-038005号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 近年、ファイバレーザの出力は高出力化が進み、現在ではkWを超える出力を有した光ファイバレーザが開発されている。このような高出力を有する光ファイバレーザは、加工機や医療機器、測定器等の様々な分野で利用されるようになっている。光ファイバレーザは他のレーザと比較し、集光性に優れ、パワー密度の高い大変小さなビームスポットが得られる。そのため、精密加工が可能である。また、この光ファイバレーザを用いた加工は、非接触加工であること、およびレーザ光が吸収可能であれば、硬い物質への加工も可能であること等から、特に材料加工分野では、光ファイバレーザの用途が急速に拡大している。

[0003] 図14に、MOPA方式と呼ばれる、代表的な高出力光ファイバレーザの概略図を示す。

MOPA方式では、マスターオシレータ(以下、MOということがある)100の後段にパワーアンプ(以下、PAということがある)200が接続された構成となっている。この構成だと、MO100から出力された微弱なパルス光がPA200で増幅され、高出力のレーザ光がPA200から出射される。1段のPA200では十分な出力が得られない場合には、所望の出力が得られるように、多段にPA200が接続される。

[0004] MO100には、半導体レーザなどCW発振するレーザ光源の出力を、音響光学素子などの変調器で強度変調してパルス光とする方式や、例えば特許文献1に記載されているようなファイバリングレーザを用いる方式がある。

図15に、このファイバリングレーザの代表的な構成図を示す。

ファイバリングレーザ100は、励起光源101と;励起光とレーザ光を合波するWDMカプラ102と;利得媒質である希土類添加光ファイバ103と;アイソレータ104と;光スイッチ素子107と;出力カプラ105と;からなる。励起光源101から出射された励起光は、WDMカプラ102を介して希土類添加光ファイバ103へと入射される。希土類添加光ファイバ103に入射された励起光は、希土類添加光ファイバのコアに添加された希土類イオンに吸収され、希土類イオンを励起させる。励起状態となった希土類イオンは、特定の波長の自然放出光を放出する。この自然放出光は、増幅されながら希土類添加光ファイバ103内を伝搬し、ASE (Amplified Spontaneous Emission) として出力される。WDMカプラ102と、希土類添加光ファイバ103と、アイソレータ104と、出力カプラ105と、光スイッチ素子107とは、リング状に接続されている。そのため、ASEはこれらの部品を通過して周回し、再び希土類添加光ファイバ103で増幅される。ASEが十分に増幅された後、レーザ発振し、その一部が出力カプラ105を介してレーザ光として出力される。この際、光スイッチ素子107を低損失な状態と高損失な状態とを周期的に繰り返すように動作させればパルス発振し、パルス状のレーザ出力が得られる。

[0005] PA200としては、図16に示すような構成のアンプが用いられている。図16は、MO PA方式の光ファイバレーザの構成を示したものである。MO100から出力されたレーザ光が段間アイソレータ316を介してPA200に入射され、PA200で増幅されて出力される。

PA200は、複数の励起光源201と;光結合器203と;希土類添加光ファイバ(希土類添加ダブルクラッドファイバ) 205と;アイソレータ206と;から概略構成されている。励起光源201と、希土類添加光ファイバ205と、アイソレータ206とは、MO100で使ったものと同じものを適用できる。光結合器203は、例えば特許文献2に記載されているような光結合器が用いられる。この光結合器203は、マルチモード光ファイバからなる複数の励起ポート202と、一つのシングルモードファイバとからなる信号ポート204とを有し、これらを溶融延伸して一体化することにより形成された1つの出射ポート207を有している。MO100から出射されたレーザ光は、信号ポート204から入射

され、光結合器203を介して希土類添加ダブルクラッドファイバ205のコアへと出射される。一方で、光結合器203には、複数の励起光源201が各々接続された励起ポート202が、接続されている。この各励起光源201から出射された励起光が、光結合器203を介して希土類添加ダブルクラッドファイバ205の第1クラッドへと入射される。この第1クラッドに入射された励起光は、コアに添加された希土類イオンに吸収されて反転分布が形成され、誘導放出が生じる。この誘導放出によって、コア内を伝搬するレーザ光が増幅され、アイソレータ206を介して出力される。

[0006] 図16のようなMOPA方式の光ファイバレーザの場合、MO100からの信号光が入射されない状態で、PA200の希土類添加ダブルクラッドファイバ205が励起光源201から出射された励起光により励起されて、ある反転分布率まで到達すると、寄生発振が生じ、非常に尖塔値の高いパルスが発生する。寄生発振の生じる反転分布率は、希土類添加ダブルクラッドファイバ205の入射側と出射側との反射率によって決定される。この反転分布率によっては、希土類添加ダブルクラッドファイバ205から光結合器203に向かって、寄生発振による非常に尖塔値の高いパルスが出射される。この際、この非常に尖塔値の高いパルスによって、希土類添加ダブルクラッドファイバ205のコアがダメージを受けたり、このパルスが励起光源201やMO100に到達し、これらに損傷を与えるという問題があった。

また、PA200に寄生発振が生じないような周期で、MO100からパルスが出射され、正常に光ファイバレーザが動作している状態であっても、パルスが入力される間に、PA200出力の外部からの反射光が寄生発振を誘発する場合もある。通常、PA200の励起光源201は、パルス間も励起光を出射しているため、希土類添加ダブルクラッドファイバ205は励起された状態にある。そのため、ASEが、希土類添加ダブルクラッドファイバ205の両端から出射されている。例えば光ファイバレーザを材料加工に使用するような場合には、光ファイバレーザから被加工物にASEが照射されている。この際、被加工物の表面状態によっては、被加工物の表面で反射された反射光が、再び光ファイバレーザに入射することがある。すると、この反射光が種となって発振が生じ、尖塔値の非常に高いパルスが、希土類添加ダブルクラッドファイバ205から光結合器203に向かって出射される。すると、このパルスが励起光源201やMO1

00に達し、これらに損傷を与えるという問題があった。

このように、従来の光ファイバレーザでは、寄生発振が起こるために、高反転分布率を実現できず、PA200から出力できるパルスエネルギーが制限されていた。

[0007] これらの問題を解決するために、例えば特許文献3に記載の方法では、希土類添加光ファイバの両端にアイソレータを挿入することで、反射率を低く抑え、寄生発振を抑制している。さらに、励起光源の出射端に短波長通過フィルタを設けることで、希土類添加光ファイバから出射されるASEが、ポンプレーザによって反射されて再び希土類添加光ファイバに入射することを抑制している。すなわち、特許文献3に記載の光ファイバレーザは、希土類添加光ファイバの入射側および出射側の反射率を極力抑えることで、寄生発振を抑制している。

[0008] また、例えば特許文献4に記載の方法では、光ファイバ増幅器を2段に分割し、アイソレータが段間に設けられている。前段の光ファイバ増幅器では、利得を低く抑えることで、寄生発振が抑制されている。一方、後段の光ファイバ増幅器では、利得が高いものの、前段の光ファイバ増幅器から出射されたASEが常に入射されている。そのため、特許文献4に記載の光ファイバレーザは、ASEの増幅は生じるものの、寄生発振には至らないようになっている。

[0009] 特許文献5に記載の光ファイバレーザでは、希土類添加ダブルクラッドファイバの両端に、ファイバブラッググレーティング(以下、FBGということがある)を設けることで共振器を構成し、片側のFBGにはさらにマルチモードファイバが接続されている。そして、励起光源からの励起光が、このマルチモードファイバを介して希土類添加ダブルクラッドファイバ入射される。この光ファイバレーザでは、マルチモードファイバのコア径は、希土類添加ダブルクラッドファイバのコア径に比べて大きくなっている。そのため、FBGで反射されずにマルチモードファイバに入射された不要な波長のASEは、反射によって希土類添加ダブルクラッドファイバのコアに再結合する割合が低く、寄生発振が抑制される。仮に寄生発振しても、発生したパルスは、一旦マルチモードファイバに入射される。そのため、ASEがレンズを介して励起光源上に集光されたとしても、スポット径が大きくなるため、この励起光源にダメージを与えにくい。

[0010] しかしながら、特許文献3に記載の方法では、反射率の抑制は、現実的には0.00

1%程度までが限界である。そのため、数十W以上を出力するような比較的高出力の光ファイバレーザでは、いくら反射を抑制しても、このわずかな反射やファイバ中のレイリー散乱が種となって、寄生発振が発生してしまう虞がある。また、レーザ出射後に生じる外部からの反射光(被加工物表面での反射光)に関しては、アイソレータで反射光の強度は減衰するが、完全にカットすることはできない。ゆえに、わずかに残った反射光を種として、寄生発振を誘発してしまう虞がある。

特許文献4に記載の方法においても、出射側に高利得のアンプが設けられているために、外部からの反射光が、まずこの高利得のアンプに入射してしまい、寄生発振を誘発してしまう虞がある。そこで、高利得のアンプを使用せずに低利得のアンプを多段に使用することが考えられる。しかし、この場合だと高出力になるほどアンプの段数が多くなり、構成が複雑で効率も低下してしまう。

特許文献5に記載の方法では、FBGに反射されなかった波長の光は、マルチモードファイバの端面で反射された後に、希土類添加ダブルクラッドファイバのコアに再結合する割合が低いとはいえ、まったく結合しないわけではない。そのため、高利得の光ファイバ増幅器になるほど、コアに再結合する割合が高くなり、寄生発振する虞がある。また、外部からの反射光に対しては、FBGの反射波長と同じ波長の光はFBGで反射されるが、それ以外の波長の光はFBGを通過して希土類添加ダブルクラッドファイバに入射する。そのため、この希土類添加ダブルクラッドファイバに入射された光によって、寄生発振を誘発してしまう虞がある。

特許文献1: 日本国特許第2977053号公報

特許文献2: 米国特許第5864644号公報

特許文献3: 特開平5-136498号公報

特許文献4: 日本国特許第2653936号公報

特許文献5: 特開平10-56227号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0011] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであって、寄生発振が抑制され、高エネルギーなパルスを安定して出射することが可能な光ファイバレーザの提供を目的とす

る。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明は、上記課題を解決して係る目的を達成するために以下の手段を採用した。

(1) 本発明の光ファイバレーザは、種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプと、を備えた光ファイバレーザであって、前記パワーアンプは、複数の励起光源と、前記複数の励起光源に各々が接続され、前記励起光源から出射された励起光が入射する励起ポートと、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光が入射される信号ポートと、前記励起ポートから入射された各前記励起光と、前記信号ポートから入射されたレーザ光とをあわせて出射する出射ポートを有した光結合器と、前記出射ポートに接続された光ファイバと、を備え；前記光ファイバは、フォトニックバンドギャップファイバであり；前記光ファイバは、横軸が波長、縦軸が損失量を示すグラフにおいて、フォトニックバンドギャップ領域が利得波長帯域よりも狭い損失波長特性を有している。

[0013] (2) 前記光ファイバは、希土類元素がドープされた固体材料からなるコア部と；前記コア部の周囲に設けられた第1クラッドと；前記第1クラッドの前記コア部の近傍に設けられ、前記第1クラッドよりも高い屈折率を持つ多数の高屈折率部が周期構造をなして配置された周期構造部と；を備えるのが好ましい。

[0014] (3) 前記高屈折率部の前記第一クラッドに対する最大比屈折率差が、2%～3%であるのが好ましい。

[0015] (4) 前記フォトニックバンドギャップ領域の波長の光の電界分布は、前記コア部の方が前記周期構造部よりも高く；前記フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光の電界分布は、前記周期構造部の方が前記コア部よりも高い；のが好ましい。

[0016] (5) 前記高屈折率部には、少なくともゲルマニウムが含まれているのが好ましい。

[0017] (6) 本発明の光ファイバレーザは、種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプとからなる光ファ

イバレーザであって、前記マスターオシレータは、励起光源と、この励起光源と接続され、かつ前記励起光源からの励起光とレーザ光とを合波するWDMカプラと、このWDMカプラと接続された光ファイバと、この光ファイバに接続された出力カプラと、アイソレータと、を備え；前記WDMカプラと、前記光ファイバと、前記出力カプラと、前記アイソレータとが順にリング状に接続され；前記光ファイバは、横軸が波長、縦軸が損失量を示すグラフにおいて、フォトリックバンドギャップ領域が利得波長帯域よりも狭い損失波長特性を有している。

- [0018] (7)本発明の光ファイバレーザは、種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発生されたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプとからなる光ファイバレーザであって、前記パワーアンプは、上記(1)に記載のパワーアンプであり；前記マスターオシレータは、上記(6)に記載のマスターオシレータである。

発明の効果

- [0019] 上記(1)に記載の光ファイバレーザによれば、寄生発振を起こすもとなる、不要波長でのASEを効率的に除去できる。そのため、寄生発振が起こるまでの時間を長くできる。ゆえに、従来の光ファイバレーザより多くのエネルギーを蓄えられる。その結果、パルス光の増幅を行う際に、高利得の増幅を行え、従来の光ファイバレーザでは出力できなかったような高エネルギーのパルス出力が可能となる。

また、従来では寄生発振が生じていた条件でも、本発明の光ファイバレーザでは、寄生発振が発生しない。そのため、この寄生発振によって光ファイバレーザの各部品に生じる損傷を抑制できる。さらに、従来用いていたような耐パワー性の低いフィルタやアイソレータといった光部品では、局所的に高強度の不要な光を除去するために光部品が高温になり、冷却装置が必要であったり、部品の特性が劣化したりしていた。本発明の光ファイバレーザでは、不要な光を波長分布的に除去するために、この不要な光が高強度とならない。したがって、この不要な光が光部品に与える影響が少なく、冷却も容易となる。ゆえに、長期にわたって安定して使用可能な光ファイバレーザを提供できる。また、上記(6)に記載の光ファイバレーザでも、同様の作用効果が得られる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1A]図1Aは、本発明の第1実施形態に関わる光ファイバレーザを、模式的に示した図である。

[図1B]図1Bは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、損失波長特性を示した図である。

[図2A]図2Aは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバを模式的に示した断面図である。

[図2B]図2Bは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、屈折率プロファイルを示した図である。

[図2C]図2Cは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、電界分布を模式的に示した図である。

[図3A]図3Aは、本発明の第2実施形態に関わる光ファイバレーザに用いた光ファイバを、模式的に示した断面図である。

[図3B]図3Bは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、屈折率プロファイルを示した図である。

[図3C]図3Cは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、電界分布を模式的に示した図である。

[図4A]図4Aは、本発明の第3実施形態に関わる光ファイバレーザに用いた光ファイバを、模式的に示した断面図である。

[図4B]図4Bは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、屈折率プロファイルを示した図である。

[図4C]図4Cは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、電界分布を模式的に示した図である。

[図5A]図5Aは、本発明の第4実施形態に関わる光ファイバレーザに用いた光ファイバを、模式的に示した断面図である。

[図5B]図5Bは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、A-A'方向における屈折率プロファイルを示した図である。

[図5C]図5Cは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、B-B'方向

における電界分布を模式的に示した図である。

[図5D]図5Dは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、A-A'方向における屈折率プロファイルを示した図である。

[図5E]図5Eは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、B-B'方向における、電界分布を模式的に示した図である。

[図6A]図6Aは、本発明の第5実施形態に関わる光ファイバレーザに用いた光ファイバの断面の、電子顕微鏡写真である。

[図6B]図6Bは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、屈折率プロファイルを示した図である。

[図6C]図6Cは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、X軸方向における、電界分布を模式的に示した図である。

[図6D]図6Dは、同実施形態の光ファイバレーザで用いた光ファイバの、Y軸方向における、電界分布を模式的に示した図である。

[図7]図7は、本発明の第6実施形態に関わる光ファイバレーザを模式的に示した図である。

[図8]図8は、実施例1の光ファイバレーザを用いて、励起光が投入されてから寄生発振が生じるまでの時間を観察した図である。

[図9]図9は、実施例2の光ファイバレーザを用いて、励起光が投入されてから寄生発振が生じるまでの時間を観察した図である。

[図10]図10は、比較例の光ファイバレーザを用いて、励起光が投入されてから寄生発振が生じるまでの時間を観察した図である。

[図11]図11は、実施例4で用いた光ファイバの、透過スペクトルを測定する際に用いた装置を模式的に示した図である。

[図12]図12は、実施例4で用いた光ファイバの、透過スペクトルを示す図である。

[図13A]図13Aは、実施例4の光ファイバレーザのASEスペクトルを測定した際の図である。

[図13B]図13Bは、実施例4の光ファイバレーザのASEスペクトルを測定した際の図である。

[図14]図14は、MOPA方式の代表的な光ファイバレーザの概略図である。

[図15]図15は、一般的なMOを模式的に示した図である。

[図16]図16は、一般的なPA、及び光ファイバレーザを模式的に示した図である。

符号の説明

- [0021] 10(10A, 10B, 10C, 10D, 10E) 光ファイバ
11, 21, 31, 41, 51 コア部
12, 22, 32, 42, 52 周期構造部
13, 23, 33, 43, 53 第1クラッド
14, 24, 32, 44, 54 高屈折率部
100 マスターオシレータ(MO)
101 励起光源
102 WDMカプラ
104 アイソレータ
105 出力カプラ
107 光スイッチ素子
200 パワーアンプ(PA)
201 励起光源
202 励起ポート
203 光結合器
205 出射ポート
206 アイソレータ
316 段間アイソレータ

発明を実施するための最良の形態

[0022] <第1実施形態>

以下、本発明を、図面を参照して詳細に説明するが、本発明はこれに限定されるものではなく、本発明の主旨を逸脱しない範囲において種々の変更が可能である。

図1Aは本発明の第1実施形態に係る光ファイバレーザ50を、模式的に示す構成図である。図1Bは、本実施形態の光ファイバレーザ50に用いている光ファイバ10の

損失波長特性を示したものである。

本実施形態の光ファイバレーザは、図14に示す光ファイバレーザと同様に、種光を発生するレーザ発振器のマスターオシレータ(以下、MOということがある)100と、このMOの後段に接続され、MO100から発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器のパワーアンプ(以下、PAということがある)200とを連結したMOPA方式の光ファイバレーザ50である。MO100としては、例えば、図15に示すファイバリングレーザ100を用いることができる。このMO100の出力側は、段間アイソレータ316を介してPA200に接続されている。PA200は、複数の励起光源と201;これらの複数の励起光源201に各々が接続され、励起光源201から出射された励起光が入射される励起ポート202と;マスターオシレータ100から発せられたレーザ光が入射される信号ポート204と;励起ポート202から入射された各励起光と、信号ポート204から入射されたレーザ光とをあわせて出射する出射ポート205を有した光結合器203と;出射ポート205に接続された光ファイバ10とから概略構成されている。MO100から出射されたレーザ光は、信号ポート204からPA200に入射され、光結合器203を介して光ファイバ10のコアへと入射される。ここで、光ファイバ10は、コアとそのコアを囲むクラッドを備える。コアには、希土類イオンが添加されている。光ファイバ10の構造については、後に詳しく説明する。一方、各励起光源201から出射された励起光が、光結合器203を介して光ファイバ10の第1クラッドへと入射される。光ファイバ10の第1クラッドへと入射された励起光は、コアに添加された希土類イオンに吸収されて反転分布が形成され、誘導放出が生じる。この誘導放出によって、コア内を伝搬するレーザ光が増幅される。この増幅されたレーザ光が、アイソレータ206を介して出力される。すなわち、MO100から出力されたレーザ光が、段間アイソレータ316を介してPA200に入射され、このPA200で増幅されて出力される。

以下、詳細に説明する。

- [0023] 光結合器203は、例えば特許文献2に開示されているような、従来公知の光結合器が用いられ、マルチモード光ファイバからなる複数の励起ポート202と、一つのシングルモードファイバからなる信号ポート204とをその一方側に有している。光結合器203の他方側には、励起ポート202から入射された各励起光と、信号ポート204から入

射されたレーザ光とをあわせて出射する、出射ポート205を有している。

[0024] 励起光源101としては、レーザダイオード(LD)などが好適に用いられるが、これに限定されない。

[0025] 光ファイバ10は、フォトニックバンドギャップファイバであり、図1Bに示す損失特性を有している。図1Bのグラフの横軸は光の波長、縦軸は光の損失量を示している。本実施形態の光ファイバ10の損失波長特性において、フォトニックバンドギャップが、コアに添加された希土類イオンによる光増幅の利得波長帯域内に存在する。さらに、このフォトニックバンドギャップは、利得波長帯域よりも狭い波長帯域となっている。この波長帯域の関係に加え、フォトニックバンドギャップは、光ファイバレーザ50の発振波長を含むように、後述の構造が決められている。すなわち、コア部に添加された希土類イオンが励起された時に発生する広い波長帯域に及ぶ自然放出光のうち、導波すべき発振波長帯域のみにフォトニックバンドギャップが形成されている。このため、発振波長の光は、光ファイバ10のコア部に閉じ込められて伝搬し、発振波長帯域以外の波長帯域の自然放出光は、コア部に閉じ込められることなくクラッドへ放出される。つまり、寄生発振の種となる発振波長帯域以外の自然放出光は、コア部からクラッドへ放出されるので、寄生発振を抑制できる。

特に寄生発振は、希土類添加光ファイバの利得が最大となる波長で発生しやすい。共振器の損失に波長依存性がある場合には、希土類添加光ファイバの利得と、共振器の損失との差(利得－損失)が最大となる波長域で、寄生発振が発生する。したがって、図1Bに示すように、このような波長帯域がフォトニックバンドギャップ領域外にあるように設定すると、寄生発振を抑制する効果が大きくなる。

[0026] 本実施形態の光ファイバレーザ50で用いられる光ファイバ10A(10)は、例えば図2Aに示す断面構造を有している。この光ファイバ10Aは、希土類元素がドープされた固体材料からなるコア部11と;コア部11の周囲に設けられた第1クラッド13と;第1クラッド13のコア部11の近傍に設けられ、第1クラッド13よりも高い屈折率を持つ多数の高屈折率部14が周期構造をなして配置された周期構造部12と;から概略構成されている。図示してはいないが、第1クラッド13の外周には、純粋石英との比屈折率差がマイナスの値(例えば、－5%程度)となるフッ素系紫外線硬化樹脂層を設け

てもよい。

また、光ファイバ10Aは、空孔が無い完全中実構造になっている。したがって、本実施形態の光ファイバ10Aを他の光ファイバと融着接続する際に、空孔が潰れて構造が変化してしまうことが無い。ゆえに、低損失で融着接続できる。

[0027] 光ファイバ10Aの、コア部11と、周期構造部12と、第1クラッド13との各部は、純粋石英ガラスや、それにフッ素、酸化ゲルマニウムなどの屈折率調整用ドーパントを添加してなる石英系ガラスから構成されている。本実施形態の光ファイバ10では、各部の材質は本例示にのみ限定されない。

[0028] コア部11は、純粋石英に希土類イオンが添加されてなる。コア部11の屈折率としては、純粋石英と同等であることが好ましい。添加される希土類イオンとしては、例えば、イッテルビウム(Yb)、エルビウム(Er)、ツリウム(Tm)、ネオジム(Nd)、プラセオジウム(Pr)等が挙げられ、これらを単独で用いてもよいし、これらが所望の割合で混合されたものを用いてもよい。

[0029] 第一クラッド13のコア部11近傍には、ゲルマニウム(Ge)等が添加された断面小円形の多数の高屈折率の領域(高屈折率部14)が配されている。この高屈折率部14は、三角格子状の周期構造に配列されて、周期構造部12を形成している。本明細書中、三角格子状とは、第一の高屈折率部14aと、この第一の高屈折率部14aに隣接する第二の高屈折率部14bと、第一の高屈折率部14a及び第二の高屈折率部14bに隣接する第三の高屈折率部14cとが、正三角形を形成していることをいう。

この高屈折率部14の直径や周期、高屈折率部14同士の間隔、純粋石英ガラスに対する比屈折率差を調整することで、所望の波長帯域のフォトニックバンドを形成できる。例えば、この高屈折率部14の直径は $3\mu\text{m}$ ～ $5\mu\text{m}$ 、高屈折率部14同士の間隔は、 $5\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ 、高屈折率部14の周期は、3層～6層、高屈折率部14の第一クラッドに対する最大比屈折率差は、2%～3%である。

本実施形態の光ファイバ10Aでは、周期構造部12の配されている第一クラッド13の領域は、周期構造部12が配されていない第一クラッド15の領域よりも多い割合を占めている。

[0030] このように、本実施形態に用いられている光ファイバ10Aでは、中心に純粋石英と同

じ屈折率のコア部11が配され、その周囲にGeなどを添加することで、コア部11よりも屈折率の高い周期構造部12が配されている。したがって、この光ファイバ10Aの屈折率プロファイルを図示すると、図2Bに示すようになる。図2Bに示すように、コア部11と第1クラッド13との屈折率は同等であり、周期構造部12の屈折率(各高屈折率部14の屈折率)は、これらコア部11と第1クラッド13との屈折率よりも高くなっている。

[0031] この光ファイバ10Aに光を入射すると、フォトリックバンドギャップの波長域の光は、高屈折率部14の配置された周期構造部12を導波できない。そのため、フォトリックバンドギャップの波長域の光は、低い屈折率の領域、すなわちコア部11に閉じ込められる。その結果、このフォトリックバンドギャップの波長域の光は、図2Cの上段に示すように、電界がコア部11に集中し、コア部11を導波する。すなわち、フォトリックバンドギャップの波長域の光に対しては、低い屈折率の領域がコア部、高い屈折率の領域(高屈折率部14からなる周期構造部12)がクラッドとして機能する。

一方、フォトリックバンドギャップの波長域以外の波長域の光は、コア部11に加え、周期構造部12中も導波できる。この際、その電界分布は、フォトリックバンドギャップ領域にある波長の電界分布とは大きく異なり、図2Cの下段に示すように、電界のほとんどは周期構造部12に存在する。このように、フォトリックバンドギャップの波長域とそれ以外の波長域では、ファイバ内を導波する際の電界分布に大きな違いがあり、フォトリックバンドギャップの波長域以外の波長域の光は、コア部11から光ファイバ10Aの全面に広がり放射されてしまう。ゆえに、希土類イオンが励起された発生した自然放出光は、ASE光となる前に、コア部11からクラッドへと放出される。

[0032] 以上より、本実施形態の光ファイバレーザ50では、光ファイバ10Aを用いることで、寄生発振を起こすもととなる、不要波長でのASEを効率的に除去でき、寄生発振が起こるまでの時間を長くできる。ゆえに、従来の光ファイバレーザよりも、多くのエネルギーを蓄えられる。したがって、パルス光の増幅を行う際に、高利得の増幅を行え、従来の光ファイバレーザでは出力できなかったような高エネルギーのパルス出力が可能となる。また、従来では寄生発振が生じていた条件でも、本発明では寄生発振が発生しない。そのため、ファイバレーザの各部品に生じる損傷を抑制できる。さらに、不要な光を波長分布的に除去するために、この不要な光が高強度とならない。した

がって、この不要な光が光部品に与える影響が少なく、光ファイバレーザを構成する各部品の冷却も容易となる。ゆえに、長期にわたって安定して使用することが可能な光ファイバレーザが得られる。

[0033] <第2実施形態>

図3Aは、第2実施形態に係る光ファイバレーザに搭載された光ファイバ10B(10)を模式的に示した断面図である。図3Bは、本実施形態で用いられている光ファイバ10Bの屈折率プロファイルを示した図である。図3Cは、本実施形態で用いられている光ファイバ10Bの電界分布を示した図である。

本実施形態の光ファイバレーザが第1実施形態の光ファイバレーザと異なる点は、図3Aに示す断面を有し、かつ図3Bに示す屈折率プロファイルと図3Cに示す電界分布とを有した光ファイバ10Bを用いた点である。

[0034] 本実施形態に用いられている光ファイバ10Bでは、第1実施形態の光ファイバ10Aの周期構造の、第1層目(最も内側の層)の高屈折率部をなくして、純粋石英が配された領域21aが形成されている。この領域21aには、YbのほかにAlやGe等がドープされ、周囲の純粋石英よりも0.1%~0.5%程度屈折率が高くなったコア部21が配されている。したがって、本実施形態の光ファイバ10Bの屈折率プロファイルは、図3Bに示すように、領域21aにも、屈折率の高い部分(コア部21)が存在する。

[0035] 本実施形態の光ファイバ10Bでは、フォトニックバンドギャップ領域にある波長の光は、第1実施形態の光ファイバ10Aと同様に、高屈折率部24の配置された屈折率の高い領域(周期構造部22)を導波できない。そのため、周期構造部22よりも内側を導波することになる。本実施形態の光ファイバ10Bには、中心に、純粋石英よりも屈折率の高いコア部21が形成されている。そのため、フォトニックバンドギャップ領域にある波長の光は、図3Cの上段に示すように、第1実施形態で用いた光ファイバ10Aよりも、より強くコア部21に電界が集中する。

[0036] 一方で、フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光は、その電界のほとんどが周期構造部22に存在する。しかし、本実施形態のコア部21は、周囲の純粋石英ガラスよりも屈折率が高くなっているため、図3Cの下段に示すように、光ファイバ10Bのコア部21にもわずかに電界が存在する。そのため、フォトニックバンドギャップ領域以

外の波長の光は、光ファイバ10B内を導波可能となる。

[0037] 本実施形態の光ファイバ10Bは、紡糸中に、光ファイバ母材を回転させて形成されている。そのため、周期構造部22は、ファイバの長さ方向にらせん状に捻られている。ゆえに、実質的に光ファイバ母材の長手方向に、曲げが加えられた状態となっている。そのため、マクロベント、あるいはマイクロベントにより、光ファイバ10Bでは光の損失が発生している。本実施形態で用いている光ファイバ10Bでは、この光の損失により、コア部21を導波するフォトニックバンドギャップ以外の波長域の光に損失を与え、この光を除去している。

一方、コア部21は、光ファイバ10Bの中心にあるため、捻りは、コア部21の形状に現れない。そのため、コア部21を伝搬するフォトニックバンドギャップ領域の波長の光は、上記のマクロベントあるいはマイクロベントによる光の損失が発生せず、コア部11からは除去されない。

この、らせんのピッチに関しては、所望の波長域の光に損失を与えられるように適宜調節して行えばよい。

[0038] 以上より、光ファイバ10Bを用いることで、フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光を効果的に除去できる。そのため、この光ファイバ10Bを用いた光ファイバレーザでは、寄生発振を起こすもとなる不要波長でのASEが除去され、寄生発振が起こるまでの時間を長くできる。ゆえに、上述した第1実施形態の光ファイバレーザ50と同様な効果が得られる。特に、本実施形態の光ファイバ10Bでは、コア部21の屈折率が第1実施形態の光ファイバ10Aよりも高くなっている。そのため、フォトニックバンドギャップ領域の波長の光の電界は、第1実施形態の光ファイバ10Aよりも強くコア部21に存在する。その結果、本実施系形態の光ファイバレーザでは、コア部21内を伝搬するレーザ光をより大きく増幅でき、第1実施形態の光ファイバレーザよりも、高エネルギーのパルス出力が可能となる。

[0039] 本実施形態で用いた光ファイバ10Bでは、マクロベントあるいはマイクロベントによって、コア部21を導波するフォトニックバンドギャップ以外の波長域の光に損失を与えていたが、周期構造部22中に、Ybの蛍光波長の光を吸収、あるいは散乱させるような添加物を加え、フォトニックバンドギャップ以外の波長域の光に損失を与えてもよ

い。

また、光ファイバ10Bの入射側及び出射側の反射減衰量が、光ファイバ10Bで受ける利得よりも大きければ、寄生発振を抑制できる。光ファイバ10Bを導波する光は、この光ファイバ10Bから出射するとき、及び入射するとき2回の損失を受ける。そのため、光ファイバ10Bから光が出射する時、あるいは入射するとき、フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光が受ける損失が、光ファイバ10Bを導波する際に受ける利得の半分よりも大きければ、寄生発振を抑制できる。

[0040] <第3実施形態>

図4Aは、第3実施形態に係る光ファイバレーザに搭載された光ファイバ10C(10)を模式的に示した断面図である。図4Bは、本実施形態で用いられている光ファイバ10Cの屈折率プロファイルを示した図である。図4Cは、本実施形態で用いられている光ファイバ10Cの電界分布を示した図である。

本実施形態の光ファイバレーザが第1実施形態の光ファイバレーザと異なる点は、図4Aに示す断面を有し、かつ図4Bに示す屈折率プロファイルと図4Cに示す電界分布とを有した光ファイバ10Cを用いた点である。

[0041] 本実施形態に用いられている光ファイバ10Cでは、第1実施形態の周期構造部12の内側の第1層目と第2層目(コア近傍部)をなくして、純粋石英からなる領域31aが形成されている。この領域31aには、YbのほかにAlやGe等がドーピングされ、周囲の純粋石英よりも0.1%~0.5%程度屈折率の高いコア部31が形成されている。したがって、本実施形態の光ファイバ10Cの屈折率プロファイルは、図4Bに示すように、領域31aのコア部31にも、屈折率の高い部分が存在する。

[0042] 周期構造部32に関しては、第1実施形態の周期構造部12と比較し、高屈折率部34同士の間隔が10%~20%程度狭く、コア部31近傍に密集している。高屈折率部34の直径は、第1実施形態のものよりも30%~40%程度大きくなっている。高屈折率部34と純粋石英ガラスとの比屈折率差は、第1実施形態及び第2実施形態の光ファイバと、同等である。本実施系形態の光ファイバ10の周期構造部34の層数は、第1実施形態のものよりも少なく、例えば3層程度である。第一クラッド33の直径は第1実施形態と同様のため、第一クラッド33の周期構造部32が配されていない領域35が、

第1実施形態のものよりも広がっている。

- [0043] 第一クラッド33の外周には、純粋石英との比屈折率差がマイナスの値(例えば、－5%程度)となるフッ素系紫外線硬化樹脂層36が配されている。
- [0044] 本実施形態に用いられている光ファイバ10Cでは、純粋石英ガラスからなる第一クラッド33が第2のコアをなし、フッ素系紫外線硬化樹脂36が第2のクラッドをなし、マルチモード導波するダブルクラッド構造となっている。
- [0045] 屈折率プロファイル及び電界分布に関しては、第2実施形態と同様であり、それぞれ図4Bと図4Cに示すようになる。すなわち、フォトニックバンドギャップ領域にある波長の光は、図4Cの上段に示すように、第1実施形態で用いた光ファイバ10Aよりも、より強くコア部31に電界が集中する。フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光は、図4Cの下段に示すように、光ファイバ10Cの周期構造部32に加え、コア部31にもわずかに電界が存在するため、光ファイバ10C内を導波可能となる。本実施形態で用いている光ファイバ10Cも、第2実施形態で用いた光ファイバ10Bと同様に、マクロベント、あるいはマイクロベントにより、フォトニックバンドギャップ波長域以外の光が除去されている。コア部31に関しても第2実施形態の光ファイバ10Bと同様で、フォトニックバンドギャップ領域にある波長の光には、上記のマクロベント、あるいはマイクロベントによる光の損失が発生せず、コア部11から除去されていない。
- [0046] 以上より、光ファイバ10Cを用いることで、フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光を効果的に除去できる。そのため、この光ファイバ10Cを用いた光ファイバレーザでは、寄生発振を起こすもととなる不要波長でのASEが除去され、寄生発振が起こるまでの時間を長くでき、上述した第2実施形態の光ファイバレーザと同様な効果が得られる。

[0047] <第4実施形態>

図5Aは、第4実施形態に係る光ファイバレーザに搭載された光ファイバ10D(10)を模式的に示した断面図である。図5Bは、光ファイバ10Dの、A－A'方向における屈折率プロファイルである。図5Cは、光ファイバ10Dの、B－B'方向における屈折率プロファイルである。図5Dは、光ファイバ10Dの、A－A'方向における電界分布である。図5Eは、光ファイバ10Dの、B－B'方向における電界分布である。

本実施形態の光ファイバレーザが第1実施形態の光ファイバレーザと異なる点は、図5Aに示す断面を有し、かつ図5B, 5Cに示す屈折率プロファイルと図5D, 5Eに示す電界分布とを有した光ファイバ10Dを用いた点である。

[0048] 本実施形態に用いられている光ファイバ10Dは、コア部41の純粋石英ガラスに対する比屈折率差、高屈折率部44同士の間隔や直径、比屈折率差などは、第3実施形態で用いている光ファイバ10Cと同様である。本実施形態の光ファイバ10Dは、第3実施形態の光ファイバ10Cよりも高屈折率部44の層数が多く、かつコア部41から光ファイバの外周に向かって1つの直線状の領域47には、高屈折率部44が配されていない。

[0049] 屈折率プロファイル及び電界分布に関しては、それぞれ図5B～5Eに示すとおりである。すなわち、フォトリックバンドギャップ領域にある波長の光は、図5Dと図5Eの上段に示すように、第1実施形態で用いた光ファイバ10Aよりも、より強くコア部41に電界が集中する。

フォトリックバンドギャップ領域以外の波長の光は、図5Dと図5Eの下段に示すように、光ファイバ10Dの周期構造部42に加え、コア部41にもわずかに電界が存在するため、光ファイバ10D内を導波可能となる。

本実施形態で用いている光ファイバ10Dも、2実施形態で用いた光ファイバ10Bと同様に、マクロベント、あるいはマイクロベントにより、コア部31を導波するフォトリックバンドギャップ波長域以外の光が除去されている。コア部41に関しても第2実施形態の光ファイバ10Bと同様で、フォトリックバンドギャップ領域にある波長の光には、上記のマクロベント、あるいはマイクロベントによる光の損失が発生せず、コア部41から除去されない。

[0050] 特に、本実施形態で用いている光ファイバ10Dは、第3実施形態で用いている光ファイバ10Cよりも高屈折率部44の層数が多く配されている。そのため、フォトリックバンドギャップ領域以外の波長の光は、より多く周期構造部42中に存在する。その結果、寄生発振の抑制効果をより高められる。また、高屈折率部44の層数が多くなり、フォトリックバンドギャップによる光の閉じこめ効果が強くなっても、高屈折率部44が配されていない領域47を通じて高次モードが放射される。そのため、基本モードで

安定して動作可能となる。

[0051] したがって、この光ファイバ10Dを用いた、本実施形態の光ファイバレーザでは、第3実施形態の光ファイバレーザより、更に効果的に寄生発振の発生を抑制でき、基本モードで安定して動作が可能となる。

[0052] <第5実施形態>

図6Aは、第5実施形態に係る光ファイバレーザに搭載された光ファイバ10E(10)の断面の電子顕微鏡写真である。図6Bは、光ファイバ10Eの屈折率プロファイルを示した図である。図6Cは、光ファイバ10EのX軸方向における電界分布を示した図である。図6Dは、光ファイバ10EのY軸方向における電界分布を示した図である。

本実施形態の光ファイバレーザが第1実施形態の光ファイバレーザと異なる点は、図6Aに示す断面を有し、かつ図6Bに示す屈折率プロファイルと図6C、6Dに示す電界分布とを有した光ファイバ10Eを用いている点である。

[0053] 本実施形態に用いられている光ファイバ10Eでは、コア部61から光ファイバの外周に向かった1つの直線状にのみ、高屈折率部64が配されている。この高屈折率部64は、第1実施形態で用いた光ファイバ10Aと同様である。したがって、この光ファイバ10Eは、図6Bに示すような屈折率プロファイルを有している。図6B上段は、図6Aに示すX軸方向の屈折率プロファイルである。図6Bは、図6Aに示すY軸方向の屈折率プロファイルである。

[0054] この光ファイバ10Eに光を入射すると、フォトリックバンドギャップの波長域の光は、X軸方向に配置された純粋石英と、Geがドーピングされた高屈折率部による周期構造とによって形成されるフォトリックバンドギャップにより、高屈折率部を導波できずコア領域51内に閉じ込められる。その光は、Y軸方向には、純粋石英と、フッ素(F)がドーピングされた低屈折率部との屈折率差によりコア領域51内に閉じ込められて導波する。

一方、フォトリックバンドギャップの波長域外の光は、Y軸方向に関しては、フォトリックバンドギャップの波長域の光と同様に純粋石英とFがドーピングされた低屈折率部との屈折率差により、コア領域51内に閉じ込められ得るが、X方向に関してはその周期構造のために、その電界分布のほとんどがコア領域51ではなく高屈折率部に分布して導波することとなる。

[0055] 以上より、光ファイバ10Eを用いることで、フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光を効果的に除去できる。そのため、この光ファイバ10Eを用いた光ファイバレーザでは、寄生発振を起こすもととなる不要波長でのASEが除去され、寄生発振が起こるまでの時間を長くでき、上述した第1実施形態の光ファイバレーザ50と同様な効果が得られる。

さらに、本実施形態の光ファイバ10Eは、X軸方向とY軸方向の屈折率構造が大きく異なるために、コアは複屈折を有する。複屈折を有することで、コア内を導波する光はその偏波成分により異なった屈折率を有し、光学的にも異なった特性を示す。特に、光ファイバを曲げたときに発生する損失特性に違いが発生し、X軸方向の偏波成分はY軸方向の偏波成分よりも曲げによる損失が発生しやすい。したがって、レーザの発振波長に応じてY軸方向にのみ曲げ損失が発生するような径で光ファイバを曲げることで、X軸方向の偏波成分のみを選択的に増幅し、出力できる。すなわち、光ファイバに曲げを加えるだけで、効率を低下させることなく、単一偏波のレーザ光を出力可能である。

[0056] また、他の実施形態として、希土類添加光ファイバにおいて、全長にわたってコア部分にFBGを設ける、希土類添加光ファイバを所定の径で巻くことで、信号波長の長波長側に損失を持たせる、もしくは、希土類添加光ファイバのカットオフ波長を信号波長のわずかに短波側に設け、希土類添加光ファイバに曲げを与えることで信号波長の短波側に損失を設ける、とした構成により、本発明と同様に利得波長帯域に損失を持たせることも可能である。

[0057] <第6実施形態>

図7は、第6実施形態に係る光ファイバレーザ100を模式的に示した図である。

本実施形態では、MOの光ファイバに、上述した第1実施形態～第5実施形態に用いられている光ファイバ10A～10Eをそれぞれ適用できる。

すなわち、励起光源101と接続され、かつ励起光源101からの励起光とレーザ光とを合波するWDMカプラ102と、光ファイバ10と、出力カプラと、アイソレータ104とが順にリング状に接続されて概略構成されているMOにおいて、光ファイバ10が上述したフォトニックバンドギャップファイバ10A～10Eである。

MOに上記の光ファイバ10A～10Eを同様に適用することで、PAに適用した際と同様に寄生発振を抑制でき、高出力可能なMOが得られる。

[0058] PAのみ、あるいはMOのみに限定されず、PAとMOの両方に、上述した第1実施形態～第5実施形態に用いられている光ファイバ10を適用可能である。

両方に適用することで、より効果的に寄生発振を抑制でき、更に高出力な光ファイバレーザが得られる。

実施例

[0059] <実施例1>

図1Aに示す構成の光ファイバレーザを構成した。

まず、フォトリソバンドギャップファイバとして、図2Aに示す断面構造及び図2B、2Cに示す特性を有した光ファイバを作製した。コア部には、Ybイオンを添加した。最も寄生発振を起こしやすい波長域、すなわちYbイオンを添加した光ファイバの、最大利得波長域である1030nm～1050nm付近は、バンドギャップ領域に含まれないようにし、信号波長である1064nmはバンドギャップ領域にあるように作製した。より詳細に説明すると、純粋石英ガラスにYbイオンを添加し、純粋石英ガラスとの比屈折率差 Δc が0%、直径 d が $7.0\mu\text{m}$ となるコア部を作製した。このコア部を、純粋石英ガラスからなる直径 $125\mu\text{m}$ の第一クラッドで被覆した。第一クラッドのコア部の周囲には、純粋石英ガラスにゲルマニウムを添加して、複数の高屈折率部を作製した。この高屈折率部は、互いに $7.0\mu\text{m}$ 離間させて三角格子状に配し、7層の高屈折率部からなる周期構造部とした。各高屈折率部は、純粋石英ガラスとの最大比屈折率差 Δh が2.8%、直径 d_h が $3.5\mu\text{m}$ である。この作製した光ファイバのコア吸収量は、976nmの波長で1200dB/mであった。

光結合器は、Yb添加ダブルクラッドファイバとの接続損失が小さくなるように、出射ポートとして、コア径が $7\mu\text{m}$ 、クラッド径が $125\mu\text{m}$ の希土類添加ダブルクラッドファイバを有するものを使用した。励起ポートは、コア径が $105\mu\text{m}$ 、NAが0.15のマルチモードファイバを6本用いた。信号ポートは、コア径が $7\mu\text{m}$ 、NAが0.14のシングルモードファイバを用いた。励起光源には、発振波長915nm、最大出力5Wの半導体レーザを6台用いた。

[0060] この光ファイバレーザを用いて、マスターオシレータからの信号がないまま励起光源を駆動して、励起光を出射し、希土類添加ダブルクラッドファイバが30Wの励起パワーで励起されている状態とした。その後、この励起光が投入されてから寄生発振が起こるまでの時間を測定した。その結果を図8に示す。

図8に示すように、図2A～2Cに示すフォトニックバンドギャップファイバを用いた実施例1の光ファイバレーザでは、30 μ s程度励起しても寄生発振が起こらなかった。さらに長時間励起を続けたところ、70 μ s程度で寄生発振が観測された。

[0061] <実施例2>

実施例1で用いたフォトニックバンドギャップファイバ(以下、PBGFということがある)の変わりに、図3A～3Cで示したPBGFを用いたこと以外は、実施例1と同様にして光ファイバレーザを作製した。本実施例のPBGFは、実施例1のPBGFの周期構造の第1層目(最も内側の1層目)をなくして純粋石英とし、この中心には、純粋石英ガラスに酸化イッテルビウムをドーピングして増幅媒体として機能するようにした。さらに、この中心に酸化アルミニウムを添加することで、純粋石英との比屈折率差を0.3%とした、直径6 μ mのコア部を形成した。高屈折率部は、純粋石英ガラスとの比屈折率差を2.6%とした。各高屈折率部の間隔は6 μ m、直径は4.8 μ mとした。第1クラッドの直径を125 μ mとなるようにし、その周囲には純粋石英ガラスとの比屈折率差がー0.5%のフッ素系紫外線硬化樹脂層を配した。本実施例で用いたPBGFは、5mmあたり1回転の捻れが加えられて作製されている。

本実施例で用いたPBGFは、純粋石英製の第1クラッドを第2のコア、フッ素系紫外線硬化型樹脂層を第2のクラッドとしてマルチモード導波する、ダブルクラッド構造となっている。コア吸収量は、976nmの波長で1200dB/mである。

この光ファイバレーザを、実施例1と同様にして、励起光が投入されてから寄生発振が起こるまでの時間を測定した。その結果を図9に示す。

図9に示すように、図3A～3Cに示すPBGFを用いた実施例2の光ファイバレーザでは、30 μ s程度励起しても寄生発振が起こらなかった。さらに長時間励起を続けたところ、70 μ s程度で寄生発振が観測された。

[0062] <比較例>

実施例1で用いたPBGFの変わりに、従来のダブルクラッド構造を有した希土類添加光ファイバを用いた。この光ファイバは、コアにはYbイオンを添加し、コア径は $6\mu\text{m}$ 、第1クラッド径は $125\mu\text{m}$ 、コア吸収量は 976nm の波長で $1200\text{dB}/\text{m}$ である。この光ファイバレーザを、実施例1と同様に、励起光が投入されてから寄生発振が起こるまでの時間を測定した。その結果を図10に示す。

図10に示すように、従来の光ファイバを用いた比較例の光ファイバレーザでは、 $30\mu\text{s}$ 程度で寄生発振が観測された。

[0063] 以上より、本発明の光ファイバレーザでは、上記のPBGF10を用いることで、比較例で示した従来の光ファイバレーザと比べて、寄生発振するまでの時間が2倍以上延びることが確認された。このことにより、パルスを増幅する直前の希土類添加光ファイバの利得は、従来のファイバレーザよりも大きくなり、より高エネルギーのパルスを出力することができる。

[0064] 次に、上記で作製した実施例1の光ファイバレーザと、比較例の光ファイバレーザとを用いて、MOからパルス幅 50ns 、ピークパワー 60W (パルスエネルギー 0.003mJ) のパルスを発生させて、これらの光ファイバレーザ(PA)に入力させ、これらのPAから出力される最大のパルスエネルギーを測定した。

比較例の光ファイバレーザでは、 $30\mu\text{s}$ 程度のパルス間隔で寄生発振が起こるため、MOから入射されるパルスの間隔を $30\mu\text{s}$ とした。その結果を表1に示す。

[0065] [表1]

	実施例1	比較例
パルス幅	50ns	50ns
ピークパワー(kW)	8	3
パルスエネルギー(mJ)	0.4	0.15

[0066] 表1に示すように、比較例の光ファイバレーザでは、PAから出力されるパルスは、パルス幅が 50ns 、ピークパワーが 3kW (パルスエネルギーが 0.15mJ) であった。実施例1の光ファイバレーザでは、パルス幅が 50ns 、ピークパワーが 8kW (パルスエネ

ルギーが0.4mJ)であった。よって、本発明の光ファイバレーザによれば、上述したPBGFを用いることで、従来の光ファイバレーザでは実現できない高エネルギーのパルス出力が可能である。

[0067] <比較例2>

次に、実施例2の光ファイバレーザを作製する際に、ねじれを加えないで作製したPBGFを用いて、実施例2と同様に光ファイバレーザを作製し、これを比較例2の光ファイバレーザとした。実施例2と同様にして、励起光が投入されてから寄生発振が起こるまでの時間を測定した結果、寄生発振が40 μ s程度で観測された。

これは周期構造中を導波する1040nm付近の光が除去されず、わずかにコアに分布するこの光の成分が、比較例2のPBGFを導波するうちに増幅されたこと、及び導波中に受けた利得が、PBGFから出射された後にアイソレータ等で反射されて再びPBGFに入射するまでの損失に比べて大きかったためである。

[0068] 寄生発振は、PBGFで受ける利得よりも、PBGFの入射側及び出射側の反射減衰量が大きくなった時点で発生する。すなわち、PBGFの入射側及び出射側の反射減衰量がPBGFで受ける利得よりも大きければ寄生発振を抑制できる。PBGFの入射側と出射側の反射減衰量は、光ファイバ増幅器の回路構成によって異なり、場合によっては反射減衰量がほぼゼロの場合もありうる。一方、PBGFから他の光ファイバに光が入射する際、フォトリックバンドギャップ領域以外の波長の光は、その電界がほとんど周期構造中に分布するために大きな損失を受ける。

PBGFを導波する光は、PBGFから出射するとき、及び入射するとき2回の損失を受ける。そのため、PBGFから光が出射する時、あるいは入射するとき、フォトリックバンドギャップ領域以外の波長の光が受ける損失が、PBGFを導波する際に受ける利得の半分よりも大きければ、寄生発振を抑制できる。そこで、比較例2のPBGFにおいて、入射側及び出射側の接続損失を測定したところ、共に15dB程度であった。したがって、PBGFの入射側及び出射側の接続損失を15dBより大きくすれば、寄生発振が抑制できると、考えられる。

[0069] <実施例3>

比較例2のPBGFにおいて、より多くの成分が周期構造中を導波できるように、PB

GFの周期構造の層数のみ多くし、入射側及び出射側の接続損失が25dB程度確保できるPBGFを作製した。このPBGFの、コア部の直径は $6\mu\text{m}$ 、第1クラッドの直径は $125\mu\text{m}$ 、コア吸収量は976nmの波長で1200dB/mである。このPBGFを用いて実施例1と同様に光ファイバレーザを構成し、これを実施例3の光ファイバレーザとした。この光ファイバレーザを、実施例1と同様にして、励起光が投入されてから寄生発振が起こるまでの時間を測定した。

その結果、 $60\mu\text{s}$ 程度で寄生発振が観測された。

[0070] <実施例4>

まず、図6Aに示すPBGFを作製した。コア部は実施例1と同様である。各高屈折率部の間隔は $7.3\mu\text{m}$ 、直径は $3.7\mu\text{m}$ 、純粋石英ガラスとの比屈折率差は2.8%として作製した。次に、図11に示すように、このPBGFを1mずつ取り出し、直径が100mm、80mmまたは60mmとなるようにそれぞれ1回ずつ巻いた。その後、各PBGFの端面に白色光源を照射してコア部を励起し、透過スペクトルを測定した。この結果を、図12に示す。

[0071] 図12より、波長およそ1100nm以下の光は遮断され、波長およそ1100nm以上の光は透過していた。したがって、本実施例で用いたPBGFは、コア部を導波する波長1000～1100nmのASE光を、フォトニックバンドギャップによるフィルタ効果で取り除けること及びおよそ1100nm以上の波長の光を安定して発振できることが確認された。

また、光ファイバを巻く径の大きさが小さくなるほど、得られたグラフが長波長側にシフトしていたことから、光ファイバを巻く際の径を変えることで、容易に希土類イオン添加増幅用光ファイバのゲインプロファイルを制御可能であった。光ファイバの巻く径を変化させても、850nm周辺のイットリウム の励起による自然放出光のフィルタリングには、影響を及ぼさなかった。すなわち、ASE光の除去効果を保ったまま、希土類イオン添加増幅用光ファイバのゲインプロファイルの制御が可能となった。

[0072] 次に、本実施例の光ファイバを用いて、実施例1と同様に光ファイバレーザを構築し、これを実施例4の光ファイバレーザとした。この際に用いた光ファイバの長さは19mとし、この光ファイバを巻く径を60mm～100mmで変化させた。この実施例4の光

ファイバレーザを用いてASEスペクトルを測定した。この結果を図13A, 13Bに示す。図13Aは、励起光源として発振波長915nm、最大出力0.45Wの半導体レーザ6台を用いた際の結果である。図13Bは、励起光源として発振波長915nm、最大出力2.2Wの半導体レーザ6台を用いた際の結果である。

- [0073] 図13A, 13Bより、1030nm周辺の波長のASEを抑制できた。また、光ファイバを巻く径を小さくするほど、ASEをより効果的に抑制でき、かつ、ASEのピークが長波長側にシフトした。図13A, 13Bから、励起光源の出力が変化しても、光ファイバを巻く径の大きさを変えることで、光ファイバのゲインプロファイルを制御できることが分かった。

産業上の利用可能性

- [0074] 本発明は、高エネルギーなパルスを安定して出射することが可能な光ファイバレーザに適用できる。

請求の範囲

- [1] 種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプと、を備えた光ファイバレーザであって、
前記パワーアンプは、
複数の励起光源と、
前記複数の励起光源に各々が接続され、前記励起光源から出射された励起光が入射する励起ポートと、
前記マスターオシレータから発せられたレーザ光が入射される信号ポートと、
前記励起ポートから入射された各前記励起光と、前記信号ポートから入射されたレーザ光とをあわせて出射する出射ポートを有した光結合器と、
前記出射ポートに接続された光ファイバと、
を備え；
前記光ファイバは、フォトニックバンドギャップファイバであり；
前記光ファイバは、横軸が波長、縦軸が損失量を示すグラフにおいて、フォトニックバンドギャップ領域が利得波長帯域よりも狭い損失波長特性を有している；
ことを特徴とする光ファイバレーザ。
- [2] 前記光ファイバは、
希土類元素がドープされた固体材料からなるコア部と；
前記コア部の周囲に設けられた第1クラッドと；
前記第1クラッドの前記コア部の近傍に設けられ、前記第1クラッドよりも高い屈折率を持つ多数の高屈折率部が周期構造をなして配置された周期構造部と；
を備えることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバレーザ。
- [3] 前記高屈折率部の前記第一クラッドに対する最大比屈折率差が、2%～3%であることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバレーザ。
- [4] 前記フォトニックバンドギャップ領域の波長の光の電界分布は、前記コア部の方が前記周期構造部よりも高く；
前記フォトニックバンドギャップ領域以外の波長の光の電界分布は、前記周期構造

部の方が前記コア部よりも高い；

ことを特徴とする請求項2に記載の光ファイバレーザ。

- [5] 前記高屈折率部には、少なくともゲルマニウムが含まれていることを特徴とする請求項2に記載の光ファイバレーザ。

- [6] 種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプとからなる光ファイバレーザであって、

前記マスターオシレータは、

励起光源と、

この励起光源と接続され、かつ前記励起光源からの励起光とレーザ光とを合波するWDMカプラと、

このWDMカプラと接続された光ファイバと、

この光ファイバに接続された出力カプラと、

アイソレータと、

を備え；

前記WDMカプラと、前記光ファイバと、前記出力カプラと、前記アイソレータとが順にリング状に接続され；

前記光ファイバは、横軸が波長、縦軸が損失量を示すグラフにおいて、フォトニックバンドギャップ領域が利得波長帯域よりも狭い損失波長特性を有している；

ことを特徴とする光ファイバレーザ。

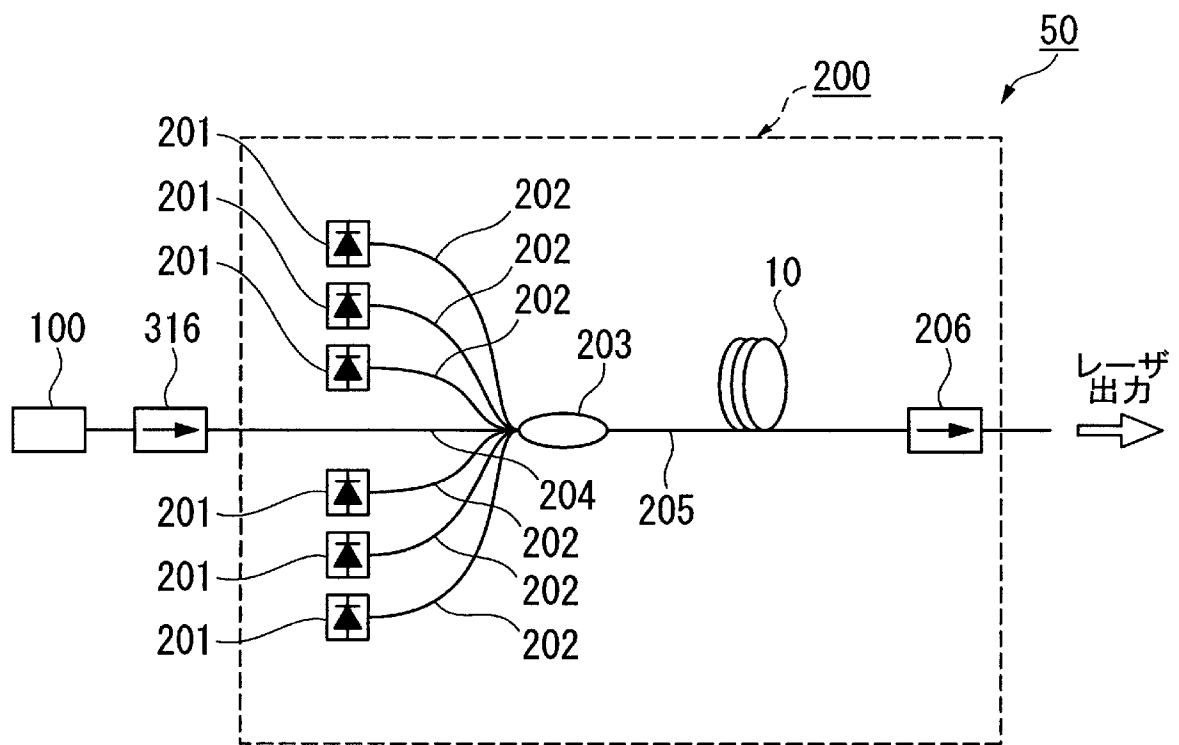
- [7] 種光を発生するレーザ発振器であるマスターオシレータと、このマスターオシレータの後段に接続され、前記マスターオシレータから発せられたレーザ光を増幅して出力する光増幅器であるパワーアンプとからなる光ファイバレーザであって、

前記パワーアンプは、請求項1に記載のパワーアンプであり；

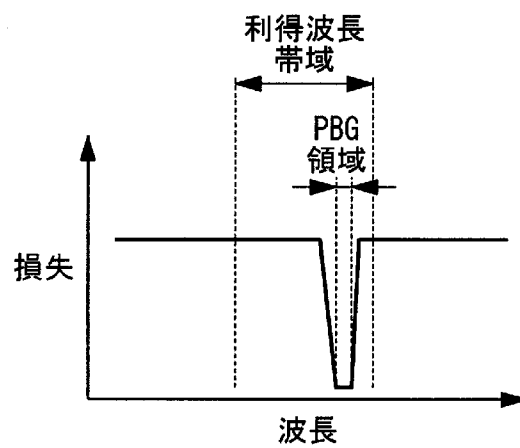
前記マスターオシレータは、請求項6に記載のマスターオシレータである；

ことを特徴とする光ファイバレーザ。

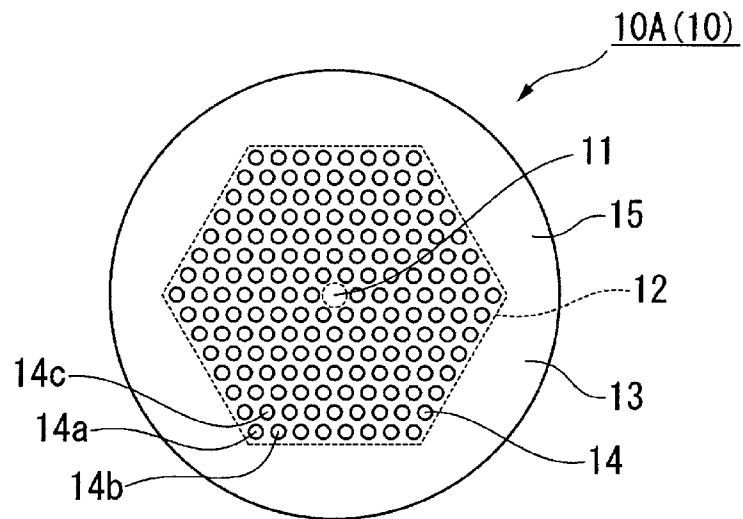
[図1A]



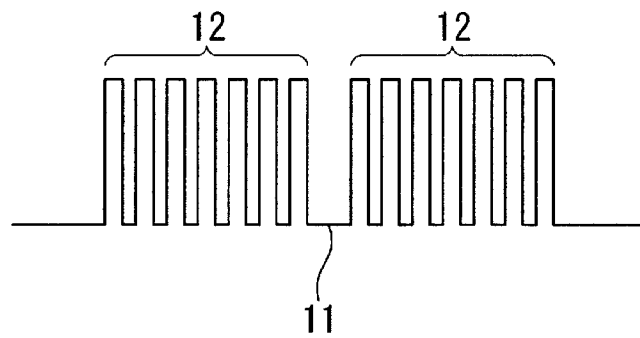
[図1B]



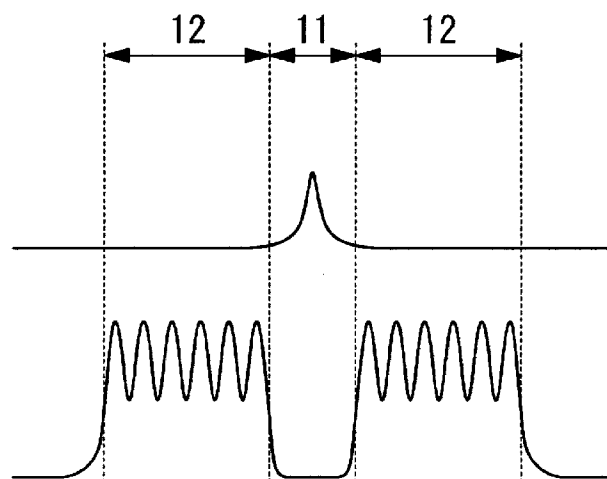
[図2A]



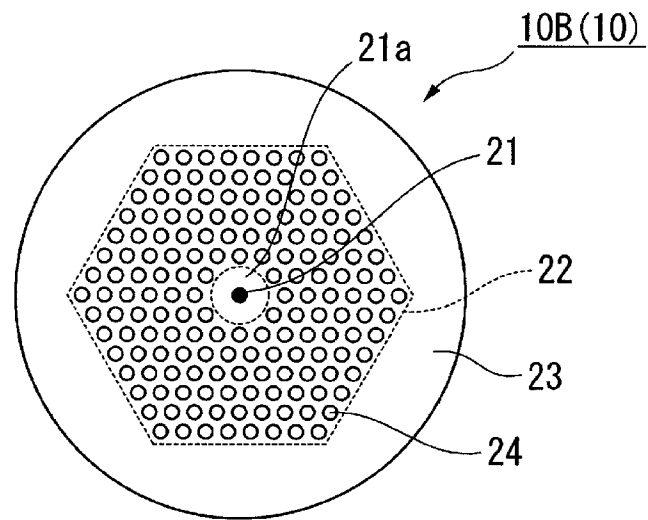
[図2B]



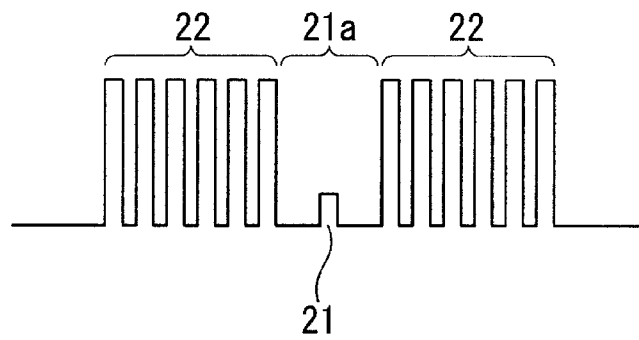
[図2C]



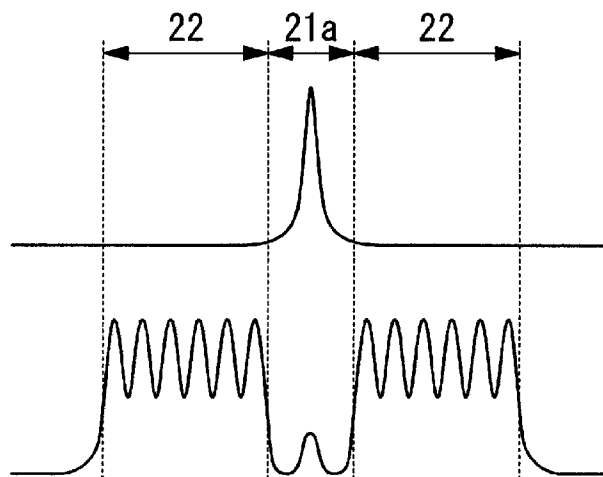
[図3A]



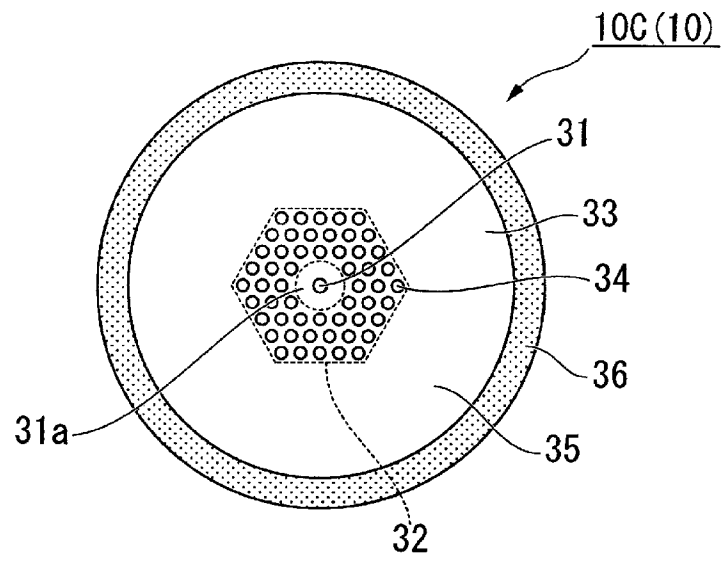
[図3B]



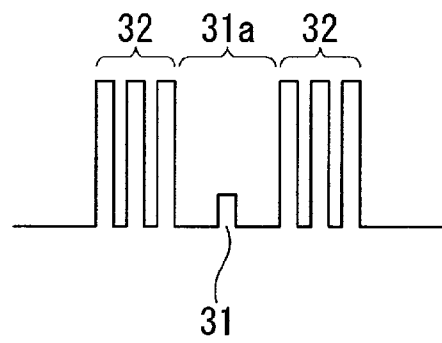
[図3C]



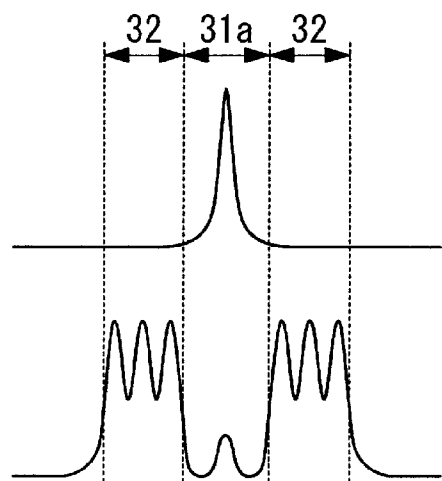
[図4A]



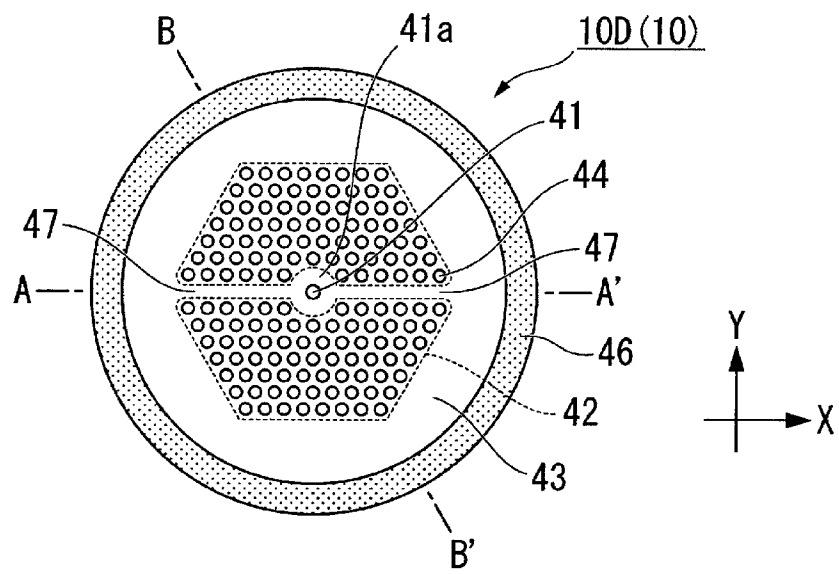
[図4B]



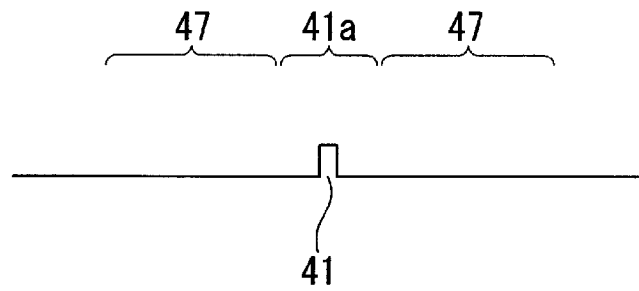
[図4C]



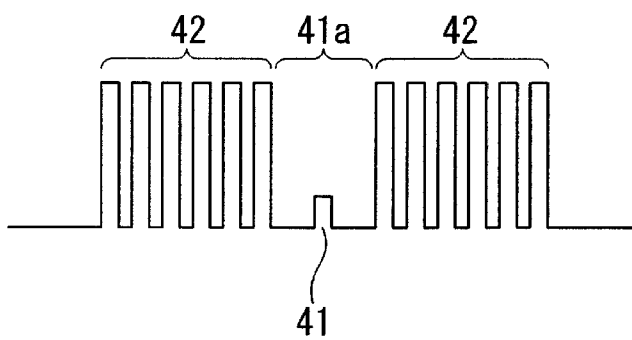
[図5A]



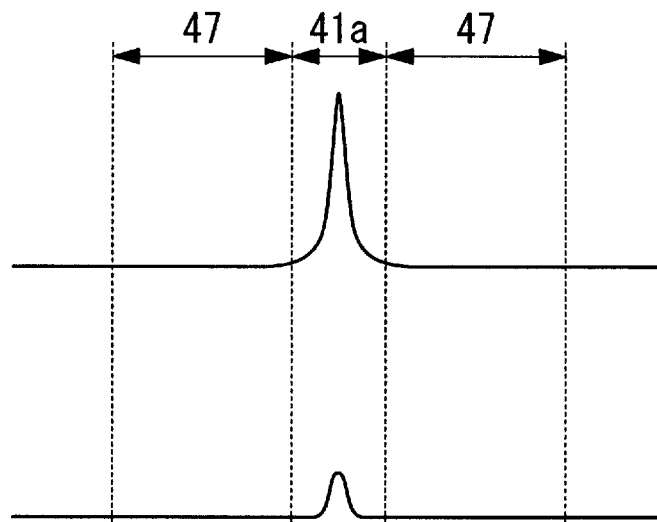
[図5B]



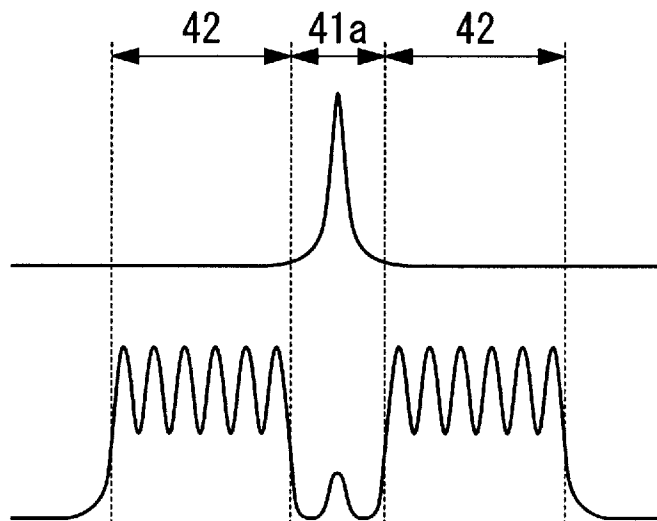
[図5C]



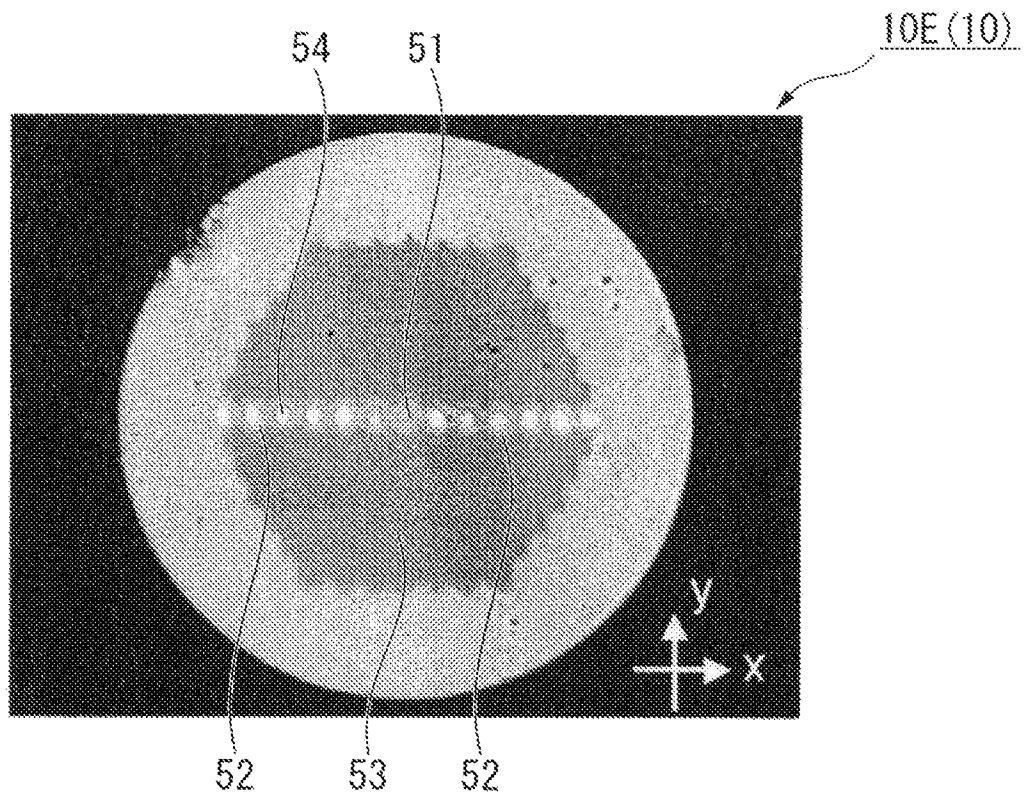
[図5D]



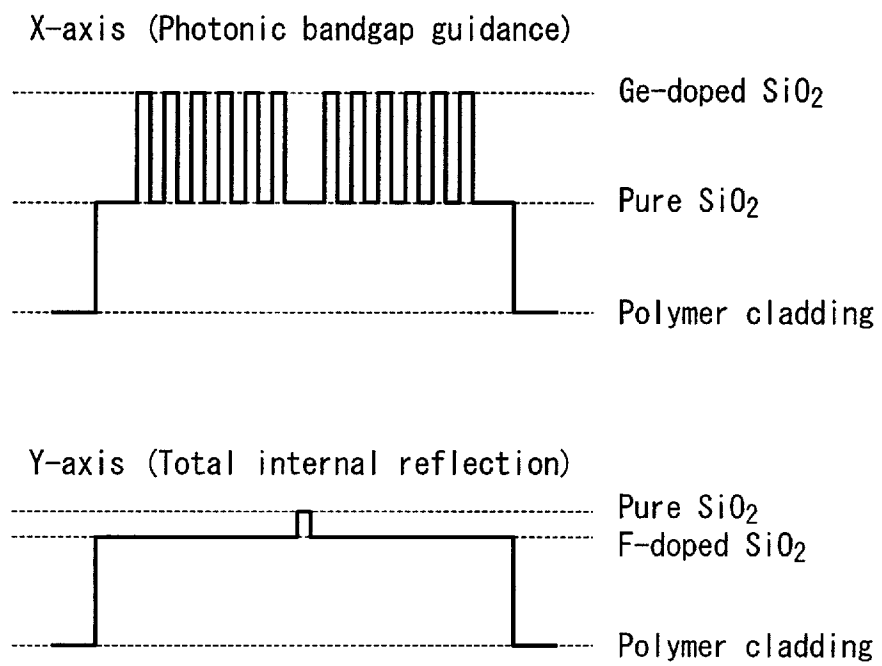
[図5E]



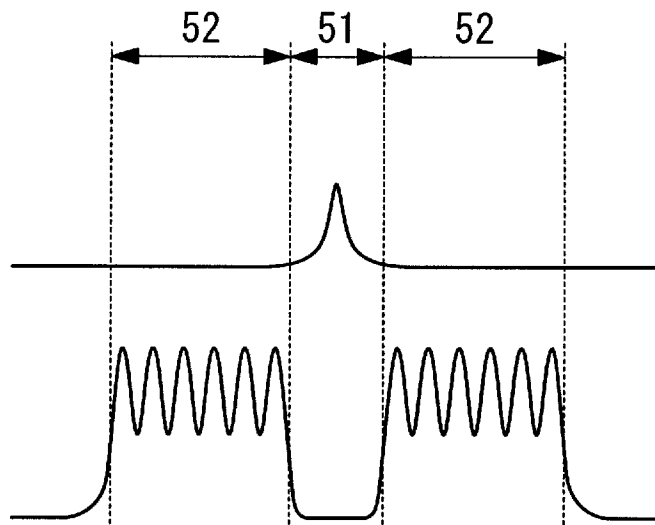
[図6A]



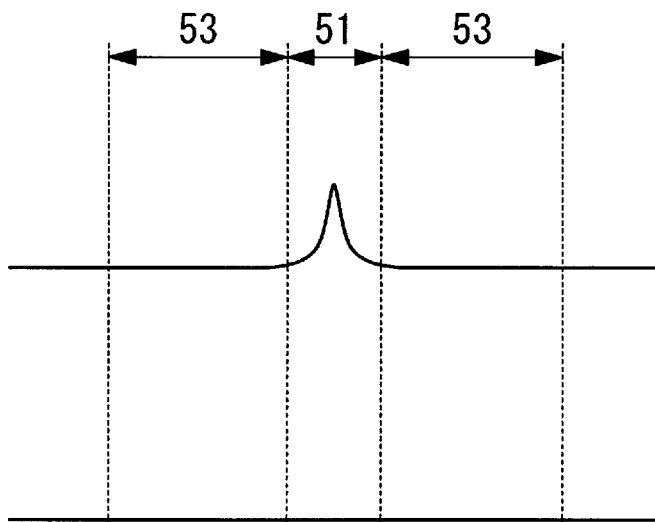
[図6B]



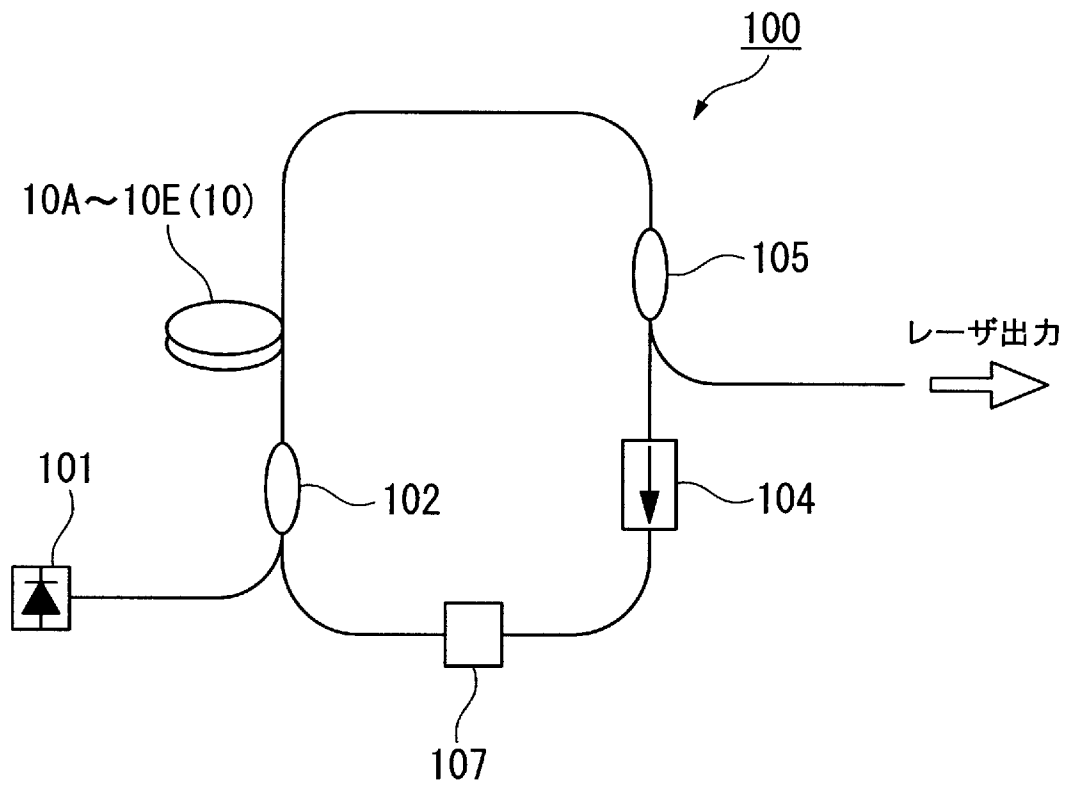
[図6C]



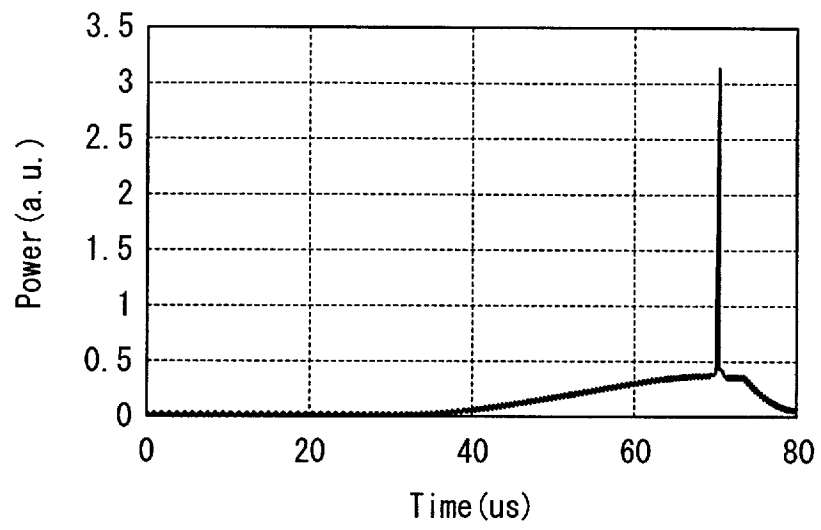
[図6D]



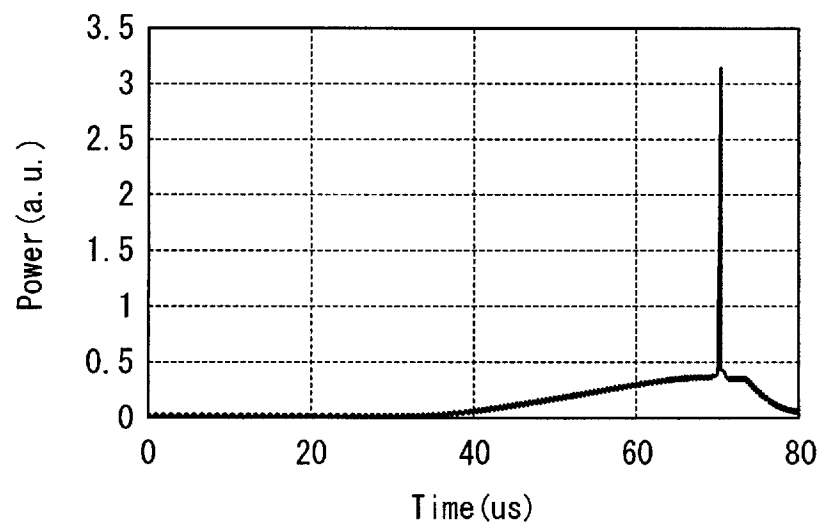
[図7]



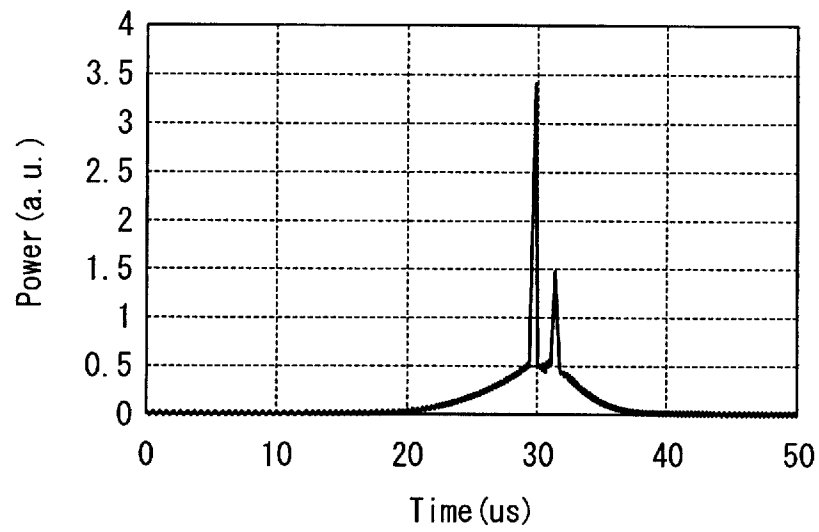
[図8]



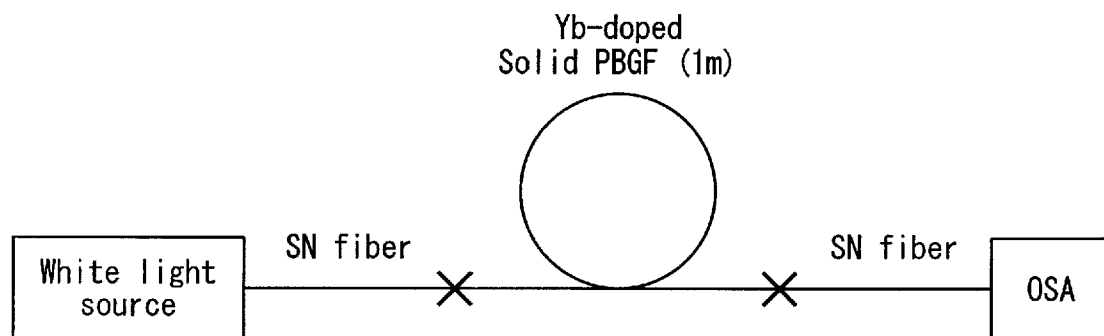
[図9]



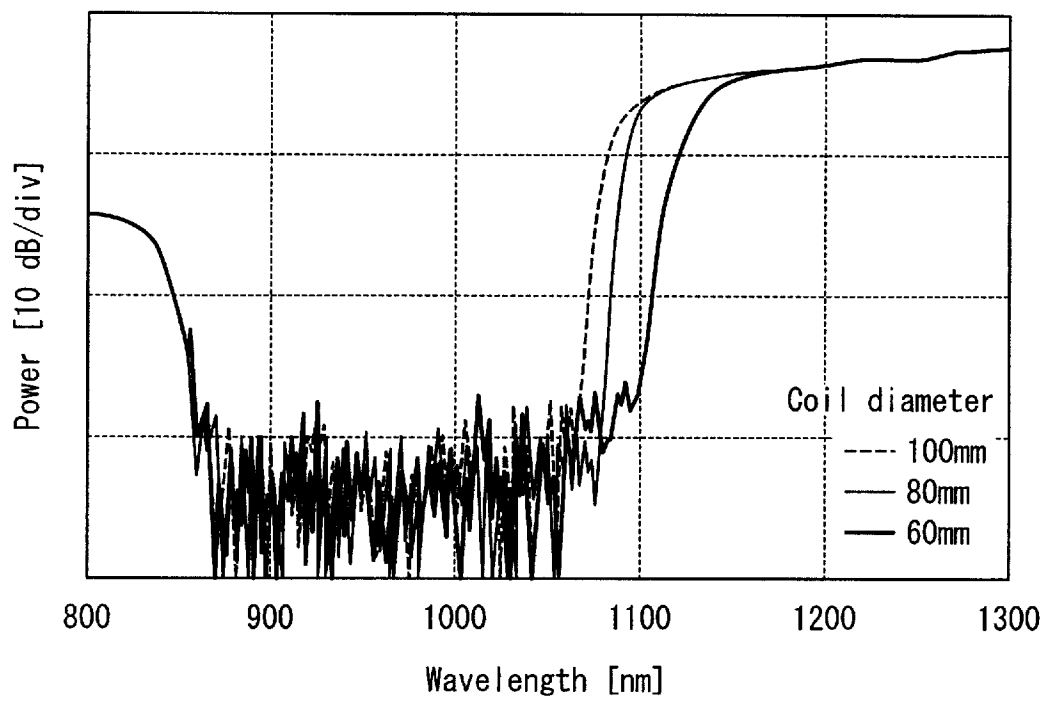
[図10]



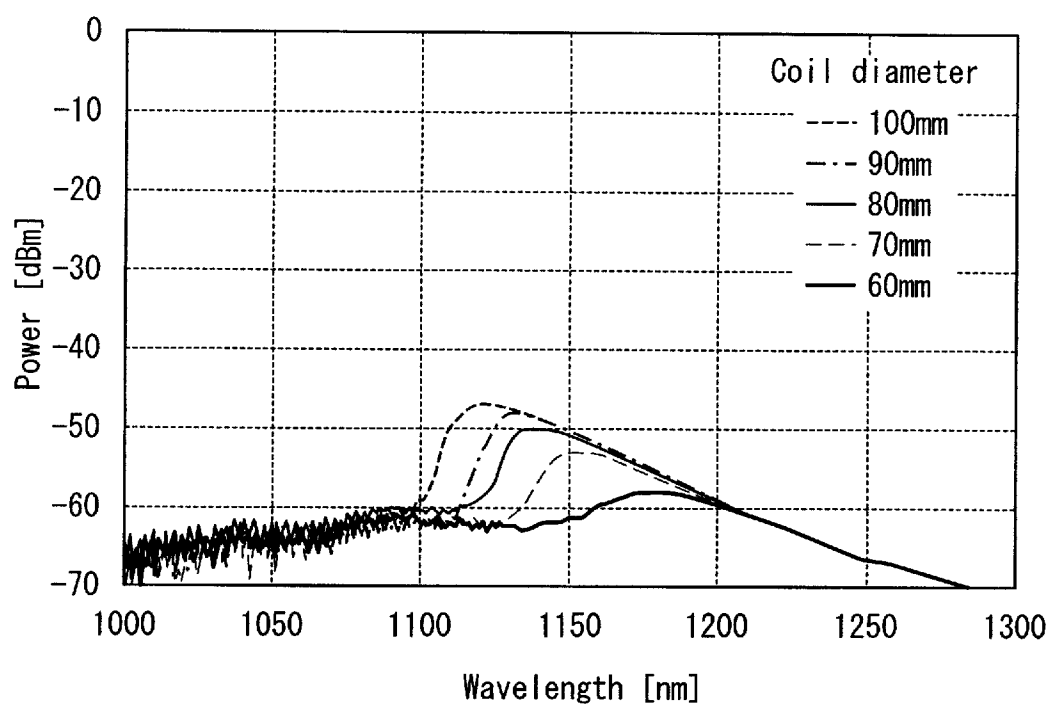
[図11]



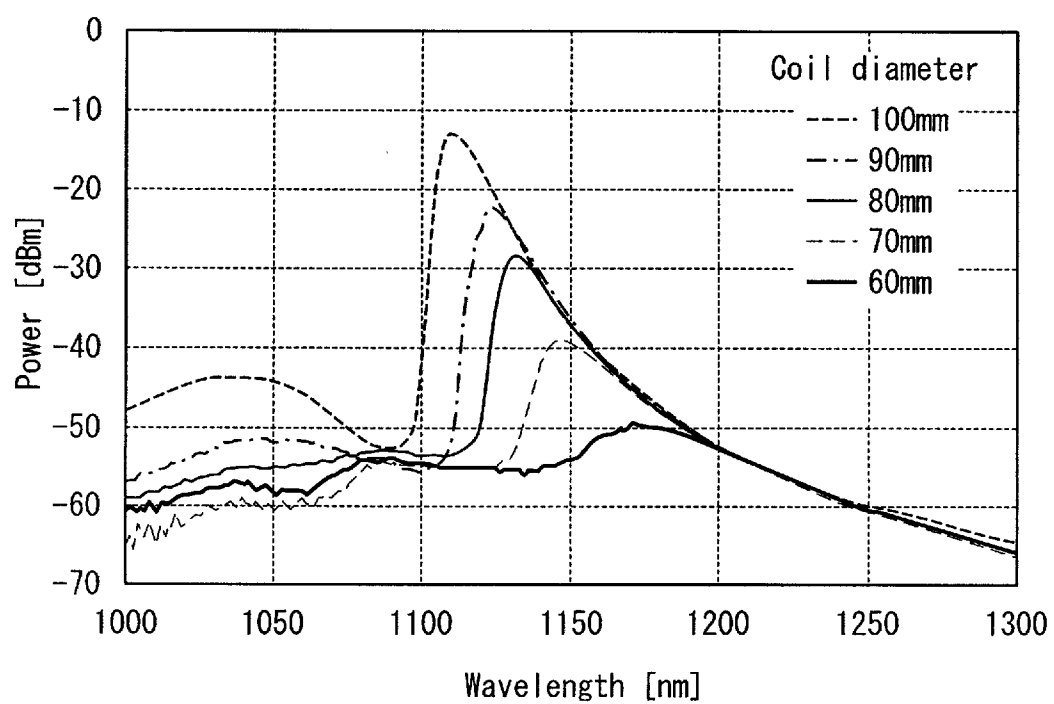
[図12]



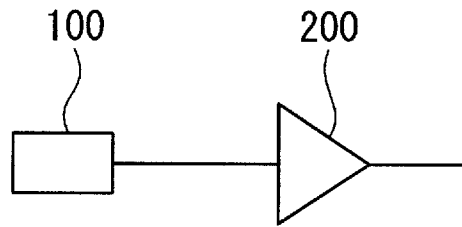
[図13A]



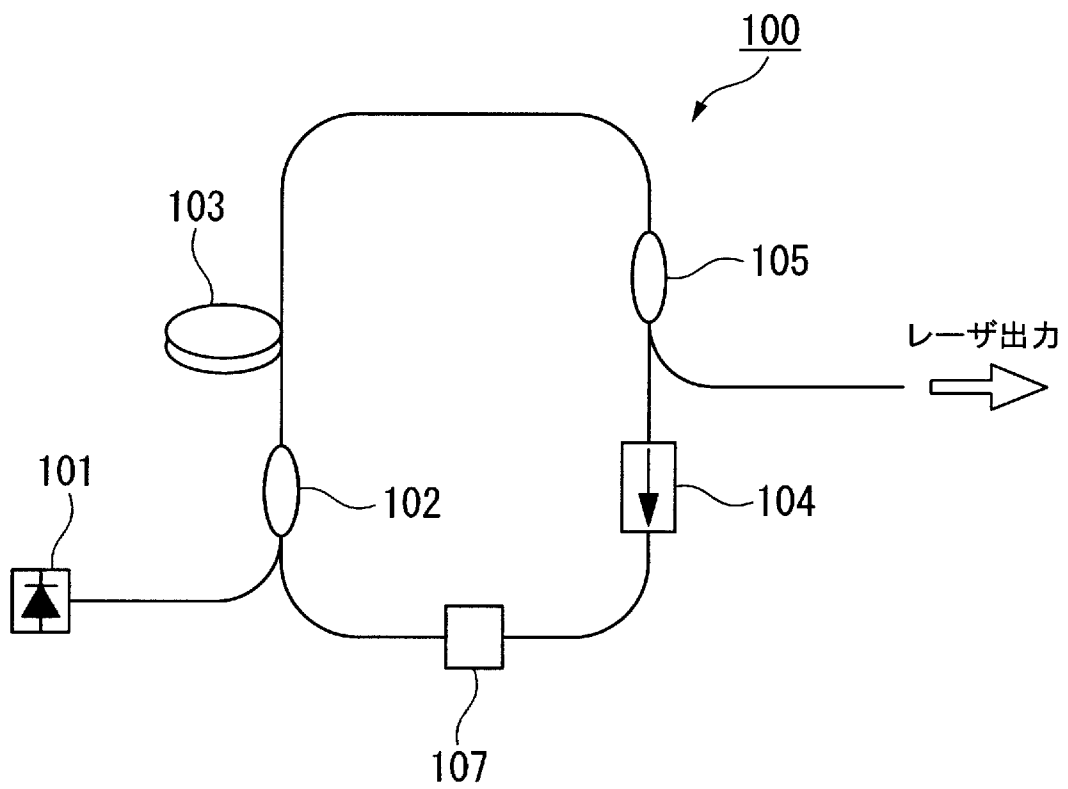
[図13B]



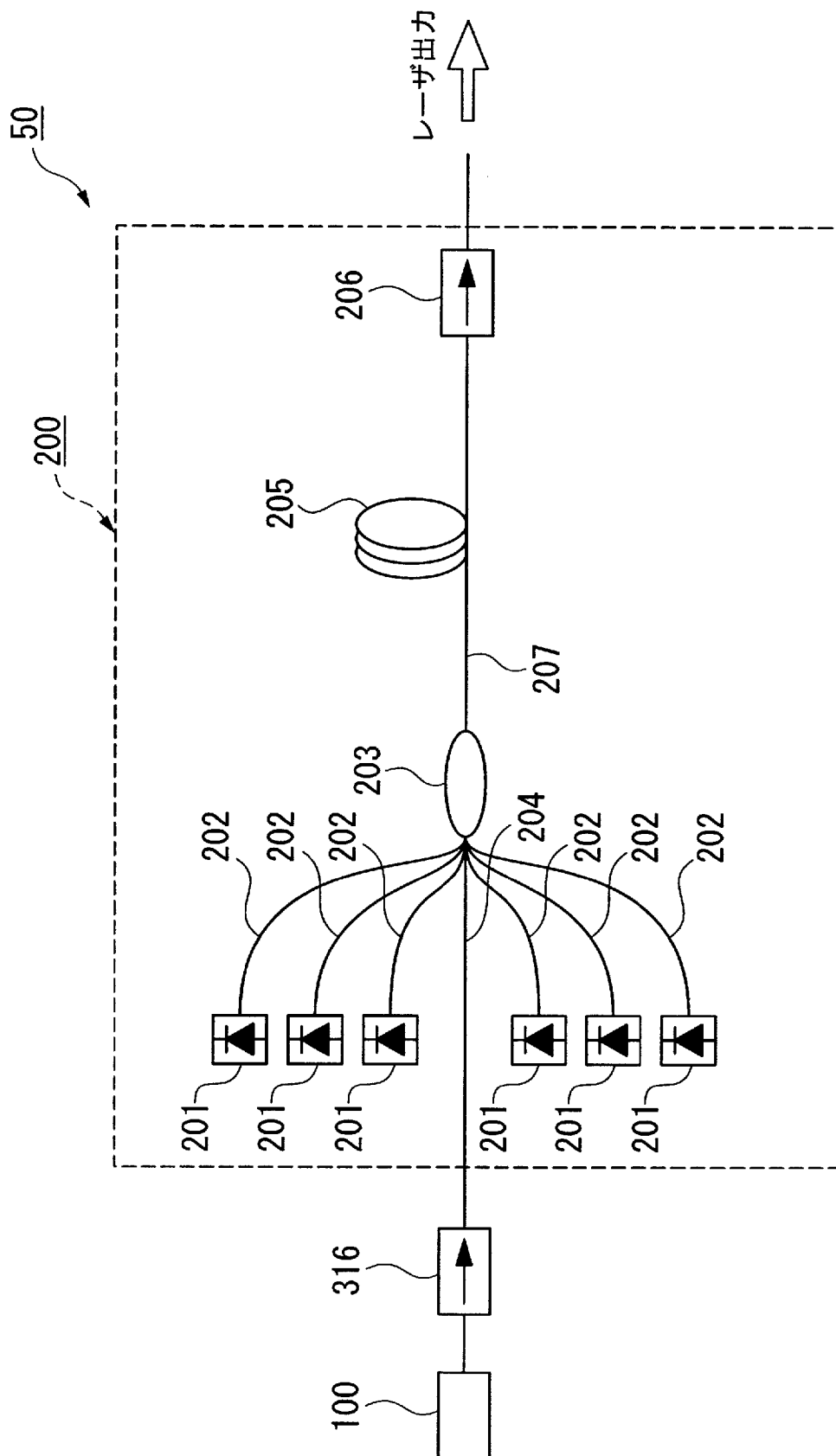
[図14]



[図15]



[図16]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/052918

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01S3/06(2006.01) i, G02B6/00(2006.01) i, G02B6/024(2006.01) i, G02B6/036(2006.01) i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01S3/06, G02B6/00, G02B6/024, G02B6/036 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2009 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2009 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2009 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2007-316526 A (Fujikura Ltd.), 06 December, 2007 (06.12.07), Full text; all drawings (Family: none)	1-7
A	JP 2007-208107 A (Hitachi Cable, Ltd.), 16 August, 2007 (16.08.07), Par. Nos. [0042], [0043] (Family: none)	1-7
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ 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 07 March, 2009 (07.03.09)		Date of mailing of the international search report 17 March, 2009 (17.03.09)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer Telephone No.
Facsimile No.		Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. H01S3/06(2006.01)i, G02B6/00(2006.01)i, G02B6/024(2006.01)i, G02B6/036(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. H01S3/06, G02B6/00, G02B6/024, G02B6/036			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> 日本国実用新案公報 日本国公開実用新案公報 日本国実用新案登録公報 日本国登録実用新案公報 </div> <div> 1 9 2 2－1 9 9 6 年 1 9 7 1－2 0 0 9 年 1 9 9 6－2 0 0 9 年 1 9 9 4－2 0 0 9 年 </div> </div>			
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示		関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2007-316526 A（株式会社フジクラ）2007.12.06, 全文、全図（ファミリーなし）		1－7
A	JP 2007-208107 A（日立電線株式会社）2007.08.16, 段落【0042】、【0043】（ファミリーなし）		1－7
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献			
国際調査を完了した日 0 7 . 0 3 . 2 0 0 9		国際調査報告の発送日 1 7 . 0 3 . 2 0 0 9	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / J P） 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官（権限のある職員） 前川 慎喜 電話番号 03-3581-1101 内線 3255	2 K 8 9 1 2