

(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2007-5484
(P2007-5484A)

(43) 公開日 平成19年1月11日(2007.1.11)

(51) Int. Cl. F I テーマコード (参考)
HO1S 3/10 (2006.01) HO1S 3/10 Z 5F172

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2005-182425 (P2005-182425)	(71) 出願人	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22) 出願日	平成17年6月22日 (2005.6.22)	(74) 代理人	100092152 弁理士 服部 毅麿
		(72) 発明者	宿南 宣文 神奈川県横浜市港北区新横浜三丁目9番18号 富士通ネットワークテクノロジーズ株式会社内
		(72) 発明者	稲垣 真也 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
		Fターム(参考)	5F172 AE12 AF03 BB25 NN23 NN24 ZZ11

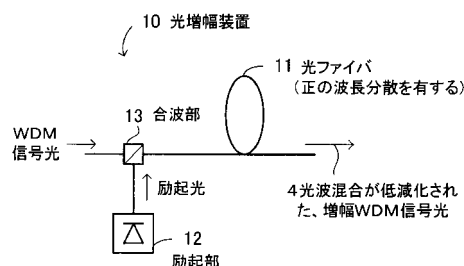
(54) 【発明の名称】 光増幅装置及び光ファイバ

(57) 【要約】

【課題】 4光波混合を低減して、WDM伝送の品質の向上を図る。

【解決手段】 光ファイバ11は、信号帯域で正の波長分散を持ち、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体となる。励起部12は、光ファイバ11に励起光を入射する。光ファイバ11は、伝搬すべき波長の位相不整合性を得るために、増幅すべき信号の周波数である信号周波数と、波長分散が零となる周波数である零分散周波数と、の差が大きくなる信号帯域内の波長分散として、正の波長分散を有することで、4光波混合の発生を抑圧した光増幅媒体として機能する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

光信号を増幅する光増幅装置において、
信号帯域で正の波長分散を持ち、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体となる光ファイバと、
前記光ファイバに励起光を入射する励起部と、
を有することを特徴とする光増幅装置。

【請求項 2】

前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、波長分散が + 5 ps/nm/km 以上かつ + 15 ps/nm/km 以下であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅装置。

10

【請求項 3】

前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、コア径が 3.9 μm 以上かつ 6.3 μm 以下であり、比屈折率差が 0.6 以上かつ 2.0 以下であることを特徴とする請求項 2 記載の光増幅装置。

【請求項 4】

前記光ファイバは、少なくとも 2 つ以上を直列に配置した構成であり、光強度が高い励起光が入射される側が、信号帯域で正の波長分散を持つことを特徴とする請求項 2 記載の光増幅装置。

【請求項 5】

前記光ファイバは、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体であり、希土類が添加されて、少なくとも 1 つの信号で正の波長分散を持ち、前記励起部は、前記光ファイバに励起光を入射して、1570 ~ 1605 nm の光信号を増幅することを特徴とする請求項 1 記載の光増幅装置。

20

【請求項 6】

前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、波長分散が + 5 ps/nm/km 以上かつ + 15 ps/nm/km 以下であることを特徴とする請求項 5 記載の光増幅装置。

【請求項 7】

複数の波長が多重化された光信号を増幅する光ファイバにおいて、
信号帯域で正の波長分散を有することを特徴とする光ファイバ。

【請求項 8】

前記光ファイバは、波長分散が + 5 ps/nm/km 以上かつ + 15 ps/nm/km 以下であることを特徴とする請求項 7 記載の光ファイバ。

30

【請求項 9】

前記光ファイバは、コア径が 3.9 μm 以上かつ 6.3 μm 以下であり、比屈折率差が 0.6 以上かつ 2.0 以下であることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバ。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、光増幅装置及び光ファイバに関し、特に光信号を増幅する光増幅装置及び光信号を増幅する光増幅媒体となる光ファイバに関する。

40

【背景技術】**【0002】**

光通信ネットワークは、一層のサービスの高度化が望まれており、光伝送技術として、WDM (Wavelength Division Multiplex) が広く導入され始めている。WDM は、波長の異なる光を多重化して、1本の光ファイバで複数の信号を同時に伝送する方式である。

【0003】

WDM は、長距離幹線系において、光増幅器の広帯域性を生かして、複数波長を多重化した波長多重化信号を増幅して伝送し、また、波長ルーチング機能により、例えば、都市部におけるメトロ・リングネットワークを構築する。

【0004】

50

光増幅器の種類には、希土類添加光ファイバ増幅器、半導体光増幅器（SOA：Semiconductor Optical Amplifier）、光ファイバラマン増幅器等がある。また、希土類添加光ファイバ増幅器で使用する希土類としては、1525～1625 nmの波長帯を増幅するEr（エルビウム）、1480～1510 nmの波長帯を増幅するTm（トリウム）、1300 nmの波長帯を増幅するPr（プラセオジウム）等がある。

【0005】

この中で、WDMシステムで最も多く使用される代表的な光増幅器は、希土類としてErが光ファイバのコアに添加されたEDF（Erbium-Doped Fiber）を光増幅媒体とする、Er添加光ファイバ増幅器（EDFA：EDF Amplifier）である。EDFAは、励起光をEDFに照射して光信号を進行させ、そのとき生じる誘導放出によって、光信号のレベルを増幅させる。

【0006】

ここで、光増幅原理の概要について説明する。図19はエネルギー準位を示す図である。電子（原子）のエネルギー状態には、基底状態と励起状態がある。基底状態は、エネルギーが一番低い状態のことで、励起状態は、それよりも高いエネルギー状態のことをいう（励起状態は、1つだけでなく複数のレベルとして存在できるが、ここでは基底状態と1つの励起状態との2準位系とする）。そして、エネルギー準位とは、基底状態を基準にして、電子がどのエネルギー状態に位置するかを表すものである。

【0007】

電子の遷移過程（電子のエネルギー状態間での移動過程）には、吸収、自然放出、誘導放出がある。図20は吸収を示す図である。電子は、通常の状態においては、エネルギーの低い最も安定な基底状態に存在するが、光ファイバなどの物質に光が入射すると、その物質内の電子は入射光のエネルギーを吸収して、よりエネルギーの高い状態へ移動する（高い準位に持ち上げることを励起（ポンピング）と呼ぶ）。この遷移過程を吸収という。

【0008】

図21は自然放出を示す図である。基底状態のエネルギーをE0、励起状態のエネルギーをE1とする。電子が励起状態で存在すると、ある緩和時間の経過後には、電子はエネルギーの低い状態へ落ちてくる。

【0009】

このとき、電子は、励起していた準位のエネルギーと、遷移した先の準位のエネルギーとの差に等しいエネルギーの光を放出する。この例では、E1からE0へ遷移するので、E1 - E0のエネルギーを持つ光が放出される。このように、励起準位に存在する電子が、入射光とは無関係に自然に、ある確率で発光して低レベルの準位へ遷移する過程が自然放出である。

【0010】

図22は誘導放出を示す図である。励起状態に電子が存在しているときに、外部からE1 - E0の光が入射したとする。このとき、電子は、入射してきた光と同じエネルギー、位相、進行方向の光を放出して基底状態へ戻る。すなわち、入射時に1つだった光子が、出射時には同じ2つの光子に増えることになる。この現象が誘導放出であり、光増幅の原理となっている。

【0011】

ここで、物質中の電子の密度（個/m³）がNであり、そのうちのN1が基底状態、N2が励起状態にあるとする（ $N = N_1 + N_2$ ）。この物質に光が入射した場合、誘導放出が吸収を上回って光増幅が起こるためには、 $N_2 > N_1$ が成り立たなければならない（自然放出は無視できるものとする）。

【0012】

なお、上位の準位の電子密度が大きい状態を反転分布と呼び（低い準位の方が安定なので、通常は低い状態に電子はたくさんあるのだが、励起されることで高い準位に電子の分布が多くなって、分布が反転している状態のことである）、反転分布係数をtとすると、 $t = N_2 / (N_1 + N_2)$ （ $= (N_2 / N)$ ）となる。

【0013】

図23、図24は2準位系の電子密度の分布状態を示す図である。図23は熱平衡分布、図24は反転分布の状態を示している。縦軸はエネルギー、横軸は占有電子密度である。なお、これらの図において、熱平衡分布の場合、電子は、安定した基底状態に多く存在し、反転分布の場合、エネルギーの高い準位に電子が多く存在する様子が示されている。

【0014】

したがって、光を増幅させるには、図24のような反転分布を実現することが必要であるが、電子を吸収によって励起準位へ励起しても、吸収と誘導放出は同時に起きるので（1つの電子に対する吸収と誘導放出は同じ確率で起こることが知られている）、誘導放出によって励起状態から基底状態へ落ちる遷移も同時に増えてしまう。

10

【0015】

したがって、誘導放出型の光増幅器では、通常、多準位系（例えば、EDFAでは3準位系）によって光を励起している。

図25は3準位系での反転分布を示す図である。励起状態に2つの準位を設け、基底状態、第1励起状態、第2励起状態の3つのレベル系を考える。また、基底状態のエネルギーを E_0 、第1励起状態のエネルギーを E_1 、第2励起状態のエネルギーを E_2 とする（ $E_0 < E_1 < E_2$ ）。以下、EDFAの増幅原理に対応させて説明する。

【0016】

なお、第2の励起状態の寿命（電子がある準位にとどまる平均時間）は短く、エルビウムイオン（ Er^{3+} ）が第2励起状態にあるときは、速やかに第1励起状態へ非放射遷移することを増幅動作の条件とする（非放射遷移とは、高レベル準位から低レベル準位へ遷移する場合に、エネルギーを光として出さずに、エネルギーを熱として出す遷移のことである）。

20

【0017】

Er^{3+} が添加された光ファイバであるEDFに対して、 $E_2 - E_0$ に相当する励起光（一般的には、 $1.48 \mu m$ または $0.98 \mu m$ ）が入射すると、基底状態にあった Er^{3+} は、吸収により第2励起状態へ励起される。すると、第2励起状態まで励起された Er^{3+} は、速やかに第1励起状態へ非放射遷移することで、第1励起状態に多くの Er^{3+} がたまることになり、励起光を強くしても第2励起状態から基底状態への誘導放出はほとんど起こらなくなる。

30

【0018】

このため、励起光を十分強くすれば、第1励起状態に対して、 Er^{3+} が多く分布した反転分布の状態を実現することができる。また、EDFにこのような反転分布が得られたら、 $E_1 - E_0$ の信号光をEDFに入射させることで、第1励起状態から基底状態への遷移である誘導放出が生じるので、信号光を増幅させることが可能になる。

【0019】

EDFAの特徴としては、増幅波長帯が、通信用光ファイバとして最も多用される石英系光ファイバの最低損失波長帯である $1550 nm$ に一致していることや、増幅特性として、数十mW～数百mWの出力が容易に得られること、さらには利得帯域幅が数THzと広いなどといったことが挙げられ、光ファイバ通信システムを構築する上での最も重要な構成要素として、不可欠な光デバイスとなっている。

40

【0020】

EDFの従来技術として、正常分散値を有する光ファイバにより、4光波混合歪みを低減化した技術が提案されている（例えば、特許文献1）。

【特許文献1】特開2004-79876号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0021】

EDFAの増幅帯域としては、 $1530 \sim 1565 nm$ 帯のC-band（Conventional-Band）が一般的に利用される。また、近年では通信トラフィックの急激な増加に伴い、使用す

50

べき波長数も増加しており、高密度の波長多重を行うDWDM (Dense WDM) が開発されている。このため、EDFAにおいても、1570 ~ 1605 nm帯のL-band (Long wavelength Band) の長波長帯にまで利得をシフトするようになってきている。

【0022】

なお、EDFAは、利得波長特性を持っている。すなわち、多波長を一括増幅した際に、各波長の利得ピークは同一の値とならずに、波長毎に利得ピークにばらつきが生じることになる。

【0023】

受信側で各波長のピークパワーにばらつきがあると、波長毎に伝送品質が異なってS/N劣化が生じることになるため、利得波長特性は、信号帯域内で平坦化していることが必要である。 10

【0024】

図26は反転分布係数 t をパラメータとしたEDFAの利得を示す図である。縦軸は利得係数、横軸は波長 (nm) である。反転分布係数 t が大きいほど (高エネルギー準位に Er^{3+} が多くあるほど)、大きな利得が得られることがわかる。

【0025】

ここで、1540 ~ 1565 nm帯のC-bandを見ると、反転分布係数 t が大きくなる程、利得は、波長に対して右下がりの傾斜となり、 t が小さくなると、右上がりの傾斜となっている。また、 $t = 0.7$ では、利得が最も平坦に近いことがわかる。

【0026】

したがって、反転分布状態を70%程度に制御すれば、利得の平坦性が得られることになり、かつその場合は利得係数も十分高いので、各波長のピークパワーのばらつきを抑えた1540 ~ 1565 nm帯のC-bandの増幅を行うことが可能になる。 20

【0027】

なお、1530 nm帯では、急峻な利得ピークがあるので、1530 nm帯まで波長帯域を広げて使用する場合には、反転分布の制御のみでは平坦な利得特性は得られない。

この領域を平坦化するには、1530 nm帯付近の利得波長特性と相反する利得波長特性 (1530 nm帯付近の利得波長特性と同じ損失波長特性) を持つ利得等化フィルタを、例えば、EDFAの出力段に設けることで、1530 nm帯付近の利得スペクトルを平坦化することになる。 30

【0028】

一方、1570 ~ 1605 nm帯のL-bandを見ると、反転分布係数が $t = 0.4$ のときに、平坦性を得ることができる。したがって、反転分布状態を40%程度に制御すれば、利得の平坦性は得られることになるが、図からわかるように利得も小さくなってしまう (反転分布係数が小さいので、誘導放出時の Er^{3+} の発光強度が小さくなり、十分な利得を得ることができない)。

【0029】

このため、L-band増幅時においては、EDFを長くして (例えば、C-bandのEDFの長さよりも最大80mほど長くする)、増幅媒体中の励起されるべき Er^{3+} の量自体を多くすることで発光強度を上げて、利得を増加させるようにしている。このように、L-band増幅の場合では、長尺EDFを用いることで、 $t = 0.4$ の低反転分布状態であっても、平坦性を実現しつつ、かつ十分な利得を確保するものである。 40

【0030】

なお、C-band及びL-bandの各帯域は、約35nmの増幅帯域を有するため、信号波長を0.8nm (約100GHz) 間隔で立てると、EDFAにおいて、それぞれの帯域で40波以上の波長多重が可能となる。また、EDFAは高出力化についても優れており、200mW以上の光出力パワーを容易に得ることができる。

【0031】

このように、広帯域で光出力パワーの大きなEDFAは、WDM伝送に対しては非常に有効な光増幅器であるが、近年のチャンネル数の増加及び1チャンネル当たりの出力光強度の 50

増大に伴い、非線形効果（非線形光学効果）が顕著に現れるようになってきた。

【0032】

光伝送という非線形とは、ガラス中に比較的強いパワーの光を伝搬させたとき、光強度に応じてガラスの物性（屈折率）が変化する現象のことであり、この現象が生じると、光学的な応答が線形性を失うことになる。

【0033】

光ファイバ中で生じる非線形現象として重要なものに、4光波混合（FWM：Four Wave Mixing）がある。これは、2波長以上の光が入力されたときに、あらたな波長の光が生じる現象である。

【0034】

4光波混合が起きると、あらたに干渉光が発生し、また、干渉光の波長が、多重化された信号光と同じ波長に重なってしまうと、これがクロストークとなって通信品質を劣化させるといった問題があった。

【0035】

光ファイバ伝送路中で生じる4光波混合は、ノイズの発生や波形歪みとなって信号を劣化させる原因となる。特にEDFAによるL-band増幅を行う場合には、長尺EDFを使用することになるので、EDF長が長くなる分、C-bandの増幅時よりも4光波混合による悪影響を受けやすい。

【0036】

このため、特にL-bandの波長帯にまで利得をシフトして、高密度に波長多重したDWDM伝送を高品質で行う場合には、この4光波混合の低減化が必須であり、4光波混合が低減化された光増幅装置の実現が現在強く望まれている。

【0037】

なお、上記の従来技術（特開2004-79876号公報）では、正常分散値を有する光ファイバにより、4光波混合歪みを低減するとしているが、正常分散値の中には負の波長分散値も含まれている。WDMのように複数波長を多重化する伝送で用いるEDFでは、4光波混合が特に顕著に発生しやすく、このようなWDM伝送で使用するEDFに対して、負の波長分散を持つEDFを使用しても、4光波混合が効果的に抑圧できないことが認識されている。

【0038】

本発明はこのような点に鑑みてなされたものであり、4光波混合を効果的に低減して、高品質で信頼性の高い、広帯域・高出力の光増幅を行う光増幅装置を提供することを目的とする。

【0039】

さらに、本発明の他の目的は、4光波混合を効果的に低減して、高品質で信頼性の高い、広帯域・高出力の光増幅を行うための光増幅媒体となる光ファイバを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0040】

本発明では上記課題を解決するために、図1に示すような、光信号を増幅する光増幅装置10において、信号帯域で正の波長分散を持ち、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体となる光ファイバ11と、光ファイバ11に励起光を入射する励起部12と、を有することを特徴とする光増幅装置10が提供される。

【0041】

ここで、光ファイバ11は、信号帯域で正の波長分散を持ち、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体である。励起部12は、光ファイバ11に励起光を入射する。なお、光ファイバ11は、伝搬（増幅）すべき波長の位相不整合性を得るために、増幅すべき信号の周波数である信号周波数と、波長分散が零となる周波数である零分散周波数と、の差が大きくなる光ファイバとして、正の波長分散を有することで、4光波混合の発生を抑圧した光増幅媒体として機能する。

10

20

30

40

50

【発明の効果】

【0042】

本発明の光増幅装置は、光増幅媒体となる光ファイバに対して、信号帯域で正の波長分散を持たせて、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する構成とした。これにより、4光波混合を効果的に抑圧して、広帯域・高出力の光増幅を行うことができるので、WDM伝送の品質及び信頼性の向上を図ることが可能になる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0043】

以下、本発明の実施の形態を図面を参照して説明する。図1は光増幅装置の原理図である。光増幅装置10は、光ファイバ11、励起部12、合波部13から構成され、光信号を増幅する装置である。

10

【0044】

光ファイバ11は、伝搬すべき信号光の信号帯域で正の波長分散を持ち、複数の波長が多重化された波長多重化信号(WDM信号)を増幅する光増幅媒体である。励起部12は、光ファイバ11に励起光を入射する。

【0045】

合波部13は、WDM信号光と励起光を合波し、合波された信号は、光ファイバ11へ入射される。そして、WDM信号光は、光ファイバ11内で励起光により増幅されて、光ファイバ11から出射する。なお、光ファイバ11は、正の波長分散を有することにより、光増幅装置10は、4光波混合(以下、FWMと呼ぶ)の発生を抑圧した光増幅を行う。

20

【0046】

次に光増幅装置10で用いる光増幅媒体(光ファイバ11(EDF))の設計方法について、従来使われていたEDFの特徴、FWMの発生過程、及び本発明のEDFの特徴とその効果等を含めながら段階的に詳しく説明する。なお、以降では、光増幅装置10をEDFAに適用した場合について説明する。

【0047】

通常、光増幅媒体であるEDFは、励起光から信号光への増幅効率を上げるため、通常の伝送路用光ファイバと比較して、モードフィールド径(MFD: Mode Field Diameter)を4.5~5 μm と小さくしている。また、MFDを小さくすると、EDFは負の波長分散特性を持つことになる。最初にこれらのことについて(従来のEDFが負の波長分散を持つことについて)、図2~図6を用いて説明する。

30

【0048】

図2はMFDを示す図である。縦軸は光強度、横軸はコアの直径(コア径)(μm)である。また、図3に光ファイバの構造を示す。光ファイバガラスの屈折率は、コア1aとクラッド1bから構成され、コア1aの屈折率をクラッド1bの屈折率よりも高くすることで、光パワーの大部分をコア1a中に閉じ込めて、光は、コア部分を全反射(反射率100%)して伝播する。

【0049】

MFDとは、このコア1a内を伝搬するシングルモード(コア内を伝搬する光の光路をモードと呼び、コアとクラッドの境界面に対する光の入射角が最大(光ファイバ軸に最も平行)のものをシングルモードと呼ぶ)の断面内における光分布の広がり具合を表す指標である。

40

【0050】

また、図2からわかるように、コア径に対して光強度分布は、ガウシアン形状の曲線となり、コアの中心部が最も光強度が高く、コアの外側に向かう程光強度は落ちてくる。このような曲線に対して、光強度の最大値を1としたときに、コアの中心の最大値1の1/e²(eは自然対数の底(=2.718...))となるところのコア径がMFDとして一般的に定義される。

【0051】

50

MFDが小さいと、コア内の光密度が大きくなり、MFDが大きいとコア内の光密度は小さくなる（すなわち、MFDが小さいと、伝搬すべき光をコア内に閉じ込める力（集光力）が強くなるということ）。

【0052】

また、MFDを決定するパラメータには、コア径と比屈折率差がある。MFDを小さくするためには、コア径は小さくし、比屈折率差は大きくすることになる。なお、比屈折率差とは、コア中心部の最大屈折率と、クラッドの屈折率との差のことで、比屈折率差を、コアの屈折率を n_0 、クラッドの屈折率を n_1 としたときに、 $\Delta n = (n_0 - n_1) / n_1$ と定義される（比屈折率差が大きいと、コアの屈折率がクラッドのそれよりも大きいということなので集光力も大きくなる）。

10

【0053】

図4はMFDをパラメータとしたコア径と比屈折率差との関係を示す図である。縦軸は比屈折率差、横軸はコア径（ μm ）である。光ファイバの屈折率分布をステップインデックスとした場合のMFDが $4.5 \sim 7 \mu\text{m}$ におけるコア径と比屈折率差との関係を示したものである（なお、コア内の屈折率分布が一樣で、光がコア内を階段状に変化して伝搬する光ファイバのタイプをステップインデックス形と呼ぶ。ちなみにコア内の屈折率分布がゆるやかで、光が正弦波状に蛇行してコア中を伝搬するものは、グレーテッドインデックス形と呼ばれる）。

【0054】

図から、コア径を小さくして Δn を上げることで、MFDが小さくなることがわかる。このように、EDFにおいては、MFDを小さくすることで、励起光密度を高めて、コア全体に渡って良好な反転分布を形成させている。

20

【0055】

図5は 1590 nm における波長分散値をパラメータとしたコア径と比屈折率差との関係を示す図である。縦軸は比屈折率差、横軸はコア径（ μm ）である。なお、波長分散とは、波長によって光ファイバを伝搬する光信号の速度が異なる特性を示すものである。

【0056】

波長分散は、波長が 1 nm 異なる2つの単色光を 1 km 伝搬させたときの伝搬遅延時間差、単位は ps/nm/km で定義される。

上述のように、EDFのMFDを小さくするためには、コア径を小さくして Δn を上げることになるので、その場合の波長分散は、図5を見ると、負の波長分散特性を持つことがわかる。

30

【0057】

図6はMFD及び波長分散値をパラメータとしたコア径と比屈折率差との関係を示す図である。縦軸は比屈折率差、横軸はコア径（ μm ）であり、図4と図5を合わせた図である。MFDが $4.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 付近の領域では、波長分散は $-2.5 \sim -5 \text{ ps/nm/km}$ である。これらのことより、従来のEDFは、負の波長分散特性を持つものであった。

【0058】

次にFWMの発生要因について説明する。FWMは、 ω_1 と ω_2 と ω_3 の3波が光ファイバに入射した場合に、3次の非線形分極を介して、あらたな ω_4 の光を発生させる現象であるとして定義される（なお、非線形分極とは、物質に光を照射すると、原子または分子中の電子が光の電場により変位して分極が生じるが、強いレーザ光を照射した場合、この分極が非線形な応答を示し、光の電場の2乗、3乗に比例する2次、3次の非線形な分極を引き起こす。このような分極を非線形分極と呼ぶ）。以下、FWMの発生要因についてより具体的に説明する。

40

【0059】

図7は周波数域のFWM発生の概念図である。励起光の入射前からあった信号光の周波数を ω_s 、入射する励起光の周波数を ω_{p1} 、 ω_{p2} とする（励起光という言葉を使ったが単に他の信号光としてもよい）。FWMは、これら3つの光によって、新しい光が生成される現象である。この新しく生成した干渉光は、アイドラ（idler）光と呼ばれ、アイドラ

50

光の周波数 ω は、式 (1) となる。

【0060】

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 - \omega_s \quad \dots (1)$$

なお、2つの励起光の周波数が等しい場合は ($\omega_1 = \omega_2$)、縮退4光波混合 (DFWM; Degenerated Four Wave Mixing) と呼ばれる。縮退4光波混合では、式 (1) は、 $\omega = 2 \cdot \omega_1 - \omega_s$ となる。

【0061】

また、DFWMは、入力波長が光ファイバの零分散波長 (特定の波長で波形の広がり (波長分散) が最小になるところ) に一致したときに強く発生することが知られている。

図8はDFWMの発生を示す概念図である。光ファイバの長手方向に波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ が流れている場合、伝送過程で $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の位相差がほとんど0に近い状態になると (3つの光の位相がほとんど揃っている状態になると)、DFWMが発生し、波長 λ_i のアイドラ光が発生する。また、 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の光の位相がそれぞれ離れていればDFWMは発生しなくなる。

10

【0062】

すなわち、 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の入力波長が零分散波長に一致すると、各波長の位相が一致することになるので (波長分散とは、各波長における伝搬速度の違いを表すものであり、零分散とは、伝搬速度に差が生じないことを表しているから)、この場合、DFWMが発生することになる。また、波長分散 (波長分散の絶対値) が大きければ、各波長の伝搬速度の差も大きくなって、位相をずらすことができるので、DFWM発生の要因は小さくなる。なお、この伝搬波長の位相整合状態によってDFWMが発生することは、位相整合条件と呼ばれる。

20

【0063】

さらに、DFWMは、非線形光学効果によって発生する現象であるので、光ファイバ中の光強度が大きいほど発生しやすい。したがって、EDFでは増幅効率を上げるために、MFDを小さくすることで、光の実効断面積を小さくしているため、非線形現象が起きやすくなっている (実効断面積を A_{eff} とすると、 $A_{eff} \propto (MFD/2)^2$ であり、実効断面積が小さいと (MFDが小さいと)、コア中の光密度 (光強度) が大きくなって非線形現象が起きやすい)。

30

【0064】

以上説明したように、DFWMの発生は、式 (1) の成立、波長分散に関する位相整合条件、MFDに関する実効断面積に大きく依存する (すなわち、式 (1) を満たし、位相が整合し、光強度が高いとDFWMの発生効率は最大となる)。

【0065】

また、特にL-band増幅のEDFAでは、C-band増幅のEDFAよりも長尺のEDFを使用するために、各波長の位相が整合して式 (1) が成り立つといった状態になる可能性が高く、C-band増幅と比べて、DFWMがより発生しやすくなる。

【0066】

また、アイドラ光の波長が多重化されている信号光と同じ波長に重なってしまうと、クロストークを引き起こして通信品質を劣化させることになる。

40

次に位相整合量と、信号周波数と零分散となる周波数との差 $\Delta\omega$ と、の関係について説明する。上記のDFWMの発生要因から、DFWMの発生を抑圧するためには、信号周波数 ω_s が、零分散となる周波数 ω_0 から離れて、位相整合量が零とはならず大きな値となればよいことがわかる (位相不整合性を持てばよい。すなわち、信号帯域の波長分散の絶対値が大きくなればよい)。

【0067】

ここで、アイドラ光の利得 g は式 (2) で表される。

$$g = \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \dots (2)$$

ここで、 $\chi^{(3)}$ は非線形係数、 P は光のパワー、 $\Delta\omega$ は位相整合量 (伝播定数差) である。また、非線形係数 $\chi^{(3)}$ は、光速 c 、非線形屈折率 n_2 、光の実効断面積 A_{eff} とすると、

50

$$= 2 \cdot n^2 / (c \cdot A_{eff}) \dots (3)$$

で表される。式(2)、式(3)より光の実効断面積 A_{eff} を大きくすると、非線形係数が小さくなるので、式(2)より FWM の利得 g が小さくなるのがわかる。なお、式(2)、式(3)は式を簡素化するために、各パラメータを光の周波数の差を無視した平均値で表している。

【0068】

一方、位相整合量は、伝播定数差として表すことができる。ここで式を簡素化するために、自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) 及び相互位相変調 (XPM: Cross Phase Modulation) による位相変化を無視し、縮退4光波混合 ($\nu_{p1} = \nu_{p2}$) の時を考えると、伝播定数差は、以下の式(4)で表される(なお、SPM、XPMも非線形光学効果によって生じる非線形現象であり、SPMは、1波の伝送で位相シフトを生じる現象であり、XPMは、異なる波長の光が、同時に同一方向に伝送したときに生じる位相シフト現象である)。

【0069】

【数1】

$$\kappa = \Delta\beta = \beta(\nu_s) + \beta(\nu_i) - 2\beta(\nu_{p1})$$

$$= \frac{2\pi c^2}{\nu_0^4} \frac{dD_c}{d\lambda} (\nu_s - \nu_{p1})^2 (\nu_s - \nu_0) \dots (4)$$

ν_0 は、光ファイバの波長分散がゼロとなる周波数であり、 D_c は、光ファイバの波長分散である。したがって、 $dD_c/d\lambda$ は、分散スロープ(波長変化に対する波長分散の変化度合い)となる。

【0070】

式(2)より、FWM利得 g は、位相整合量 $\kappa = 0$ (伝播定数差 $\Delta\beta = 0$) のとき最大となり、 κ の絶対値が大きくなるにつれて、FWM利得 g は小さくなる。また、式(4)より、 κ は、信号周波数 ν_s とゼロ分散となる周波数 ν_0 との差 $\Delta\nu = (\nu_s - \nu_0)$ が大きくなると、 κ は大きくなる。したがって、この周波数差 $\Delta\nu$ を大きくすることにより、FWM利得 g が減少し、アイドラ光が抑圧して、FWMの発生を低減できることがわかる。

【0071】

次に波長分散と κ の関係について説明する。図9は波長分散と κ の関係を示す図である。テーブルT1は、1590nmにおける波長分散 (ps/nm/km)、零分散波長 λ_0 (nm)、零分散波長と信号波長との差 $\Delta\lambda$ (nm)、零分散周波数 ν_0 (THz)、信号周波数 ν_s とゼロ分散周波数 ν_0 との差 $\Delta\nu$ (THz) の項目からなる。信号帯域 $\Delta\lambda$ は 1590nm、分散スロープ (ps/nm²/km) を 0.03 として計算したものである。

【0072】

図10はテーブルT1の内容を示す図である。縦軸は波長分散 (ps/nm/km)、横軸は波長 (nm) とする。直線K1は、テーブルT1の欄aの光ファイバを示している。

直線K1は、信号帯域 $\Delta\lambda$ が 1590nm のとき、波長分散が -20 (ps/nm/km) であり、このときの零分散波長 λ_0 は、2257nm である(直線K1の傾き(分散スロープ)は、0.03 (ps/nm²/km) である)。また、 $\Delta\lambda = 1590 - 2257 = -667$ nm である。

【0073】

そして、零分散周波数 $\nu_0 = c / \lambda_0 = (3 \times 10^8) / (2257 \times 10^{-9}) = 133$ THz であり (c は光速)、 $\Delta\nu = \nu_s - \nu_0 = ((3 \times 10^8) / (1590 \times 10^{-9})) - 133$ THz = 189 THz - 133 THz = 56 THz となる。テーブルT1の他の欄に対しても、このような直線を描くことができる。なお、直線K0は、テーブルT1の欄bの内容を示している。

【0074】

10

20

30

40

50

ここで、テーブル T 1 に戻って を見ると、 が零に近いほど F W M が発生しやすいのだから（位相が整合している）、F W M を抑圧するためには の絶対値が大きい（位相が不整合となる）欄の波長分散を選択することになるが、このとき、波長分散との関係に注目すると、絶対値が同じ波長分散でも、 としては大きく異なることがわかる。

【 0 0 7 5 】

例えば、波長分散が -15 ps/nm/km と $+15 \text{ ps/nm/km}$ のそれぞれの は、 4.5 THz と -8.6 THz であるので、 $+15 \text{ ps/nm/km}$ の方が絶対値で約 2 倍、位相が整合しないことになる。したがって、絶対値が同じ波長分散を考えたときは、正の波長分散を持った E D F の方が、F W M をより大きく抑圧できることがわかる。

10

【 0 0 7 6 】

次に E D F A モデルに対する F W M のクロストークの計算結果について説明する。図 1 1 は E D F A の構成を示す図である。図に示すような E D F A 2 0 を使用して、F W M のクロストーク量を測定する。

【 0 0 7 7 】

E D F A 2 0 は、E D F 2 1、励起 L D (Laser Diode) 2 2 a、2 2 b、合波器 2 3 a、2 3 b から構成される。E D F 長を 60 m とし、信号光の入力として $1580.35 \sim 1597.19 \text{ nm}$ の L-band の波長帯で、 100 GHz 間隔（約 0.8 nm 間隔）で 2 1 波の波長が多重された W D M 信号光を入力する。また、励起 L D 2 2 a、2 2 b は共に $1.47 \mu\text{m}$ の励起光を発生し、励起 L D 2 2 a は、合波器 2 3 a を介して E D F 2 1 に対して前方励起を行い、励起 L D 2 2 b は、合波器 2 3 b を介して E D F 2 1 に対して後方励起を行う。

20

【 0 0 7 8 】

合波器 2 3 a の出力段での E D F 2 1 に対する平均入力パワーは、1 チャンネル当たり -10 dBm である（ -10 dBm/ch ）。また、E D F 2 1 によって増幅された合波器 2 3 b の入力段での平均出力パワーは、1 チャンネル当たり $+10 \text{ dBm}$ である（ $+10 \text{ dBm/ch}$ ）。平均出力パワーの $+10 \text{ dBm/ch}$ は、伝送路で使う一般的なパワーである。

【 0 0 7 9 】

図 1 2 は F W M クロストーク量を示す図である。縦軸はレベル（dBm）、横軸は波長（nm）である。なお、信号光入力は、各波長での信号光出力レベルが等しくなるように、プリアンファシス（波長に対する入力レベルへの偏差付加）を行っている。

30

【 0 0 8 0 】

曲線 K 1 1 は、図 1 1 の P 1 点における、信号光入力 2 1 波の各波長のレベルをプロットしたものである。曲線 K 1 2 は、図 1 1 の P 2 点における、信号光出力 2 1 波の各波長のレベルをプロットしたものである。曲線 K 1 3 は、図 1 1 の P 2 点における、2 1 波の各波長の F W M 発生量レベルをプロットしたものである（2 1 波に対応して発生するアイドラ光のレベルをプロットしたものである）。

【 0 0 8 1 】

また、F W M クロストーク（dB）は、F W M 発生量（dBm）と信号光出力（dBm）との差として定義する（F W M クロストーク（dB）= F W M 発生量（dBm）- 信号光出力（dBm））。

40

【 0 0 8 2 】

図 1 3 は実効断面積をパラメータとした F W M クロストークと波長分散との関係を示す図である。縦軸は F W M クロストーク（dB）、横軸は波長分散（ps/nm/km）である。実効断面積 $A_{\text{eff}} \times (M F D / 2)^2$ として、 $A_{\text{eff}} = 19.6 \mu\text{m}^2$ （ $M F D = 5.0 \mu\text{m}$ ）、 $23.8 \mu\text{m}^2$ （ $M F D = 5.5 \mu\text{m}$ ）、 $28.3 \mu\text{m}^2$ （ $M F D = 6.0 \mu\text{m}$ ）における波長分散を $-30 \sim +20 \text{ ps/nm/km}$ に変化させて計算したものである（分散スロープは $0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 、非線形屈折率は $3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 、E D F 長を 60 m として計算した）。

【 0 0 8 3 】

50

実効断面積 (MFD) が大きくなると FWM クロストークが小さくなるのがわかる。また、波長分散の絶対値が同じでも、正の波長分散の方が、FWM クロストークが小さくなるのがわかる。例えば、 -10 ps/nm/km と $+10 \text{ ps/nm/km}$ を比較すると、 $+10 \text{ ps/nm/km}$ の方がおよそ 1.8 dB だけ、FWM クロストークが小さい。

【0084】

ここで、 d の絶対値が大きければ、FWM 発生を抑圧できることになるので、図 9 のテーブル T1 から、波長分散の絶対値が大きくなるほど、 d の絶対値も大きくなることから、絶対値が大きい負の符号の波長分散を EDF に対して選択すれば、一見、正の符号の波長分散を持つことに拘る必要はないように見える。

【0085】

しかし、図 13 に対して、例えば、絶対値が大きい負の符号の波長分散として -30 ps/nm/km 、正の符号の波長分散として $+15 \text{ ps/nm/km}$ について考えると、それぞれの FWM クロストークを比較した場合、 $+15 \text{ ps/nm/km}$ の FWM クロストークの方が、 -30 ps/nm/km の FWM クロストークよりも 1.0 dB 程小さいことがわかる。

【0086】

すなわち、FWM の抑制のために、単純に d の絶対値が大きくなる波長分散として、絶対値が大きい負の符号の波長分散 (d とする) を選択するのではなく、 d よりも正の符号の波長分散を選択した方が (絶対値はある程度小さくても正の符号の波長分散を選択した方が)、FWM クロストーク量の低減化には有効であることがわかる。

【0087】

このことは、波長分散の絶対値が同じなら、正の波長分散の方が FWM クロストークをより低減化させることを意味し、また特に正の波長分散を持つ光ファイバ上においては、周波数領域で位相が整合しないことを示すものである。

【0088】

さらにまた、 -30 ps/nm/km の負の波長分散を持つ光ファイバを生成しようとするとき、コア径を小さくし、比屈折率差 Δn を上げる必要があるため、MFD が小さくなり、逆に FWM が発生しやすい構造になるといった不都合が生じてしまう。

【0089】

これに対し、正の波長分散を持った光ファイバは、比屈折率差 Δn をそれほど大きくせずに生成できるので製造しやすく (正の波長分散を持つ光ファイバの構造は、コア径が大きく、比屈折率差が小さいので、負の波長分散の光ファイバと比べると、MFD はある程度大きくなり、負の波長分散の光ファイバよりも一般的に製造しやすい)、これらのことを考慮しても、正の波長分散をもった EDF の方が、FWM の低減化には有利であることがわかる。

【0090】

ここで、図 11 で示した EDF A20 に対し、FWM クロストークを低減した EDF A として構成しようとするならば、EDF 21 に対して、例えば、 $A_{\text{eff}} = 28.3 \mu\text{m}^2$ ($MFD = 6.0 \mu\text{m}$) とし、波長分散を $+15 \text{ ps/nm/km}$ とすれば、FWM クロストークはおよそ -43 dB と低減することができる。

【0091】

次に EDF に対して、さらに他のパラメータについて検討する。上記の説明で、FWM クロストークの低減化に必要な特性として、正の波長分散が有効であることがわかったが、さらに EDF の特性を決定づける他のパラメータとして、カットオフ波長と曲げ損失についても考慮する。

【0092】

図 14 はカットオフ波長をパラメータとした比屈折率差とコア径との関係を示す図である。縦軸は比屈折率差 Δn 、横軸はコア径 (μm) である。カットオフ波長とは、ある波長より長い波長ではシングルモードとなる波長のことである。シングルモード光ファイバは、モード分散 (光が伝播するそれぞれの光路 (モード) 毎に伝播時間が異なること) を持たないという特徴を有している (現在生産されている光ファイバのほとんどはシングルモ

10

20

30

40

50

ード光ファイバである)。

【0093】

図の見方として、カットオフ波長が $1.5\ \mu\text{m}$ の曲線K21に対し、曲線K21の左領域では、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯以上の波長はシングルモードで伝搬可能であることを示している。また、図の場合、 $0.9\ \mu\text{m}$ のカットオフ波長の曲線K22の左領域では、 $0.9\ \mu\text{m}$ 以上(励起光の $0.98\ \mu\text{m}$ が含まれる)の波長がシングルモードで伝搬可能となる。したがって、カットオフ波長が小さいほど、信号帯域の長波長側を(広帯域の信号を)シングルモードで伝搬することが可能になる。

【0094】

したがって、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の信号光をシングルモードで伝搬するには、曲線K21の左領域にあるコア径と比屈折率差を選択することになり、例えば、コア径 $5.0\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差 1.2 などとすればよい。

10

【0095】

図15は曲げ損失をパラメータとした比屈折率差とコア径との関係を示す図である。縦軸は比屈折率差、横軸はコア径(μm)である。曲げ損失とは、光ファイバの曲がり具合によって、軸方向へ進むべき伝播モードが、放射モードに変換される光損失量を表すものである(すなわち、光ファイバは小さく丸めるほど、コア内に光を閉じ込める力がなくなって、クラッド側へ光が放出して伝搬力がなくなるとのこと)。例えば、曲げ損失が $0.01\ \text{dB/m}@20\ \text{mm}$ とは、光ファイバを $20\ \text{mm}$ で巻いたとき、 $1\ \text{m}$ 当たりの光損失量が $0.01\ \text{dB}$ であることを示す。

20

【0096】

図の見方として、曲げ損失が $0.01\ \text{dB/m}@20\ \text{mm}$ の曲線K31に対し、光ファイバを $20\ \text{mm}$ で巻いたとき、曲線K31の右領域において、 $0.01\ \text{dB}$ 以下の光損失となることを示している。また、曲線K32は、光ファイバを $40\ \text{mm}$ で巻いたとき、曲線K32の右領域において、 $0.01\ \text{dB}$ 以下の光損失となることを示している(曲線K32は $40\ \text{mm}$ であり、 $20\ \text{mm}$ よりもゆるやかに巻いているので、光損失量が $0.01\ \text{dB}$ 以下となる比屈折率差とコア径の許容範囲が、曲線K31よりも広がっている)。

【0097】

したがって、 $20\ \text{mm}$ で光損失量を $0.01\ \text{dB}$ 以下とするには、例えば、コア径 $5.0\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差 0.8 などとすればよい。

30

図16はFWMクロストークを低減するためのEDFのコア径と比屈折率差との関係を示す図である。縦軸は比屈折率差、横軸はコア径(μm)である。図中、パラメータとして、MFD、波長分散、カットオフ波長、曲げ損失が示されている。

【0098】

ここで、FWMクロストーク低減のための波長分散を Dps/nm/km として、Dの範囲を $+5\ \text{D} + 15$ とし($+5\ \text{ps/nm/km}$ の曲線をD1、 $+15\ \text{ps/nm/km}$ の曲線をD2とする)、カットオフ波長 $c = 1.5\ \mu\text{m}$ の曲線Aの左領域と、曲げ損失が $0.01\ \text{dBm}$ よりも小さくなる曲線Bの右領域で囲まれる領域は図の斜線範囲となる(なお、正の波長分散として、 $+5\ \text{D} + 15$ の範囲としたのは、この範囲の波長分散が一般的に製造しやすいものだからである)。

40

【0099】

したがって、この斜線範囲内のコア径、比屈折率差の値を持つEDFを選択すれば、適切な正の波長分散値を持つことになって、FWMクロストークが低減化され、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯のシングルモード伝搬可能で、 $20\ \text{mm}$ でも光損失が $0.01\ \text{dB}$ 程度のEDFを実現することが可能になる。

【0100】

斜線範囲内から、EDFのコア径の最適範囲は、 $3.9\ \mu\text{m} \sim 6.3\ \mu\text{m}$ であり、比屈折率差の最適範囲は $0.6 \sim 2.0$ であり、波長分散の最適範囲は、 $+5\ \text{ps/nm/km} \sim +15\ \text{ps/nm/km}$ となる。

【0101】

50

このようにして設計されたEDFを用いてWDM信号を増幅することで、FWMクロストークを低減化した広帯域・高出力の光増幅を行うことができ、WDM伝送の品質及び信頼性の向上を図ることが可能になる。

【0102】

また、L-bandの波長帯まで広げた光増幅を行うEDFAでは、長尺のEDFを用いるので、C-band増幅よりもFWMクロストークが発生しやすかったが、上述の内容で設計したEDFを用いることで、長尺のEDFであっても、FWMクロストークを効果的に低減することが可能になる。

【0103】

なお、図16で示した斜線領域を従来のEDFの特性を示す図6と比較すると、従来と比べて、明らかに異なる領域の特性でEDFの各パラメータを決定付けることになり、本発明のEDFは、従来のEDFと比べて大きく特性が異なるものであることがわかる。

10

【0104】

次に上記で説明したEDFの特徴を持つEDFAの構成について説明する。図17はEDFAの構成を示す図である。EDFA10-1は、EDF11、励起LD12a、12b、合波器13a、13b、光アイソレータ14a、14bから構成される。

【0105】

なお、EDF11は、コア径の値を3.9 μ m~6.3 μ mの中から選択し、比屈折率差の値を0.6~2.0の中から選択し、波長分散を+5ps/nm/km~+15ps/nm/kmの中から選択して製造した光ファイバである。

20

【0106】

EDFA10-1は、例えば、EDFを長尺とし、信号光の入力としてL-bandのWDM信号光を入力する。なお、入力WDM信号光は、光アイソレータ14aを通過して、EDF11へ向かって流れる。光アイソレータとは、図の矢印方向にのみ光を通し、逆方向には光を通さないデバイスである。

【0107】

また、励起LD12a、12bは共に励起光を発出し、励起LD12aは、合波器13aを介して、EDF11に対して前方励起を行い、励起LD12bは、合波器13bを介して、EDF11に対して後方励起を行う。そして、増幅後のWDM信号光は、光アイソレータ14bを通じて出射される。

30

【0108】

図18はEDFAの構成を示す図である。EDFA10-2は、EDF11a、11b、励起LD12a、12b、12c、合波器13a、13b、13c、光アイソレータ14a、14b、14cから構成される。

【0109】

EDFA10-2は、EDF11a、11bを直列に配置した構成をとる。励起LD12aは、合波器13aを介して、前段のEDF11aに対して前方励起を行う。また、励起LD12bは、合波器13bを介して、後段のEDF11bに対して前方励起を行い、励起LD12cは、合波器13cを介して、後段のEDF11bに対して後方励起を行う。

40

【0110】

前段のEDF11aは、後段EDF11bより信号入力パワーが低い光増幅を行い、後段のEDF11bへは、前段のEDF11で増幅された信号を更に増幅する為、EDF11aより、高い出力パワーの光増幅を行っている。このため、後段のEDF11bに光強度が高い励起光が入射されるので、EDF11bにおいて非線形現象が発生しやすくなる。

【0111】

したがって、後段のEDF11bに対して、コア径の値を3.9 μ m~6.3 μ mの中から選択し、比屈折率差の値を0.6~2.0の中から選択し、波長分散を+5ps/nm/km~+15ps/nm/kmの中から選択して製造し、FWMの低減化を図ることになる(図18の例

50

では、EDFを2段直列に配置した構成としたが、3段以上の直列配置にしても構わない。その場合、最も光強度が高い励起光が入射されるEDFが、最も後段のEDFならば、そのEDFに対して正の波長分散を持たせることになる)。

【0112】

なお、上記では、FWMクロストークの低減化を図った光増幅媒体として、Er³⁺が添加されたEDFを中心にして、光増幅装置及び設計方法について説明したが、近年では、光ファイバのホストガラスをシリカファイバからフッ化物ファイバに変えたEDFF(Erbium-Doped Fluoride Fiber)や、テルライトガラスを用いたEDTF(Erbium-Doped Tellurite Fiber)が開発されており、これらEDFFやEDTFに対しても、上記で説明した設計方針で正の波長分散を持たせることで、FWMの発生を抑圧することが可能である。

10

【0113】

また、1400nm帯をカバーする誘導放出型の光増幅器として、Tm(ツリウム)を用いたTDFAThulium-Doped Fiber Amplifier)が開発されており、このようなTDFATに対して、上記で説明した設計方針で正の波長分散を持たせることで、FWMの発生を抑圧することが可能である。

【0114】

(付記1) 光信号を増幅する光増幅装置において、信号帯域で正の波長分散を持ち、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体となる光ファイバと、前記光ファイバに励起光を入射する励起部と、を有することを特徴とする光増幅装置。

20

【0115】

(付記2) 前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、波長分散が+5ps/nm/km以上かつ+15ps/nm/km以下であることを特徴とする付記1記載の光増幅装置。

【0116】

(付記3) 前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、コア径が3.9μm以上かつ6.3μm以下であり、比屈折率差が0.6以上かつ2.0以下であることを特徴とする付記2記載の光増幅装置。

30

【0117】

(付記4) 前記光ファイバは、少なくとも2つ以上を直列に配置した構成であり、光強度が高い励起光が入射される側が、信号帯域で正の波長分散を持つことを特徴とする付記2記載の光増幅装置。

【0118】

(付記5) 前記光ファイバは、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体であり、希土類が添加されて、少なくとも1つの信号で正の波長分散を持ち、前記励起部は、前記光ファイバに励起光を入射して、1570~1605nmの光信号を増幅することを特徴とする付記1記載の光増幅装置。

【0119】

(付記6) 前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、波長分散が+5ps/nm/km以上かつ+15ps/nm/km以下であることを特徴とする付記5記載の光増幅装置。

40

【0120】

(付記7) 複数の波長が多重化された光信号を増幅する光ファイバにおいて、信号帯域で正の波長分散を有することを特徴とする光ファイバ。

(付記8) 前記光ファイバは、波長分散が+5ps/nm/km以上かつ+15ps/nm/km以下であることを特徴とする付記7記載の光ファイバ。

【0121】

(付記9) 前記光ファイバは、コア径が3.9μm以上かつ6.3μm以下であり、比

50

屈折率差が 0.6 以上かつ 2.0 以下であることを特徴とする付記 8 記載の光ファイバ。

(付記 10) 光信号の増幅を行う光増幅媒体を設計する光増幅媒体設計方法において

、
励起光によって、複数の波長が多重化された波長多重化信号を増幅する光増幅媒体となる光ファイバに対し、

伝搬すべき波長の位相不整合性を得るために、増幅すべき信号の周波数である信号周波数と、波長分散が零となる周波数である零分散周波数と、の差が大きくなる信号帯域内の波長分散として、正の波長分散を選択し、

前記光ファイバのコア径と比屈折率差とが、カットオフ波長が信号帯域よりも小さく、かつ曲げ損失が一定値以下となる範囲を求め、

10

前記範囲内で、さらに正の波長分散となる条件を満たす条件範囲を求め、

前記条件範囲内で、コア径、比屈折率差及び波長分散を決定して、4 光波混合の発生を抑圧した光増幅媒体を設計することを特徴とする光増幅媒体設計方法。

【0122】

(付記 11) 前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、波長分散が +5 ps/nm/km 以上かつ +15 ps/nm/km 以下であることを特徴とする付記 10 記載の光増幅媒体設計方法。

【0123】

(付記 12) 前記光ファイバは、前記波長多重化信号の光増幅媒体として、コア径が 3.9 μm 以上かつ 6.3 μm 以下であり、比屈折率差が 0.6 以上かつ 2.0 以下であることを特徴とする付記 11 記載の光増幅媒体設計方法。

20

【図面の簡単な説明】

【0124】

【図 1】光増幅装置の原理図である。

【図 2】MFD を示す図である。

【図 3】光ファイバの構造を示す図である。

【図 4】MFD をパラメータとしたコア径と比屈折率差との関係を示す図である。

【図 5】1590 nm における波長分散値をパラメータとしたコア径と比屈折率差との関係を示す図である。

【図 6】MFD 及び波長分散値をパラメータとしたコア径と比屈折率差との関係を示す図である。

30

【図 7】周波数域の FWM 発生の概念図である。

【図 8】FWM の発生を示す概念図である。

【図 9】波長分散と の関係を示す図である。

【図 10】テーブルの内容を示す図である。

【図 11】EDFA の構成を示す図である。

【図 12】FWM クロストーク量を示す図である。

【図 13】実効断面積をパラメータとした FWM クロストークと波長分散との関係を示す図である。

【図 14】カットオフ波長をパラメータとした比屈折率差とコア径との関係を示す図である。

40

【図 15】曲げ損失をパラメータとした比屈折率差とコア径との関係を示す図である。

【図 16】FWM クロストークを低減するための EDF のコア径と比屈折率差との関係を示す図である。

【図 17】EDFA の構成を示す図である。

【図 18】EDFA の構成を示す図である。

【図 19】エネルギー準位を示す図である。

【図 20】吸収を示す図である。

【図 21】自然放出を示す図である。

【図 22】誘導放出を示す図である。

50

【図23】 2準位系の電子密度の分布状態を示す図である。

【図24】 2準位系の電子密度の分布状態を示す図である。

【図25】 3準位系での反転分布を示す図である。

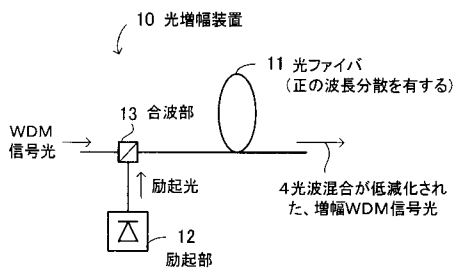
【図26】 反転分布係数をパラメータとしたEDFAの利得を示す図である。

【符号の説明】

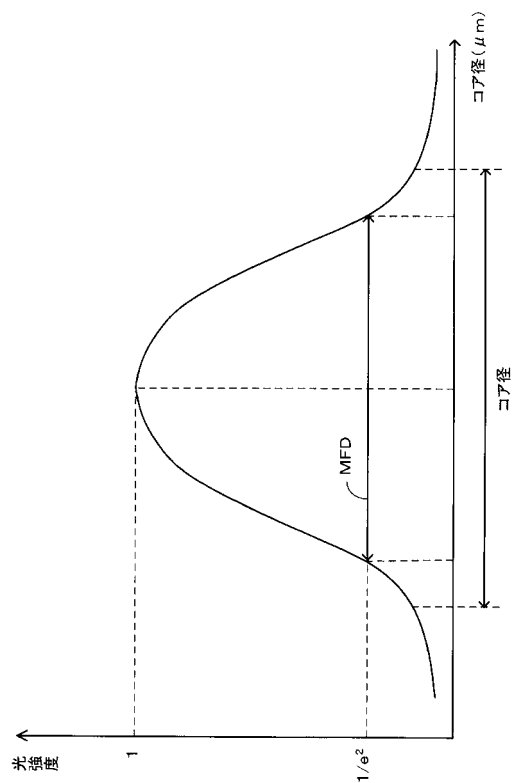
【0125】

- 10 光増幅装置
- 11 光ファイバ
- 12 励起部
- 13 合波部

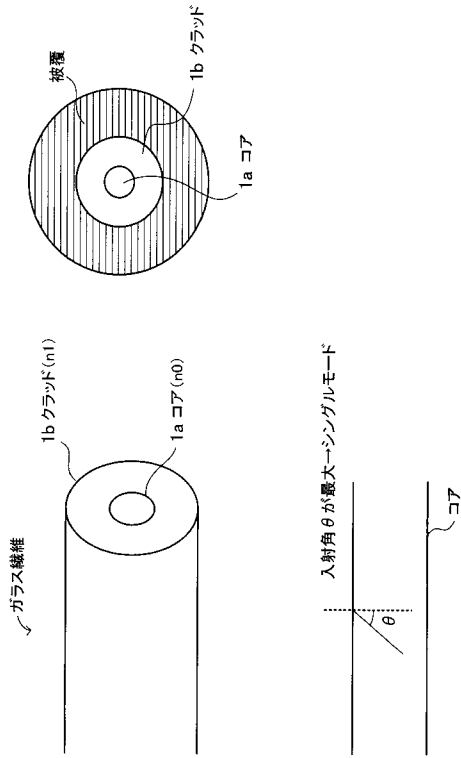
【図1】



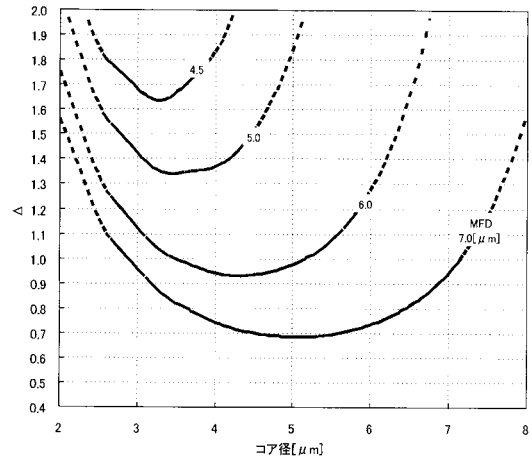
【図2】



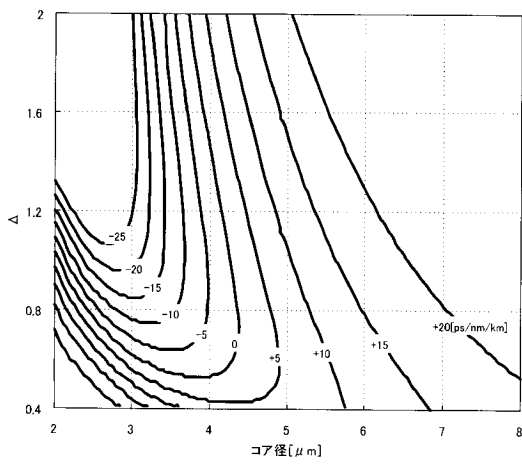
【 図 3 】



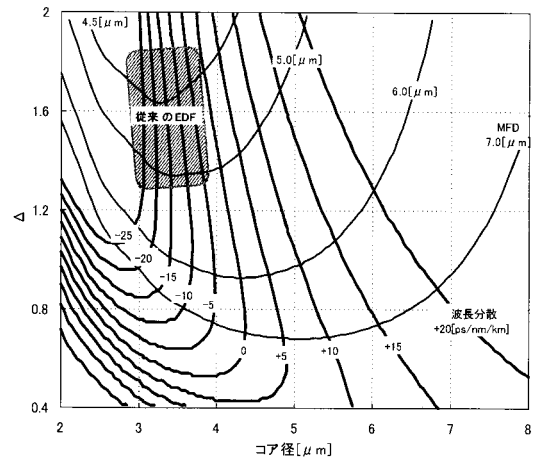
【 図 4 】



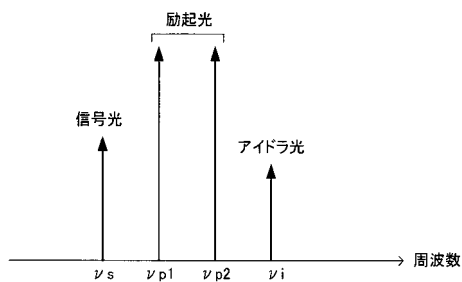
【 図 5 】



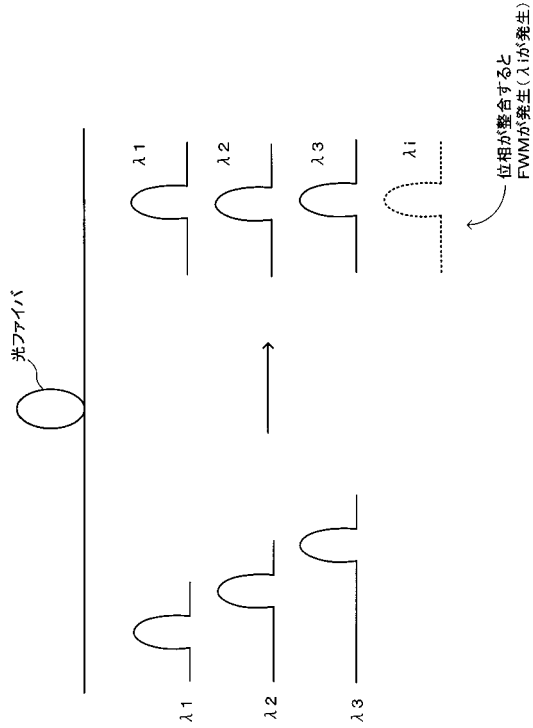
【 図 6 】



【 図 7 】



【図 8】



【図 9】

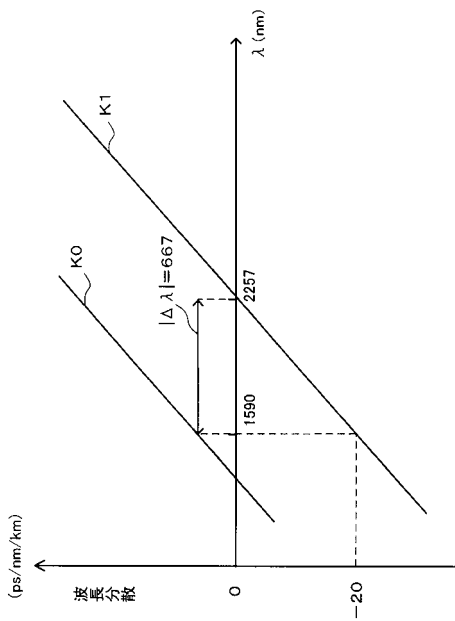
T1 テーブル

(信号波長 $\lambda_s=1590\text{nm}$ 、信号周波数 $\nu_s=189\text{THz}$ のとき)

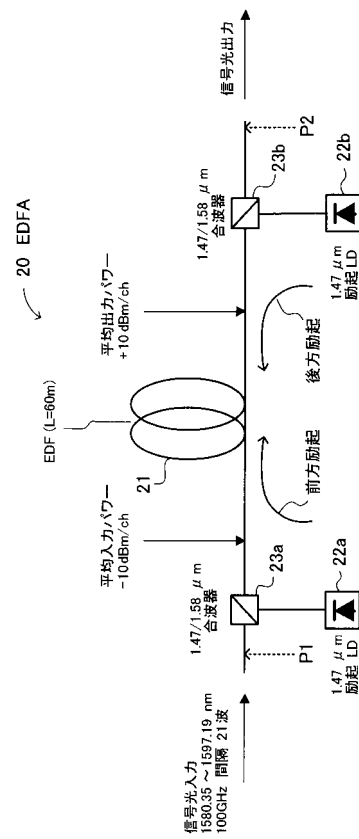
波長分散 [ps/nm/km]	λ_0 [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	ν_0 [THz]	$\Delta\nu$ [THz]
a	-20	2257	-667	133
	-15	2090	-500	143
	-10	1923	-333	156
	-5	1757	-167	171
b	0	信号波長 1590	0	189
	5	1423	167	211
	10	1257	333	239
	15	1090	500	275
	20	923	667	325

* 分散スロープ: 0.03 [ps/nm²/km]

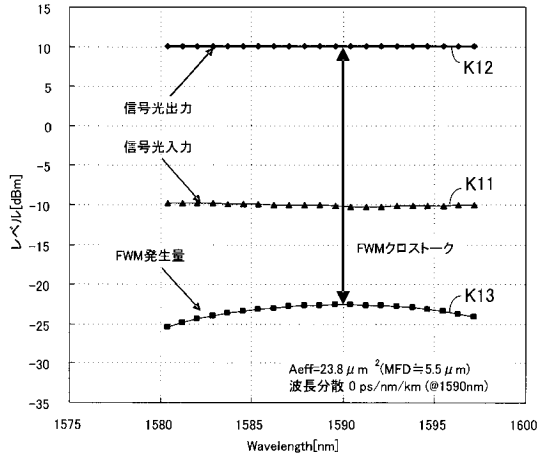
【図 10】



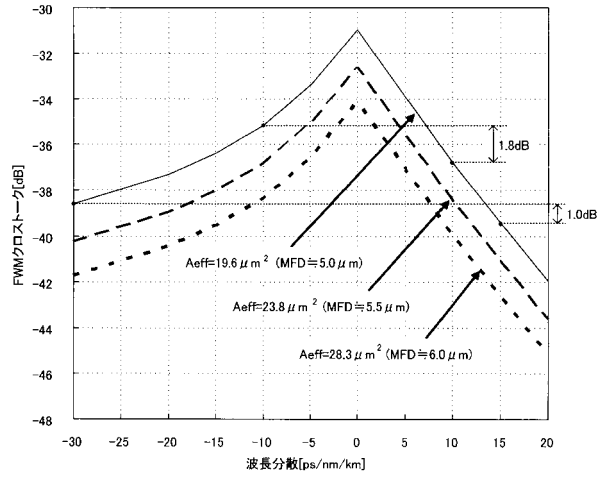
【図 11】



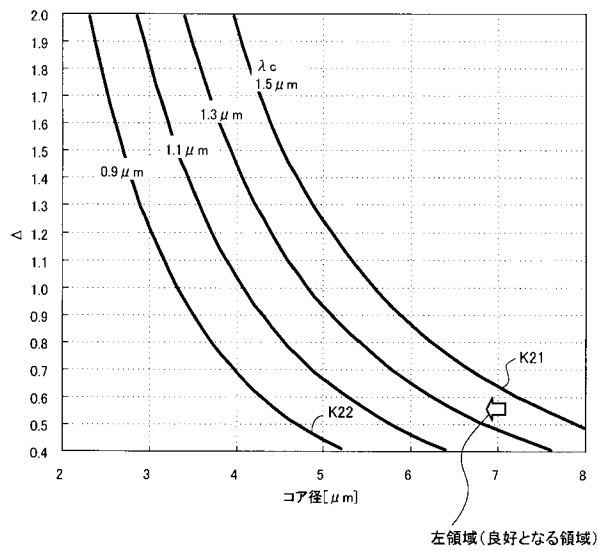
【図 1 2】



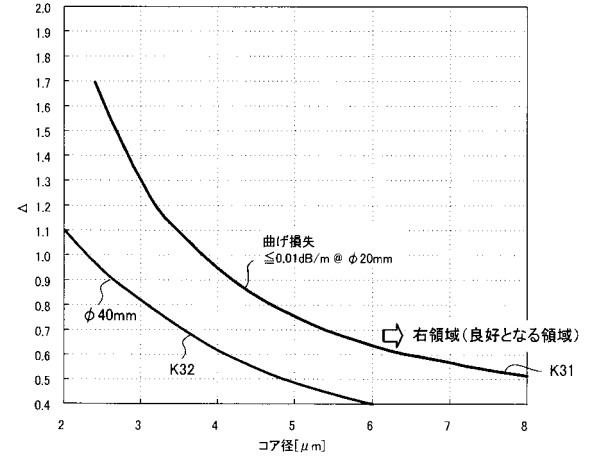
【図 1 3】



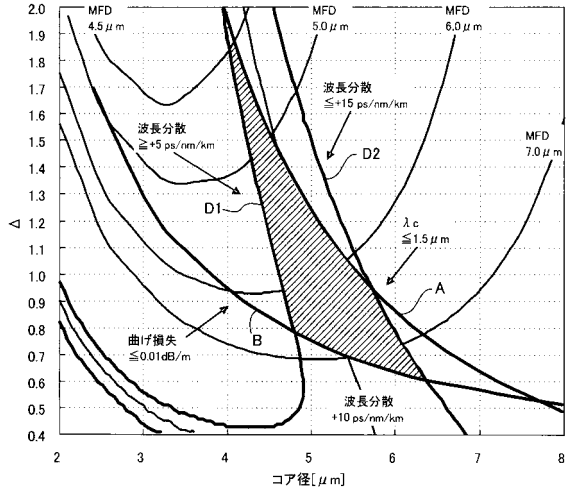
【図 1 4】



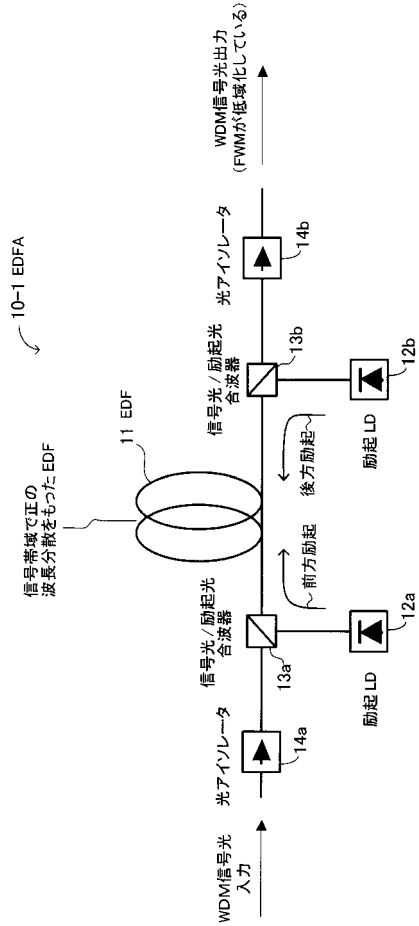
【図 1 5】



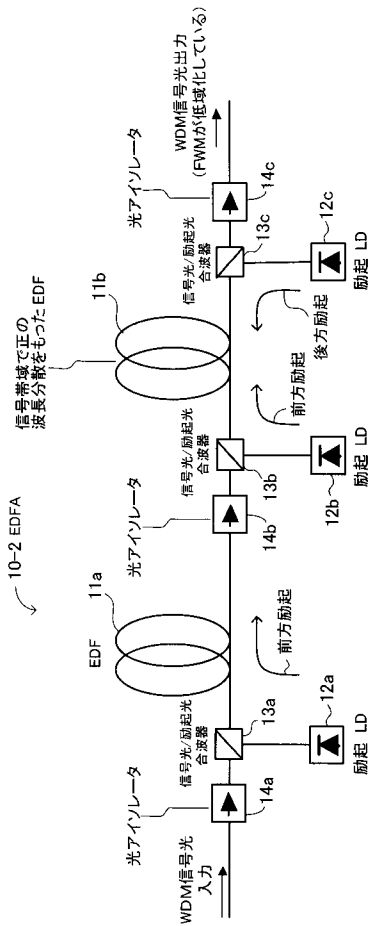
【 図 1 6 】



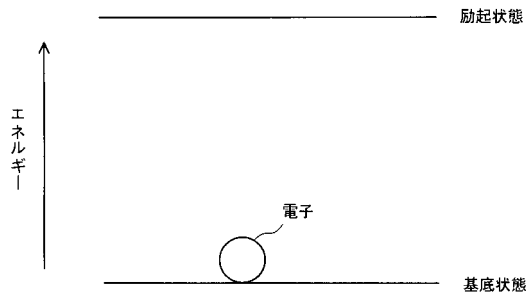
【 図 1 7 】



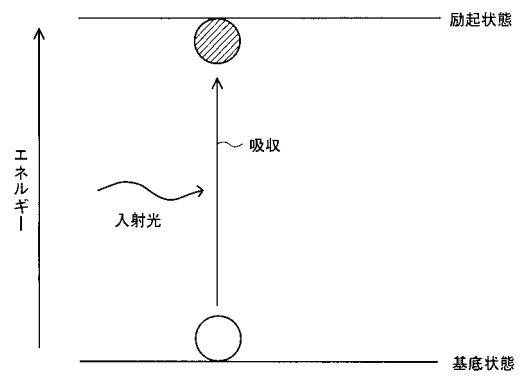
【 図 1 8 】



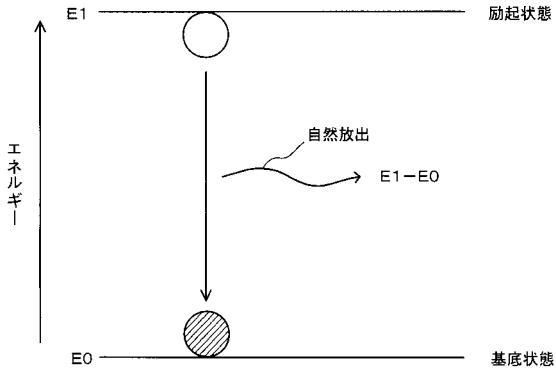
【 図 1 9 】



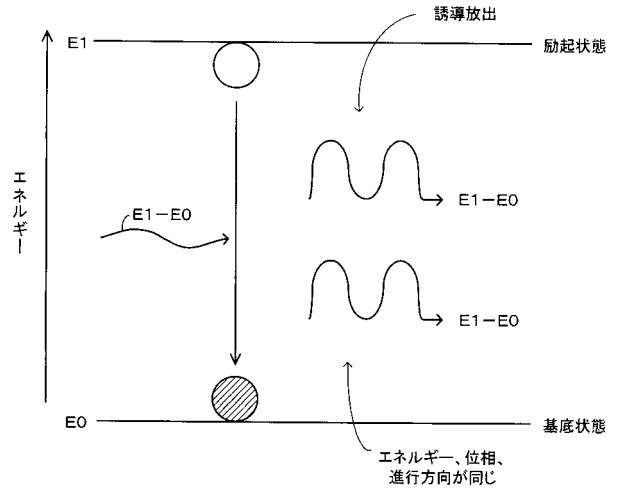
【 図 2 0 】



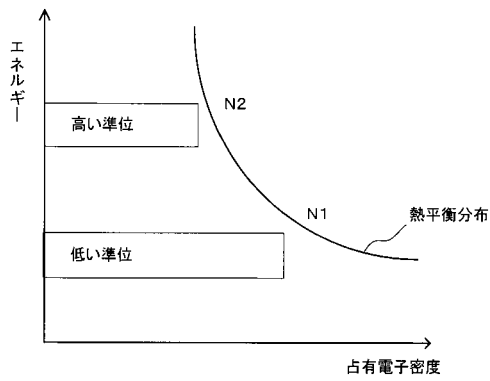
【図 2 1】



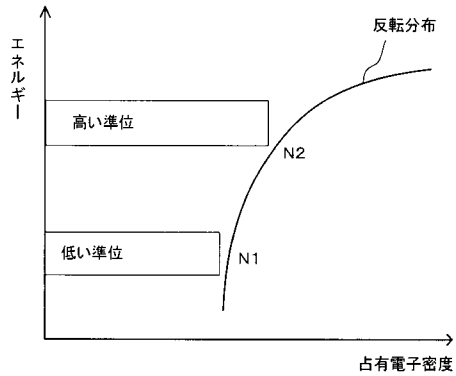
【図 2 2】



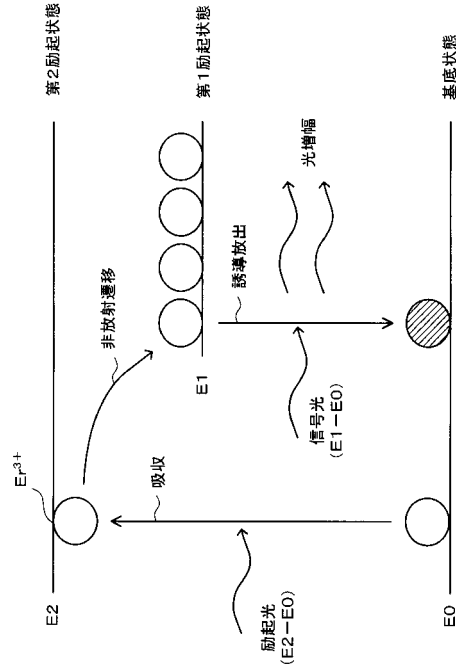
【図 2 3】



【図 2 4】



【図 2 5】



【図 26】

