

(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2017-111458

(P2017-111458A)

(43) 公開日 平成29年6月22日(2017.6.22)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO2B 6/036 (2006.01)	GO2B 6/036	2H150
GO2B 6/02 (2006.01)	GO2B 6/02 411	5F172
HO1S 3/10 (2006.01)	HO1S 3/10 D	
	HO1S 3/10 Z	

審査請求 有 請求項の数 10 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2017-17617 (P2017-17617)  
 (22) 出願日 平成29年2月2日(2017.2.2)  
 (62) 分割の表示 特願2014-34751 (P2014-34751) の分割  
 原出願日 平成21年7月7日(2009.7.7)  
 (31) 優先権主張番号 61/078,589  
 (32) 優先日 平成20年7月7日(2008.7.7)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)  
 (31) 優先権主張番号 12/329,561  
 (32) 優先日 平成20年12月6日(2008.12.6)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 509094034  
 オーエフエス ファイテル, エルエルシー  
 アメリカ合衆国 30071 ジョージア,  
 ノアクロス, ノースイースト エクスプレ  
 スウェイ 2000  
 (74) 代理人 100094112  
 弁理士 岡部 譲  
 (72) 発明者 ラース グルナー-ニールセン  
 アメリカ合衆国 デーケー-2700, ブ  
 ロンショイ, アヴェンディンゲン 22エ  
 ー

Fターム(参考) 2H150 AB04 AB05 AB08 AB10 AC38  
 AD05 AD12 AD17 AD18 AD22  
 AE03 AE11 AE28 AH31 AH32  
 AH50  
 5F172 AM08 NN17 NR12

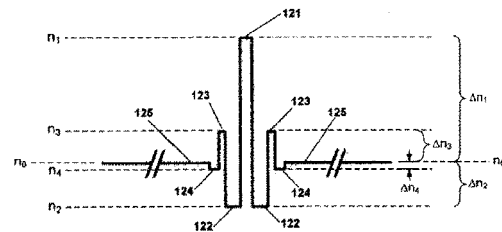
(54) 【発明の名称】 ファイバ伸張器およびモジュール

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】増幅器ファイバの分散勾配の整合、および非線形性の複雑なバランスの調整を容易にするファイバ伸張器、およびその製造方法を提供する。

【解決手段】ファイバ伸張器はコア領域121、内側の溝領域122、環状領域123、外側の溝領域124、および外側のクラッド領域125を含む。コア領域は屈折率 $n_1$ 、屈折率が $n_0$ である外側のクラッド領域について正の有効屈折率差 $\Delta n_1$ を有し、内側の溝領域はコア領域を取り囲み、屈折率 $n_2$ 、負の有効屈折率差 $\Delta n_2$ を有する。環状領域は溝領域を取り囲み、 $n_3$ 、正の有効屈折率差 $\Delta n_3$ を有し、外側の溝領域は環状領域を取り囲み、屈折率 $n_4$ 、負の有効屈折率差 $\Delta n_4$ を有する。各部位の外側半径、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ の値がファイバに負の分散を持たせ、かつ選択された動作波長帯の中の特定の波長において $0.005 \text{ nm}^{-1}$ よりも大きい相対分散勾配を持たせる。

【選択図】図6



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

ファイバ伸張器と該ファイバ伸張器に接合した第二のファイバとからなる、パルス増幅システムに用いられる伸張モジュールであって、該伸張モジュールが、

半径  $r_1$ 、屈折率  $n_1$ 、及び外側の半径  $r_0$  と屈折率  $n_0$  とを有する外側のクラッド領域に対して  $n_1 - n_0$  に等しい正の有効屈折率差  $n_1$  を有するコア領域、

外側の半径  $r_2$ 、 $n_0$  よりも小さい屈折率  $n_2$ 、および  $n_2 - n_0$  に等しい負の有効屈折率差  $n_2$  を有する、前記コア領域を取り囲む内側の溝領域、

外側の半径  $r_3$ 、 $n_0$  よりも大きい屈折率  $n_3$ 、および  $n_3 - n_0$  に等しい正の有効屈折率差  $n_3$  を有する、前記内側の溝領域を取り囲む環状領域、および、

外側の半径  $r_4$ 、 $n_0$  よりも小さい屈折率  $n_4$ 、および  $n_4 - n_0$  に等しい負の有効屈折率差  $n_4$  を有する、前記環状領域を取り囲む外側の溝領域を含み、

前記外側のクラッド領域は前記外側の溝領域を取り囲み、そして、

値  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、および  $n_4$  が、負の分散と、選択された動作波長帯内の特定の波長において  $0.005 \text{ nm}^{-1}$  よりも大きい相対分散勾配とを、該ファイバ伸張器に持たせるように選択されており、

該第二のファイバは、分散及び相対分散勾配の少なくとも一つが該ファイバ伸張器とは異なり、該ファイバ伸張器及び該第二のファイバのそれぞれの長さを調整することで、該ファイバ伸張器と該第二のファイバとを合わせた総分散及び総相対分散勾配が、選択された圧縮器ユニットの分散及び相対分散勾配に整合することができることを特徴とする伸張モジュール。

## 【請求項 2】

前記選択された動作波長帯は  $1000$  および  $1100 \text{ nm}$  の間であることを特徴とする請求項 1 に記載の伸張モジュール。

## 【請求項 3】

前記選択された動作波長帯以下にカットオフ波長を有することを特徴とする請求項 1 に記載の伸張モジュール。

## 【請求項 4】

前記第二のファイバは、前記動作波長帯以下にカットオフ波長を有するシングルモードファイバであり、前記ファイバ伸張器は、該シングルモードファイバと  $0.5 \text{ dB}$  よりも小さい接合損失で接合可能であることを特徴とする請求項 1 に記載の伸張モジュール。

## 【請求項 5】

$$r_1 = 0.98 \mu\text{m}$$

$$r_2 = 3.94 \mu\text{m}、$$

$$r_3 = 5.32 \mu\text{m}、$$

$$r_4 = 7.08 \mu\text{m}、$$

$$r_0 = 62.50 \mu\text{m}、$$

$$n_1 = 21.9 \times 10^{-3}、$$

$$n_2 = -8.9 \times 10^{-3}、$$

$$n_3 = 6.8 \times 10^{-3}、および$$

$$n_4 = -1.0 \times 10^{-3}$$

であることを特徴とする請求項 1 に記載の伸張モジュール。

## 【請求項 6】

前記伸張モジュールが前記ファイバ伸張器の相対分散勾配よりも大きい相対分散勾配を有するよう、前記第二のファイバがゼロよりも大きい分散とゼロよりも小さい相対分散勾配とを有することを特徴とする請求項 1 に記載の伸張モジュール。

## 【請求項 7】

前記伸張モジュールが前記ファイバ伸張器の相対分散勾配よりも小さい相対分散勾配を有するよう、前記第二のファイバがゼロよりも小さい分散とゼロよりも小さい相対分散勾配とを有することを特徴とする請求項 1 に記載の伸張モジュール。

## 【請求項 8】

パルス増幅システムにおいて使用される伸張モジュールを組み立てる方法であって、

(a) ファイバ伸張器を用意し、該ファイバ伸張器は、

半径  $r_1$ 、屈折率  $n_1$ 、及び外側の半径  $r_0$  と屈折率  $n_0$  とを有する外側のクラッド領域に対して  $n_1 - n_0$  に等しい正の有効屈折率差  $n_1$  を有するコア領域、

外側の半径  $r_2$ 、 $n_0$  よりも小さい屈折率  $n_2$ 、および  $n_2 - n_0$  に等しい負の有効屈折率差  $n_2$  を有する、前記コア領域を取り囲む内側の溝領域、

外側の半径  $r_3$ 、 $n_0$  よりも大きい屈折率  $n_3$ 、および  $n_3 - n_0$  に等しい正の有効屈折率差  $n_3$  を有する、前記内側の溝領域を取り囲む環状領域、および、

外側の半径  $r_4$ 、 $n_0$  よりも小さい屈折率  $n_4$ 、および  $n_4 - n_0$  に等しい負の有効屈折率差  $n_4$  を有する、前記環状領域を取り囲む外側の溝領域を含み、

前記外側のクラッド領域は前記外側の溝領域を取り囲み、そして、

値  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、および  $n_4$  が、負の分散と、選択された動作波長帯内の特定の波長において  $0.005 \text{ nm}^{-1}$  よりも大きい相対分散勾配とを、該ファイバ伸張器に持たせるように選択されており、

(b) 分散と相対分散勾配とを有し、少なくともその一つが前記ファイバ伸張器の分散と相対分散勾配とは異なる第二のファイバを用意し、

(c) 前記ファイバ伸張器と前記第二のファイバとが共に接合されるときに、前記ファイバ伸張器と前記第二のファイバの総分散と総相対分散勾配とが、選択された圧縮器ユニットの分散と相対分散勾配とに整合するように、前記ファイバ伸張器と前記第二のファイバのそれぞれの長さを調整する、

各工程からなることを特徴とする伸張モジュールを組み立てる方法。

## 【請求項 9】

前記伸張モジュールが前記ファイバ伸張器の相対分散勾配よりも大きい相対分散勾配を有するよう、前記第二のファイバがゼロよりも大きい分散とゼロよりも小さい相対分散勾配とを有することを特徴とする請求項 8 に記載の方法。

## 【請求項 10】

前記伸張モジュールが前記ファイバ伸張器の相対分散勾配よりも小さい相対分散勾配を有するよう、前記第二のファイバがゼロよりも小さい分散とゼロよりも小さい相対分散勾配を有することを特徴とする請求項 8 に記載の方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、一般に光ファイバデバイスおよびその方式に関し、より具体的には、チャープパルス増幅システムに使われる改良されたファイバ伸張器とそのモジュールに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

チャープパルス増幅器 (CPA) は、ペタワット ( $10^{15}$  ワット) レベルまでの超短レーザーパルスを増幅するための技術である。レーザーは、比較的パワーが低い一連の超短パルスからなる出力を発生する。それから、これらのパルスは、パルスを伸張させる分散を有する伸張モジュールに送り込まれる。次いで、伸張されたパルスは高出力増幅器に送り込まれる。それから、伸張され増幅されたパルスは、再圧縮された増幅パルス出力を作り出すために、伸張モジュールの分散と逆の分散を有する圧縮モジュールに送られる。増幅の前にパルスを伸張することによって、パルスのピークパワーを低減し、望ましくない非線形性を避けることが可能である。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0003】

【特許文献 1】米国特許第 6,565,269 号明細書

## 【発明の概要】

10

20

30

40

50

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0004】

現状では、伸張モジュールは自由空間回折グレーティングを用いて製造される。しかし、多くの理由により、全てをファイバベースで行う（全ファイバ）解法を用いることが望ましい。ファイバベースの伸張器を作る努力がなされてきたが、これらの試みは成功しなかった。一事例においては、400メータの標準的な低カットオフシングルモードファイバが伸張器として使われた。しかし、通常、圧縮器は正の相対分散勾配（RDS）を有し、標準の低カットオフシングルモードファイバは通常負のRDSを有するので、分散勾配の整合は容易には得られない。この問題を克服するために、増幅器ファイバの勾配の不整合および非線形性の複雑なバランスが要求される。他の事例では、1050nmにおいてRDSが $0.0053 \text{ nm}^{-1}$ のファイバが記述されていた。そのファイバは、1050nmにおいて分散が $\beta_2 = -1.6 \text{ ps}^2$ （ $D = 2.7 \text{ ps/nm}$ ）であるグレーティング圧縮器と整合するが、その利用は限定的である。

10

## 【課題を解決するための手段】

## 【0005】

従来技術のこれら及び他の問題は、新しいファイバ伸張器を提供する本願発明によって取り扱われる。ファイバは、コア領域と内側の溝領域と環状領域と外側の溝領域と外側のクラッド領域とを含む。コア領域は、半径 $r_1$ 、屈折率 $n_1$ 、及び、外側半径が $r_0$ で屈折率が $n_0$ である外側のクラッド領域についての正の有効屈折率差 $n_1$ を有する。コア領域の有効屈折率 $n_1$ は $n_1 - n_0$ に等しい。内側の溝領域は、コア領域を取り囲み、そして、外側半径 $r_2$ と、 $n_0$ よりも小さい屈折率 $n_2$ と、 $n_2 - n_0$ に等しい負の有効屈折率差 $n_2$ とを有する。環状領域は、溝領域を取り囲み、そして、外側半径 $r_3$ 、 $n_0$ よりも大きい屈折率 $n_3$ と、 $n_3 - n_0$ に等しい正の有効屈折率差 $n_3$ とを有する。外側の溝領域は、環状領域を取り囲み、そして、外側半径 $r_4$ 、 $n_0$ よりも小さい屈折率 $n_4$ と、 $n_4 - n_0$ に等しい負の有効屈折率差 $n_4$ とを有する。外側のクラッド領域は外側の溝領域を取り囲む。値 $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、および $n_4$ が、ファイバに負の分散を持たせ、かつ、選択された動作波長帯の中の特定の波長において $0.005 \text{ nm}^{-1}$ よりも大きい相対分散勾配を持たせる。

20

## 【0006】

本発明のさらなる観点により、選択されたグレーティング圧縮器の分散およびRDSを整合させるために、新しいファイバ伸張器が第二のファイバと組み合わせて使用される。

30

## 【図面の簡単な説明】

## 【0007】

【図1】チャープパルス増幅システムのダイアグラムを表す図である。

【図2】入射角 $18^\circ$ におけるグレーティング間隔0.1メータの1200ライン/mmグレーティング圧縮器について波長に対する分散をプロットしたグラフを表す図である。

【図3】グレーティング間隔0.1メータの1200ライン/mmグレーティングについて入射角度の関数として1030nmにおける分散およびRDSの計算値を示すグラフを表す図である。

【図4】グレーティング間隔0.1メータの1200ライン/mmグレーティングについて入射角度の関数として1030nmにおける分散およびRDSの計算値を示すグラフを表す図である。

40

【図5】本発明の観点によるファイバ伸張器の断面を表す図である。

【図6】図5に示されるファイバの設計上の屈折率プロファイルを表す図である。

【図7】図6に示される屈折率プロファイルにより製造されたファイバの実測された屈折率プロファイルを表す図である。

【図8】図5 - 7に示されるファイバの具体的な設計、および動作の詳細を説明する表である。

【図9】図5 - 7に示されるファイバの具体的な設計、および動作の詳細を説明する表である。

50

【図10】図5-7に示されるファイバの分散、RDS、および減衰を図解するグラフ表示図である。

【図11】図5-7に示されるファイバの分散、RDS、および減衰を図解するグラフ表示図である。

【図12】図5-7に示されるファイバ伸張器を採用する伸張器ユニットのそれぞれ異なる構成のダイアグラム表示図である。

【図13】図5-7に示されるファイバ伸張器を採用する伸張器ユニットのそれぞれ異なる構成のダイアグラム表示図である。

【図14】図5-7に示されるファイバ伸張器を採用する伸張器ユニットのそれぞれ異なる構成のダイアグラム表示図である。

【図15】グレーティング圧縮ユニットの分散、およびRDSを整合させるために第二のファイバと組み合わせた図5-7に示されるファイバ伸張器の使用を図解するグラフ表示図である。

【図16】グレーティング圧縮ユニットの分散、およびRDSを整合させるために第二のファイバと組み合わせた図5-7に示されるファイバ伸張器の使用を図解するグラフ表示図である。

【図17】グレーティング圧縮ユニットの分散、およびRDSを整合させるために第二のファイバと組み合わせた図5-7に示されるファイバ伸張器の使用を図解するグラフ表示図である。

【図18】グレーティング圧縮ユニットの分散、およびRDSを整合させるために第二のファイバと組み合わせた図5-7に示されるファイバ伸張器の使用を図解するグラフ表示図である。

【図19】本発明のさらなる観点によって伸張器モジュールを構築する方法のフローチャート表示図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

本発明のよりよい理解のために、添付の図、および添付の請求の範囲とにより以下に説明する。なお、これらの図面中の構成要素は必ずしも寸法通りではない。

本発明の観点は、特定の波長帯、例えば1000-1100nm内で動作する短パルスファイバレーザでのチャープ増幅のための伸張器モジュールを全てファイバベースで提供するシステムと技術に向けられている。本発明の第一の観点は、伸張器モジュールそのものに直接使われてもよい新しいファイバ伸張器に向けられている。本発明のさらなる観点によれば、伸張器モジュールは、新しいファイバ伸張器と、伸張器モジュールが所望の総合的分散および総合的RDSを有するように選択された少なくとも一つの異なるファイバとを組合せ、共に接合することによって構築される。

【0009】

伸張器モジュールの設計において出てくる問題の議論にしたがって、新しいファイバ伸張器の詳細な説明と、および伸張器モジュールを構成するためにファイバ伸張器とその他のファイバとの好適な組合せとが提供される。説明されるシステムおよび技術は、一般的に広く使われているグレーティング圧縮器と組み合わせて使われるために十分高いRDSを有する全ファイバ伸張器モジュールを構成するために使われるということに留意されたい。

【0010】

高いパルスエネルギーを持つ短パルスファイバレーザは、マイクロマシニング(micro machining)や類似のものなど多くの用途に望ましい。短パルス、つまり持続時間が1ピコ秒より短く、マイクロジュールレベル、あるいはミリジュールレベルものパルスエネルギーを有する短パルスを生成するための耐久性のある方式として、チャープパルス増幅が示されている。

【0011】

図1は、代表的なチャープパルス増幅システム20のダイアグラムを示す。低パワーの

10

20

30

40

50

フェムト秒発振器 2 1 がパルス出力 2 2 を発生し、通常、 $10^3$  倍以上にパルス出力を伸張する伸張器モジュール 2 3 に送り込まれる。伸張器モジュール 2 3 はパルスのピークパワーを低減するために非常に分散が大きい。それから、伸張されたパルス出力 2 4 は高パワーの増幅器 2 5 によってリニアに増幅される。増幅され伸張されたパルス出力 2 6 は、その後、伸張器ユニットとは逆の分散を持つ分散要素である圧縮ユニット 2 7 によって再圧縮されて、増幅され再圧縮されたパルス出力 2 8 をもたらす。

【 0 0 1 2 】

群速度分散の特性を明らかにするために、異なるパラメータとその微分係数を用いる。光ファイバの場合においては D パラメータが一般的に用いられる。D パラメータは以下のよう

10

【数 1】

$$D = \frac{dT_g}{d\lambda}$$

ここで、 $T_g$  は群遅延、 $\lambda$  は波長である。レーザの場の内部では、伝播定数 ( ) の二次微分である  $\beta_2$  を使うことがより一般的である。

【数 2】

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

20

ここで  $\omega$  は角振動数である。これら二つのパラメータは以下のように一意的に関連している。

【数 3】

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

ここで  $c$  は真空中の光の速度である。これ以降の本説明の中では D パラメータが使われる。

【 0 0 1 3 】

30

現在のチャープ増幅システムでは、伸張ユニットおよび圧縮ユニットは、自由空間回折グレーティングの対を用いて作られる。しかし、一般的に言えば、多くの理由により、ファイバベースの方式が自由空間光学系の方式よりも望ましい。一般に、ファイバベースの構成要素は、対応する自由空間光学系の構成要素と比較してサイズが小さく、より安定性がよく、寿命が長く、かつコストが安い。

【 0 0 1 4 】

現在のところ、圧縮器ユニットについては全ファイバ方式を用いて製造される可能性はない。数ナノジュール以上のパルスエネルギーについては、圧縮後の高いピーク強度が、圧縮器ファイバ中の非線形性による顕著なパルス歪につながる。しかし、増幅および圧縮前のレーザ出力のパワーが比較的低いため、これらの高いピーク強度は伸張器ユニットに

40

【 0 0 1 5 】

しかし、伸張器として用いるファイバの設計には多くの問題がある。一つの問題は、理想的には、伸張器は、単一の波長でだけでなく、パルスの全スペクトル範囲、一般的にはパルスの持続時間に依存するが 5 - 20 nm の範囲で、圧縮器グレーティングの分散を整合するべきである。図 2 は、1200 ライン/mm のグレーティング圧縮器の分散 ( D パラメータ ) 4 2 が、入射角度 18 °、グレーティングの距離 0.1 メータにおける波長の関数としてプロットされているグラフ 4 0 を示す。図 2 の図解のように、一般にグレーテ

50

ィング圧縮器は比較的大きい分散勾配を有する。

【0016】

分散および分散勾配の補償のためのファイバを設計するとき、有用な指標は相対分散勾配 (RDS) であって、それは以下のように定義される。

【数4】

$$RDS = \frac{S}{D}, \text{ ここで } S = \frac{dD}{d\lambda}$$

【0017】

ファイバが分散および分散要素の分散勾配を補償するとき、ファイバは分散要素として同一のRDSを持つべきである。RDSは以下の式によって伝播定数の三次、および二次微分の比に関連している。

【数5】

$$RDS = -\frac{2\pi c \beta_3}{\lambda^2 \beta_2} - \frac{2}{\lambda}, \text{ ここで } \beta_3 = \frac{d^3\beta}{d\omega^3}$$

【0018】

ファイバ伸張器の設計における一般的な問題は十分高いRDSを得ることである。これは圧縮器グレーティングの一般的な特性による。十分な伸張比を得るために、通常5 ps/nmから数100 ps/nmの範囲の分散Dが必要とされる。あまりにも長いグレーティング間の距離を必要とせずそのような分散係数を得るためには、比較的低い入射角でグレーティングを動作させることが必要である。しかし、このことが比較的高いRDSの値につながる。この例が、グレーティング間隔が0.1メートルで1200ライン/mmのグレーティングについて、入射角の関数として1030 nmにおいて計算された分散62とRDS 82のグラフ60および80である図3および図4に示されている。

【0019】

本発明の観点で、これらの問題およびその他の問題に対処する新しいファイバ伸張器の設計を提供する。いま述べているファイバの例は、負の分散D、およびRDS > 0.005 nm<sup>-1</sup>を有する。このファイバは、例えばYbファイバ利得帯(増幅窓)、即ち1000 nmと1100 nmの間のファイバレーザで作用する短パルスレーザ用のチャープパルス増幅システムの伸張器モジュールで使用するために設計されている。しかし、ここに説明されるファイバ設計は、他の波長帯、例えば一般にTi-サファイアレーザによって使われる800 nm帯や、既存の分散補償ファイバ技術で一般的に使われる1550 nm帯などで動作する短パルスレーザ用のチャープパルス増幅システムで使用するために修正してもよい。

【0020】

新しいファイバは、それぞれが屈折率を持つ複数の領域を生成するためにドープされた適切な材料で製造される。これらの領域は、ファイバの長手方向に伸びる中心部コア領域と、コア領域を取り囲む連続した層として配される一連の同心領域とを含む。ファイバは、例えば修正化学気相堆積(MCVD)技術や類似の技術など、業界で知られた技術を用いて作られる。

【0021】

図5は、寸法どおりではないが、新しい伸張ファイバ100の断面の図解を示す。図5に示されるように、ファイバは以下の領域を含む。半径がr<sub>1</sub>であるコア101、外側の半径がr<sub>2</sub>である内側の溝102、外側の半径がr<sub>3</sub>である環状部103、外側の半径がr<sub>4</sub>である外側の溝、および外側の半径がr<sub>0</sub>である外側のクラッド。さらにファイバは(図示しない)一つ以上の外側の保護層を備えてもよい。

【0022】

図6は、ファイバに望ましい屈折率プロファイル120の図解を示し、図7は、望まし

10

20

30

40

50

い屈折率プロファイルに従って製造されたファイバから得られた実測による屈折率プロファイル 140 を示す。本説明のために、外側のクラッドの屈折率は  $n_0$  として表され、コア、内側の溝、環状部、および外側の溝の屈折率はそれぞれ  $n_1 \sim n_4$  として表される。さらに、外側のクラッドの屈折率  $n_0$  がそれぞれのファイバ領域についての有効屈折率差  $n$  を決定するために使われる。つまり、

$$\begin{aligned} n_1 &= n_1 - n_0 ; \\ n_2 &= n_2 - n_0 ; \\ n_3 &= n_3 - n_0 ; \text{および} \\ n_4 &= n_4 - n_0 \end{aligned}$$

である。

10

#### 【0023】

図6および7に示されるように、屈折率プロファイル 120, 140 は、コア領域 101 に対応する中心部の突起 121, 141、内側の溝部 102 に対応する溝部 122, 142、環状領域 103 に対応する肩部 123, 143、および外側の溝部 104 に対応するより小さい溝部 124, 144 を含む。

#### 【0024】

図8は、以下のファイバ領域部の材料、ドーパント、有効屈折率、幅、および外側半径のそれぞれについての詳細を説明する表 200 を示す。

#### 【0025】

五つのファイバ領域のすべての材料は  $\text{SiO}_2$  である。個々の領域のそれぞれは適当な量のドーパントを加えることにより作られる。外側のクラッド 105 は、ドーブされず、屈折率  $n_0$  を有する。外側のクラッドの外側半径は 62.5 マイクロメートルである。したがってファイバ伸張器の直径は 125 マイクロメートルである。

20

#### 【0026】

コア 101 は、屈折率を高めるドーパント  $\text{GeO}_2$  をドーブされ、有効屈折率差  $n_1 = n_1 - n_0 = 21.9 \times 10^{-3}$ 、および半径 0.98 マイクロメートルを有する。

#### 【0027】

内側溝部 102 は、屈折率を下げるドーパント  $\text{GeO}_2$  および F の混合物をドーブされ、有効屈折率差  $n_2 = n_2 - n_0 = -8.9 \times 10^{-3}$ 、幅 2.96 マイクロメートル、および外側半径 3.94 マイクロメートルを有する。選択肢として、溝部は F だけでドーブされてもよい。

30

#### 【0028】

環状部 103 は、屈折率を高めるドーパント  $\text{GeO}_2$  および F の混合物をドーブされ、有効屈折率差  $n_3 = n_3 - n_0 = 6.8 \times 10^{-3}$ 、幅 1.38 マイクロメートル、および外側半径 5.32 マイクロメートルを有する。選択肢として、環状部は  $\text{GeO}_2$  だけでドーブされてもよい。

#### 【0029】

外側溝部 104 は、屈折率を高めるドーパント  $\text{P}_2\text{O}_5$  および F の混合物をドーブされ、有効屈折率差  $n_4 = n_4 - n_0 = -1.0 \times 10^{-3}$ 、幅 1.76 マイクロメートル、および外側半径 7.08 マイクロメートルを有する。選択肢として、混合ドーパントは  $\text{GeO}_2$  を含んでもよい。第二の選択肢として、外側溝部は F だけでドーブされてもよい。

40

#### 【0030】

図9は、図8に説明される表 200 に従って製造されるファイバの種々の特性を説明する表 210 である。これらの特性は、1030 nm および 1060 nm における、相対分散勾配、分散、減衰、およびモードフィールド径を含む。さらに表は、直径 30 mm の心棒に一巻きしたときの損失が 0.5 dB となる波長とファイバのカットオフ波長とを説明している。

#### 【0031】

表 210 に示されるように、1030 nm において、ファイバは、相対分散勾配  $0.0094 \text{ nm}^{-1}$ 、分散  $-164 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ 、減衰  $2.9 \text{ dB} / \text{km}$ 、およびモ

50

ードフィールド径 2.9 マイクロメータを有する。1060 nm において、ファイバは、相対分散勾配  $0.130 \text{ nm}^{-1}$ 、分散  $-236 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ 、減衰  $2.6 \text{ dB} / \text{km}$ 、およびモードフィールド径 3.0 マイクロメータを有する。

【0032】

さらに表 210 に示されるように、直径 30 mm の心棒に一巻きしたときの損失が 0.5 dB となる波長は 1072 nm である。ファイバのカットオフ波長は 970 nm である。ファイバは、選択された動作波長範囲以下でカットオフ波長を有するように設計されているということに留意されたい。図 10 は、分散 222 および RDS 224 が波長の関数としてプロットされるグラフ 220 を示す。図 11 は、減衰 232 が波長の関数としてプロットされるグラフ 230 を示す。

10

【0033】

ここに説明されているファイバは、全ファイバ伸張ユニットを形成するために様々な構成で使われる。これらの構成のいくつかは図 12 - 14 に模式的に示されている。

【0034】

図 12 は伸張モジュール 240 の図解を示し、一本の新しいファイバ伸張器 242 が、適当なパッケージ 244 に組み込まれ、上に述べられたパルス伸張機能をそれ自体が備えるように使用される。この方法は、ファイバ伸張器 242 の分散と RDS とを所与の圧縮器ユニットの分散と RDS とに調整する必要なしに整合させるために使用される。もし、ファイバ伸張器 242 の必要な長さが十分に短ければ、ファイバは緩く巻いたコイルの形でパッケージ 244 に組み込まれてもよい。もっと長いファイバ 242 は、巻き棒や他の適当な構造物を用いて、パッケージ 244 に組み込まれてもよい。

20

【0035】

本発明の更なる観点により、新しいファイバ伸張器に基づく伸張ユニットの分散と RDS とが、選択された分散と RDS とを有する第二のファイバあるいはファイバデバイスとファイバ伸張器とを組み合わせることによって、正確にコントロールされる。以下で用いられるように、「ファイバ」という表現は、ファイバ、ファイバデバイス、ファイバベースの構造体、あるいはそれらの組合せなどを参照するものとして一般的に使用される。

【0036】

新しいファイバ伸張器と組み合わせて使用するのに適切な第二のファイバを選択することにより、ファイバ伸張器および第二のファイバのいずれかあるいはその両方の長さを切り揃えることで、伸張モジュールの総合的な分散と総合的な相対分散勾配の両方を正確にコントロールすることが可能である。所望の結果、即ち、特定の圧縮モジュールと伸張器モジュールとの整合を達成すべく新しいファイバ伸張器が一つ以上の他のファイバと組み合わせられている伸張器モジュールに本義論を適用することが可能であるということに留意すべきである。

30

【0037】

第二のファイバは、様々な物理的構成で新しいファイバ伸張器と組み合わせられてよい。例えば、図 13 に図示されるように、ファイバ伸張器 252 と第二のファイバ 254 とは接合点 256 で互いに結合され、CPA システムへの組み込みのために単一のパッケージ 258 の中に共に収納される。代替として、図 14 に図示されるように、伸張器モジュール 260 は、接合点 272 で共に結合されるファイバ伸張器 268 と第二のファイバ 270 のそれぞれを収納する複数のパッケージユニット 262 および 264 からなる。新しいファイバ伸張器と第二のファイバの組合せに基づく伸張器モジュールは、得られる RDS の量のコントロールの柔軟性だけでなく、二つのファイバそれぞれの長さを調整することによって、分散および RDS を個別に非常に正確なコントロールで調整できることを備えている。

40

【0038】

例えば、正の分散 D と負の RDS とを有する第二のファイバとファイバ伸張器とを組み合わせることによって、伸張器ファイバ単体の RDS よりも高い RDS を持つ伸張器ユニットを組み立てることが可能である。一つの典型的な実施例において、ファイバ伸張器は

50

、より高次のモード（HOM）、例えばLP<sub>0,2</sub>モードで動作する正のDと負のRDSとを有するファイバデバイスと組み合わせられた。実施例で用いられたファイバデバイスは、フェムトコンプ（FemtoComp）（登録商標、以下同）という名称でOFSから商業的に入手可能である。図15および図16は、如何にして新しいファイバ（1030nmにおける $D = -164 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ ）、および $RDS = 0.0094 \text{ nm}^{-1}$ ）をフェムトコンプ（1030nmにおける $D = 69 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ ）、および $RDS = -0.0093 \text{ nm}^{-1}$ ）と組み合わせることにより、1030nmにおけるRDSが $0.0025 \text{ nm}^{-1}$ であるグレーティング圧縮器が整合されるかを示す。

#### 【0039】

図15は、新しいファイバ（下側のプロット302）とフェムトコンプファイバデバイス（上側のプロット304）とについて波長の関数として分散がプロットされるグラフ300を示す。図16は、入射角18°、グレーティングの間隔0.1μmで動作する1200ライン/mm圧縮器グレーティングの目標とする分散、-Dのプロット312を含むグラフ310を示す。図16のグラフはさらに、142メータのフェムトコンプのHOMファイバが続く119メータの新しいファイバを組み合わせることにより得られる分散のプロット314を図解する。

#### 【0040】

代替として、負の分散Dと負のRDSとを有する第二のファイバあるいはファイバデバイスと伸張器ファイバとを組み合わせることによって、伸張器ファイバ単体のRDSよりも低いRDSを持つ伸張器ユニットを組み立てることが可能である。例えば、そのようなファイバの一つは、OFSのクリアライト（ClearLite）（登録商標、以下同）980-14、あるいはコーニングのHI-1060のような標準の低カットオフシングルモードファイバである。図17および18は、如何にして新しいファイバ（1030nmにおける $D = -164 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ ）、および $RDS = 0.0094 \text{ nm}^{-1}$ ）をクリアライト980-14（1030nmにおける $D = -44 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ ）、および $RDS = -0.0041 \text{ nm}^{-1}$ ）と組み合わせることにより、1030nmにおけるRDSが $0.0068 \text{ nm}^{-1}$ であるグレーティング圧縮器が整合されるかを示す。

#### 【0041】

図17は、新しいファイバ（下側のプロット322）とクリアライト980-14シングルモードファイバ（上側のプロット324）とについて波長の関数として分散がプロットされるグラフ320を示す。図18は、入射角30°、グレーティングの間隔0.1μmで動作する1200ライン/mm圧縮器グレーティングの目標とする分散、-Dのプロット332を説明するグラフ330を示す。図18のグラフはさらに、6.5メータのクリアライト980-14ファイバが続く7.8メータの新しいファイバを組み合わせることにより得られる分散のプロット334を図解する。

#### 【0042】

伸張器ファイバをOFSのクリアライト980-14やコーニングのHI-1060のような標準の低カットオフファイバに接合することに起因する接合損失が試験された。これらのファイバは、帯域1000nmから1100nmで動作するファイバレーザに日常的に使われている。開示および図面が参照のためそのすべてがここに引用される米国特許第6,565,269号明細書に述べられている熱的に拡張されたモードフィールド技術を用いて、クリアライト980-14への0.17dBの接合損失が示されている。

#### 【0043】

図19は、本発明の更なる観点による一般的な方法350のフローチャートを示す。ステップ351で、新しいファイバ伸張器が用意される。ステップ352で、少なくともその一つがファイバ伸張器の分散とRDSとは異なる分散とRDSとを有する第二のファイバが用意される。ステップ353で、それぞれの伸張器ファイバと第二のファイバが共に接合されるとき、ファイバ伸張器と第二のファイバとが一体となった総分散および総RDSが選択された圧縮器の分散とRDSとに整合するように、それぞれの伸張器ファイバと第二のファイバの長さが調節される。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 4 】

上に述べられたシステムと技術は、従来技術を越える数多くの利点を備えるということが認識されよう。グレーティングベースの伸張器と比較して、本発明によるシステムはRDSおよび分散の両方のより正確なコントロールを備える。さらに、ここに述べられるシステムはより小さいサイズ、よりよい安定性、より長い寿命、およびより低いコストという利点を備える。

## 【 0 0 4 5 】

上に述べられたことは当業者が発明を実施することを可能にする詳細を含むが、記述は本質的に例示的なものであり、これらの教えることの恩恵を受ける当業者には多くの修正、および変形が明らかであることが認識されるべきである。したがって、本発明はここに添付される請求の範囲によってのみ規定され、かつ請求の範囲は従来技術によって許容されるかぎり広く解釈されるものであると意図される。

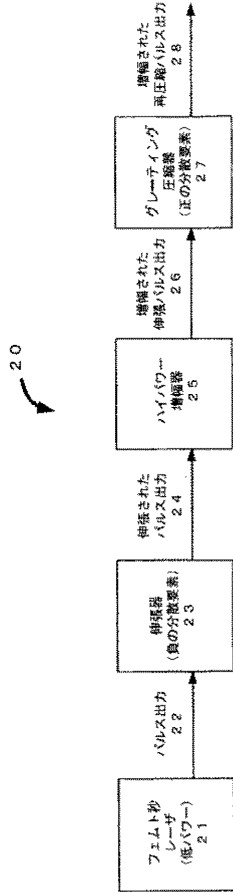
10

## 【 符号の説明 】

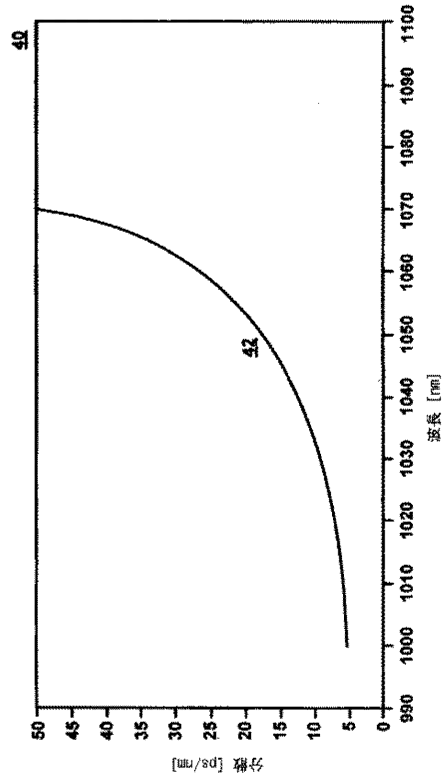
## 【 0 0 4 6 】

1 0 0	ファイバ	
1 0 1	コア	
1 0 2	内側の溝	
1 0 3	環状部	
1 0 4	外側の溝	
1 0 5	外側のクラッド	20
1 2 0	所望する屈折率プロファイル	
1 2 1、1 4 1	中心部の突起	
1 2 2、1 4 2	溝部	
1 2 3、1 4 3	肩部	
1 2 4、1 4 4	より小さい溝	
1 4 0	実測した屈折率プロファイル	
2 2 2	分散	
2 2 4	RDS	
2 3 2	減衰	
2 4 0、2 6 0	伸張モジュール	30
2 4 2、2 5 2、2 6 8	ファイバ伸張器	
2 4 4、2 5 8	パッケージ	
2 5 4、2 7 0	第二のファイバ	
2 5 6、2 7 2	接合点	
2 6 2、2 6 4	パッケージユニット	
3 1 2、3 3 2	目標分散のプロット	
3 1 4	接合により得られた分散のプロット	

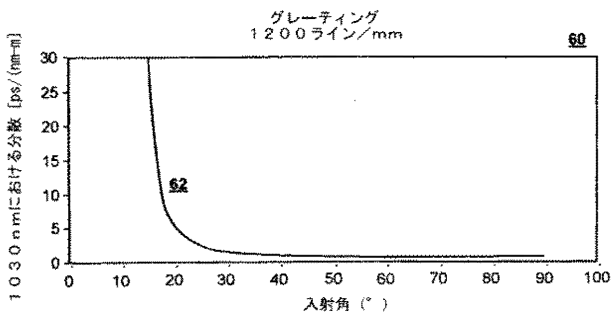
【 図 1 】



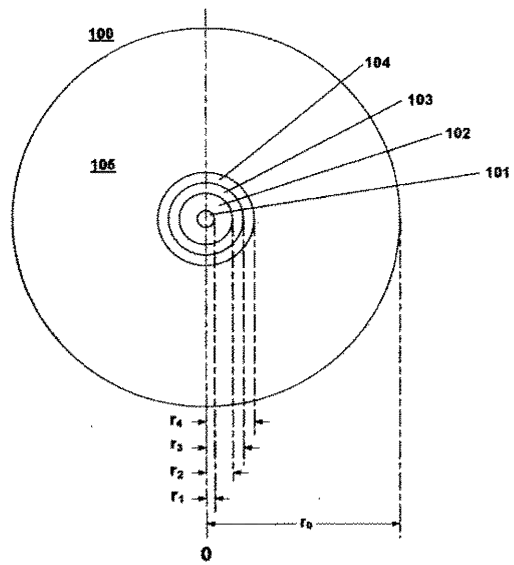
【 図 2 】



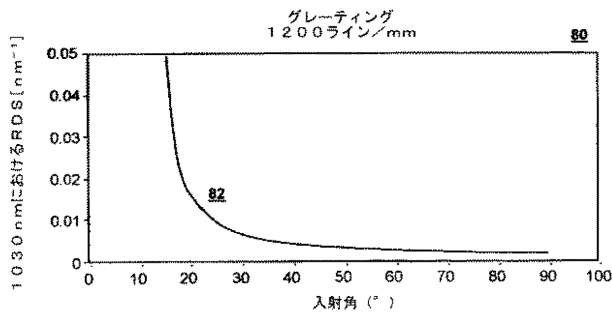
【 図 3 】



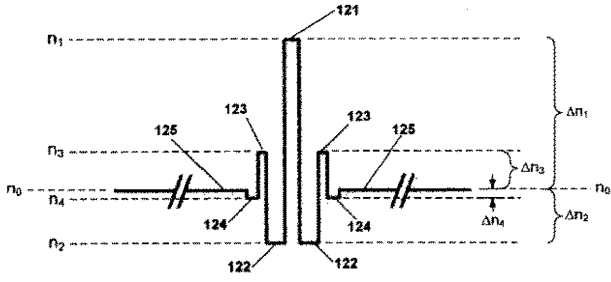
【 図 5 】



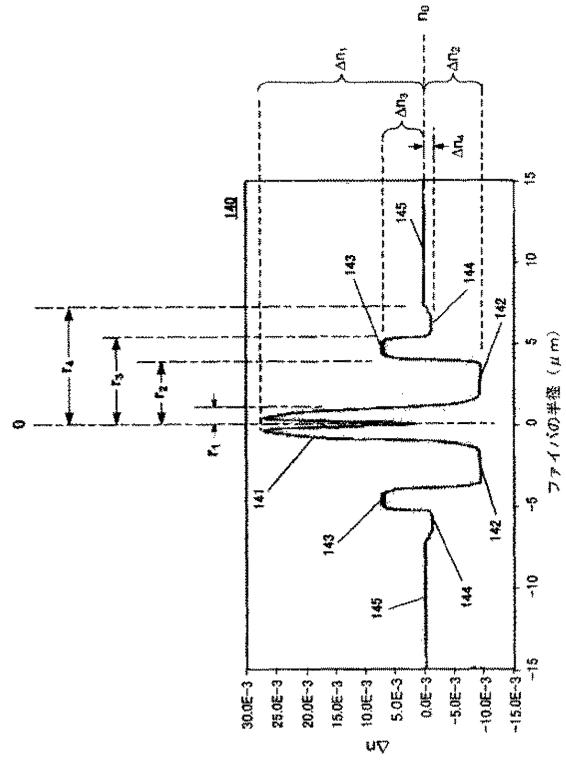
【 図 4 】



【図6】



【図7】



【図8】

200

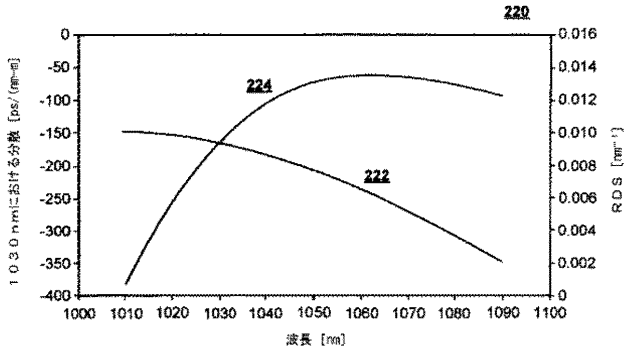
ファイバの領域	材料	ドーパント	n	$\Delta n (\times 10^{-3})$	幅	外径の半径
コア	SiO <sub>2</sub>	GeO <sub>2</sub>	n <sub>1</sub>	$\Delta n_1 = n_1 - n_0 = 21.9$	N/A	0.98 . m
内側の環状部	SiO <sub>2</sub>	GeO <sub>2</sub> F	n <sub>2</sub>	$\Delta n_2 = n_2 - n_0 = (-8.9)$	2.96 . m	3.94 . m
環状部	SiO <sub>2</sub>	GeO <sub>2</sub> F	n <sub>3</sub>	$\Delta n_3 = n_3 - n_0 = 6.8$	1.38 . m	5.32 . m
外側の環状部	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> F GeO <sub>2</sub> (任意選択)	n <sub>4</sub>	$\Delta n_4 = n_4 - n_0 = (-1.0)$	1.76 . m	7.08 . m
外側のクラッド	SiO <sub>2</sub>	なし	n <sub>0</sub>	$\Delta n_0 = n_0 - n_0 = 0.0$	55.42 . m	62.50 . m

【図9】

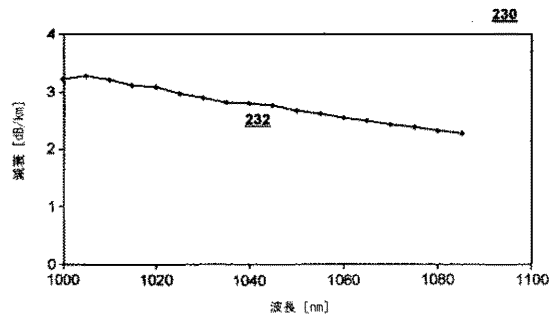
210

相対分散勾配	@ 1030 nm	@ 1060 nm
分散	0.0094 nm <sup>-1</sup>	0.0130 nm <sup>-1</sup>
減衰	-164 ps/(nm <sup>2</sup> ·km)	-236 ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
モードファイバ径 (ベクターマンII)	2.9 . m	2.6 dB/km
直径 3.0 mm の心棒に 1 回巻きつけたときの減衰が 0.5 dB である長さ	1072 nm	3.0 . m
カットオフ波長	970 nm	

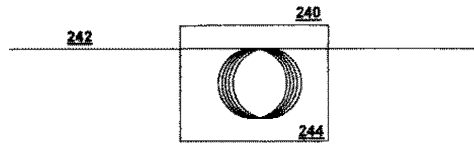
【図10】



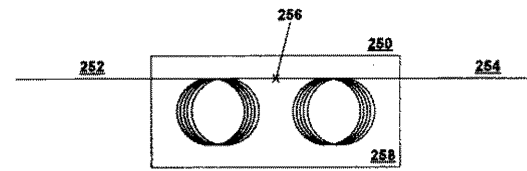
【図11】



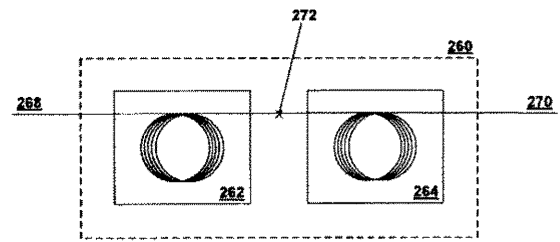
【図12】



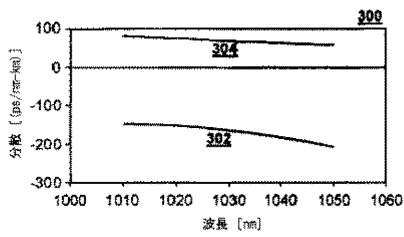
【図13】



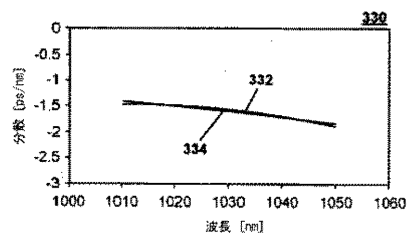
【図14】



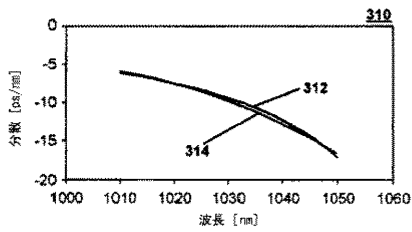
【図15】



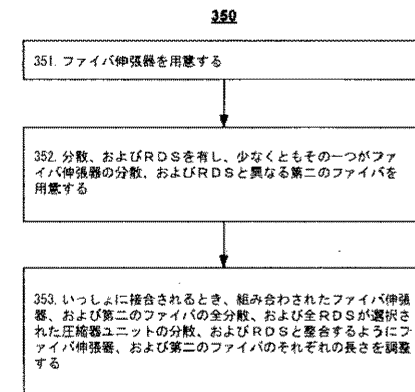
【図18】



【図16】



【図19】



【図17】

