(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3860710号
(P3860710)
(45)発行日　平成18年12月20日(2006.12.20)　(24)登録日　平成18年9月29日(2006.9.29)

(51)Int.Cl.		F I		
H04B 10/02	(2006.01)	H04B	9/00	M
H04B 10/18	(2006.01)	G02B	6/00	306
G02B 6/00	(2006.01)	G02B	6/10	C
G02B 6/02	(2006.01)	H04L	1/00	E
H04L 1/00	(2006.01)			

請求項の数 11　(全 15 頁)

(21)出願番号　特願2000-228339(P2000-228339)
(22)出願日　平成12年7月28日(2000.7.28)
(65)公開番号　特開2001-77756(P2001-77756A)
(43)公開日　平成13年3月23日(2001.3.23)
審査請求日　平成14年5月20日(2002.5.20)
(31)優先権主張番号　09/362151
(32)優先日　平成11年7月28日(1999.7.28)
(33)優先権主張国　米国(US)

前置審査

(73)特許権者　596092698
ルーセント　テクノロジーズ　インコーポレーテッド
アメリカ合衆国．０７９７４－０６３６　ニュージャーシィ，マレイ　ヒル，マウンテン　アヴェニュー　６００
(74)代理人　100064447
弁理士　岡部　正夫
(74)代理人　100085176
弁理士　加藤　伸晃
(74)代理人　100094112
弁理士　岡部　讓
(74)代理人　100096943
弁理士　臼井　伸一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】温度に起因する分散の変動を補償するための自動分散補償モジュールを組み込む光ファイバ通信システム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

少なくとも一つの光信号チャネルを提供する光送信機、光ファイバ伝送路、および光受信機を備え、温度変動に起因する光ファイバの分散の変動を受ける光ファイバ通信システムにおいて、

前記伝送路に結合され、調節可能な波長分散補償要素を含む少なくとも一つの自動波長分散補償モジュール、

該システム上を伝送されるデータの健全性を監視するためのデータ健全性モニタ、及び

前記データ健全性モニタから前記調節可能な波長分散補償要素へのフィードバック回路であって、前記波長分散補償要素をシステムを通じてのデータの健全性が最適化されるように調節するためのフィードバック回路を含み、

該調節可能な波長分散補償要素は、熱的に調節可能なチャープを有する光ファイバブラッグ・グレーティングからなり、

該光ファイバブラッグ・グレーティングは抵抗膜で被覆され、該抵抗膜の抵抗が該グレーティングの長さに沿って変化することを特徴とする光ファイバ通信システム。

【請求項２】

前記データ健全性モニタが、伝送された信号のスペクトラムを解析するためのスペクトラムプロセッサおよび前記スペクトラムに基づいて最適化フィードバック信号を計算するためのデータプロセッサを備えることを特徴とする請求項１のシステム。

【請求項３】

前記データ健全性モニタが、伝送された信号内のエラーを検出するためのエラー検出回路および前記エラーに基づいて最適化フィードバック信号を計算するためのデータプロセッサを備えることを特徴とする請求項１のシステム。
【請求項４】
前記エラー検出回路が、順方向エラー修正回路から成ることを特徴とする請求項１のシステム。
【請求項５】
前記エラー修正回路が、Reed Solomon（リードソロモン）順方向エラー修正アルゴリズムを用いることを特徴とする請求項４のシステム。
【請求項６】
前記エラー検出回路が、データを運ぶために用いられるフレーミングフォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項３のシステム。
【請求項７】
前記エラー検出回路が、ＳＯＮＥＴフォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項６のシステム。
【請求項８】
前記エラー検出回路が、ＡＴＭフォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項６のシステム。
【請求項９】
前記エラー検出回路が、ＦＤＤＩフォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項６のシステム。
【請求項１０】
前記光送信機が複数の波長の異なる光信号チャネルを提供するマルチ波長光送信機から成り、前記受信機がマルチ波長光受信機から成ることを特徴とする請求項１のシステム。
【請求項１１】
前記光ファイバブラッグ・グレーティングは円筒管内に配置されていることを特徴とする請求項１のシステム。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【関連する特許出願】
本発明は、１９９９年２月１８日付けで、B.Eggletonらによって出願された“Optical Communication System Incorporating Automatic Dispersion Compensation Modules（自動分散補償モジュールを組み込む光通信システム）"なる名称の合衆国特許出願S.N.09/252,708号の一部継続出願である。
【０００２】
【発明の属する技術分野】
本発明は、ファイバの温度に起因する分散の変動を補償するために自動分散補償モジュールを組み込む光ファイバ通信システムに関する。
【０００３】
【従来の技術】
光ファイバ通信システムは、莫大な量の情報を高速にて伝送するというそれらの大きな可能性を達成しつつある。本質的には、光ファイバシステムは、情報を運ぶ光信号のソース、光信号を運ぶための光ファイバ伝送ライン、および光信号を検出し、それらが運ぶ情報を復調するための受信機から構成される。典型的には、これらに加えて、伝送ラインに沿って一定の間隔にて光増幅器が配置され、適当な箇所に信号チャネルを追加あるいは脱落させるための追加／脱落ノードが配置される。
【０００４】
光ファイバの温度の変動は、その伝送特性に影響を与える。光通信システムは、通常は、伝送媒体として高純度のシリカ光ファイバを用いる。温度が変動すると、シリカファイバの群速度分散（GVD：group velocity dispersion）が変化し、このため、波長成分によっ

て伝搬時間遅延に幾らかの群速度分散の変動が生じる。このような分散の変動（偏差）は、伝送される光パルスに望ましくない歪みをもたらし、結果として、帯域幅および／あるいは伝送距離に制約を加える。

【０００５】

光ファイバ通信システムのビット速度が高くなるのに伴って、温度の変動の影響はますます重大となる。光伝送ファイバは、典型的には、３０～４０℃のオーダの温度の変動を受ける。１０ギガビット／秒なる現在のビット速度では、温度の変動の影響は比較的小さい。ただし、温度の変動が分散の変動に与える影響は、ビット速度の二乗に比例して増加する。このため、現在のビット速度の４倍のビット速度を持つ現在考慮されている（４０ギカビット／秒のシステムでは、温度の変動の影響は、１６の係数で増加し、システムの動作に対する重大な課題となる。

【０００６】

この重大さは、単純な数値例によって示すことができる。温度に起因する分散の変動の規模は、ファイバによっても異なるが、０．００２５ｐｓ／（ｎｍ・Ｋｍ）／Ｃ程度の影響が推定される（詳しくは、W.H.Hattonらの文献“Temperature dependence of chromatic dispersion in sigle mode fibers",J.of Lightwave Techn.,Vol.,LT-4,pp.1552-55 (1986)を参照されたい）。提唱される４０ギガビット／秒のファイバ通信システムは、１０００Ｋｍのファイバ延長を想定し、これらが３０℃の温度の変動を受けるものと予想される。このようなシステムでは、温度に起因して約６０　ｐｓ／ｎｍなる分散の変動を受けることとなる。この変化（分散の変動）は、４０ギガビット／秒システムに重大な劣化をもたらすことが考えられる。さらに高速な１００ギガビット／秒システムでは、温度がたった数度変化しただけでも、その影響は膨大なものとなる。

【０００７】

【発明が解決しようとする課題】

温度の変動に起因する分散の変動に対する一つの解決方法が、Kuhwaharaらの文献“Adaptive Dispersion Equalization by Detecting Dispersion Fluctuations Using PM-AM Conversion”,Electronic Letters,Vol.34,p.1956 (1998)において述べられている。Kuhwaharaらは、温度の変動に起因する分散の変動は大きな問題であることに気付き、分散を信号波長の波長をチューニングすることで等化することを提唱する。換言すれば、Kuhwaharaらは、光ファイバ通信システム内に高度に波長に依存する多くの要素を設けることを提供する。ただし、Kuhwaharaらの方式では、信号波長の望ましくない変動を追跡するために、これら全ての要素を追加／脱落フィルタおよびデマルチプレクサも含めて必要とし、このことは、高速のＷＤＭファイバ通信システムでは許されない。

【０００８】

従って、基本的な網パラメータを変更することなく、温度に起因する分散の変動を補償することができる光ファイバ通信システムに対する必要性が存在する。

【０００９】

【課題を解決するための手段】

本発明によると、（１０ギガビット／秒以上の）高速光通信システムにおける温度の変動変動に起因する分散の変動が一つあるいは複数の自動分散補償モジュールを提供することで補償される。各モジュールは、調節可能な分散要素、データ健全性モニタ、およびフィードバック網を備える。モニタにて、調節可能な分散要素が温度の変動に起因する分散の変動を補償するように調節される。一つの好ましい実施例においては、分散補償モジュールは、制御可能なチャープドファイバブラッググレーティングから成り、ファイバの長さに沿って分布するように配置された薄膜ヒータに電流を流すことでグレーティング内にチャープが誘導される。加えられる電流の大きさによって、グレーティングの分散が決定される。データ健全性モニタは、伝送されたデータの健全性を監視し、グレーティングに加えられる電流を制御するためのフィードバック信号を提供する。

【００１０】

本発明の性質、長所、および様々な他の特徴が、以下の本発明の幾つかの実施例の説明を

図面と照らして読むことで一層明白となるものである。
なお、図面は単に本発明の概念を図解することを目的とし、グラフを除いては、これら図面は正確な縮尺では与えられていないことに注意する。
【００１１】
【発明の実施の形態】
本発明は、３つのパートから構成される。パート１では、自動分散補償モジュールを採用する光通信システムについて説明し、パート２では、このモジュールに対する一例としての調節可能な分散補償グレーティングについて説明し、パート３では、このモジュールに対する一例としてのデータ健全性モニタについて説明する。
【００１２】
１．温度の変動（に起因する分散の変動）を補償するための自動分散補償モジュールを備える高速通信システム
図１は、温度の変動（に起因する分散の変動）を補償するための一つあるいは複数の自動分散補償モジュール２０を備える一例としての高速光通信システムを簡略的に示す。このシステムは、本質的には、（１０ギガビット／秒以上の）高速光送信機１０、伝送ファイバ路１１、および光受信機１２から構成される。このシステムは、典型的には、３０℃以上の温度の変動を受けるが、これは、補償されない場合は、不当に高い分散に起因するパルスの広がりをもたらし、伝送される情報の品質を劣化させる。このような品質の劣化を防止するために、このシステムには、一つあるいは複数の分散補償モジュール２０が設けられる。
【００１３】
伝送路１１は、典型的は従来の光伝送ファイバから成り、オプションとして、一つあるいは複数の光増幅器１３（典型的にはエルビウム増幅器）が設けられる。
【００１４】
各自動分散補償モジュール２０は、調節可能な分散補償器３０、データ健全性モニタ３１、およびフィードバック網３２を備える。データ健全性モニタ３１は、フィードバック網３２を介して、分散補償器３０をシステム性能が最適化されるように調節する。この一例としてのモジュールにおいては、調節可能な分散補償器３０は、伝送ファイバに結合された光サーキュレータ３２および調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）３３を備える。データ健全性モニタ３１は、一つの実施例においては、伝送ラインに結合された光受信機、および受信された信号からフィードバック制御信号を生成するためのデータプロセッサを備える。
【００１５】
動作においては、伝送ファイバ１１上の信号の一部分がタップ３４によってサンプリングされる。この信号を解析することで、送信されたデータの健全性の尺度が得られ、この尺度を用いて調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）３３を制御するためのフィードバック信号が生成される。冗長符号化データが伝送される場合は、解析は非常に簡単で、閾値レベルがシステム内のエラーに高度に敏感となるように選択される。フィードバック信号は、エラー率が最小となるように選択される。一つの実施例においては、冗長符号化には、光伝送に既に用いられているエラー検出信号、例えば、ＳｏｎｅｔプロトコルのＢ－オクテット内のビットインタリーブドパリティ８エラー検出コードが用いられる。
【００１６】
調節可能な分散補償器３０については、伝送ファイバ１１からの信号光は、サーキュレータ３２の一方のポートに入り、第二のポートの所の調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）３３に向けられる。調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）３３は、この実施例においては、反射モードにて動作する調節可能なブラッググレーティングから成る。補償された信号光は、サーキュレータ３２に反射され、サーキュレータ３２から伝送ファイバ１１の後続セグメントに向けられる。
【００１７】
調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）３３には、調節可能なチャープを持つ様々

な調節可能な分散グレーティングデバイスの任意の一つを用いることができる。チャープは、テーパード抵抗ヒータによって調節することも、テーパード歪みリリーフによって調節することも、あるいは磁気的に調節可能な歪みによって調節することもできる。抵抗ヒータによって調節される分散グレーティングデバイスについては、Eggeletonらによって１９９８年１０月３０日付けで出願された“Optical Grating Devices With Adjustable Cirp（調節可能なチャープを持つ光グレーティングデバイス）”なる名称の合衆国特許出願第０８／１８３，０４８号において開示されており；磁気的に調節可能なデバイスについては、Jinらによって１９９８年9月２３日付けで出願された“Tunable Dispersion Compensator and Optical System Comprising Same（調節可能な分散補償器およびこれを備える光システム）”なる名称の合衆国特許出願第09/159,178号に開示されているために、これらを参照されたい。

【００１８】

データ健全性モニタ３１には、システムの性能のレベルを検知し、伝送されるデータの品質を維持することが可能な限り、様々なタイプのモニタの任意の一つを用いることができる。

【００１９】

２．調節可能な分散補償グレーティング

図２は、図１の実施例に用いるのに適する一例としての調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）３３を示す。グレーティング４０は、ファイバ４２内にアポダイズドブラッググレーティングが形成されるように所定の間隔にて配置された一連の屈折率パタベーション４１から構成される。グレーティング４０は、電気的に制御可能な熱変換ボデー４３と熱的に接触するように配置される。熱変換ボデー４３は、熱を発生するボデーから構成することも、熱を能動的に除去するボデーから構成することもできるが、典型的には、ボデー４３は、熱を発生するボデー、例えば、ファイバ上の抵抗膜から形成される。発熱ボデー４３の抵抗をグレーティング４０に沿って線形的に変化させることで、グレーティングの加熱が線形的に変化され、これによって、線形的なチャープが生成される。この抵抗の変化は、例えば、グレーティング４０に沿ってボデー４３の膜厚を変化させることで達成される。ペアの電極４４、４５が、電源４８、例えば、モニタフィードバック回路内に設けられた電源からのワイヤ４６、４７と電気的に接触される。好ましくは、グレーティング４０は、熱絶縁のために直径約１ｃｍの円筒内に密封される。このような熱的に調節可能なグレーティングの構造、製造、および動作については、Eggletonらによって１９９８年１０月３０日付けて出願された“Optical Grating Devices With Adjustable Cirp（調節可能 なチャープを持つ光グレーティングデバイス）”なる名称の合衆国特許出願第08/183,048号において開示されているために、これを参照されたい。

【００２０】

以下では、一つの具体的な調節可能なグレーティング４０の設計およびその解析について述べる。

例

以下では、デバイスの帯域幅全体に渡って一定な分散を示し、かつ、これを加える電圧を変化させることで動的に調節することが可能な一例としてのファイバグレーティングデバイスの結果について詳細に述べる。このデバイスは、グレーティングの長さに沿って誘導される線形的な熱勾配に依拠し、この熱勾配は、ファイバの長さに沿っての位置と反比例して変化する厚さを持つ金属皮膜内の抵抗加熱によって得られる。チャープ率、従って、分散は、加える電流を変化させることで制御される。数値モデルおよび実験的な証拠から、非常に良好な近似にて、温度はグレーティングの長さに沿って線形的に変化し、結果としてのチャープは線形となることが確認された。さらに、分散は、１W以下の電力にて、３００ｐｓ／ｎｍ～１３５０ｐｓ／ｎｍの範囲で連続的に調節できることが実験的に確認された。グレーティングの分散特性の測定から、群遅延リプルの線形性からの偏差は、平均で、約１０ｐｓであることが確認されたが、これは、このデバイスが、１０ギガビット／秒の光波システム内でも十分に機能することを示す。以下では、最初にこのデバイスの

動作の原理について説明し、続いてチャープを記述するための単純なモデルと、このデバイス内の熱のフローに関する詳細な数値シミュレーションについて示し、最後にこのデバイスの幾つかの光学的な測定値について要約する。

【００２１】

このデバイスは、無チャープのアポダイズドファイバブラッググレーティングから成り、これに、グレーティングの長さに方向沿って膜厚が変化する金属の薄膜がコーティングされる。この薄膜内を流れる電流によって、膜の厚さによって決まる局所的な抵抗加熱が生成される。このため、膜厚を制御することで、温度プロフィル、従って、グレーティングのチャープをかなりの程度まで制御することができる。ここで、単純化の目的で、（１）ファイバのコア内の温度の分布は、抵抗膜によって生成される加熱電力の分布に従う（つまり、ファイバの長さに沿っての熱の流れは、加熱の分布から大きく逸脱するような温度の分布の構造を与えない）、（２）温度の増加は、加熱電力に正比例する（つまり、ファイバから流出する熱の流れは、放射および対流は厳密には非線形な過程であるが、概ね線形である）、および（３）ブラッグ共振のシフトは温度の変化に正比例する、ものと想定すると、チャープと膜厚プロフィルとの間の関係を記述する単純な式を導くことができる。最初に、局所的な抵抗R(z)が膜厚ｔ（ｚ）に反比例する事実を用いると、以下が得られる：

$$R(z) \sim 1/t(z) \qquad (2)$$

ここで、zは、グレーティングに沿っての位置を表す。散逸される局所電力が、

$$P(z) = I^2 R(z) \qquad (3)$$

によって与えられ、局所的な温度変化が散逸される電力に比例するものとすると、以下が得られる：

$$\Delta\lambda_B(z) \sim \Delta T(z) \sim I^2/t(z) \qquad (4)$$

ここで、$\Delta\lambda_B$（ｚ）は、ブラッグ波長の局所シフトを表し、ΔＴ（ｚ）は、温度の変化を表し、Ｉは、加えられた電流を表す。この式は、これらデバイスの挙動の単純なおおよその記述を与え、調節可能なグレーティングデバイスおよび関連する分散を設計するための指針となる。例えば、膜厚がグレーティングの長さ方向に沿っての距離に反比例するものと（つまり、ｔ（ｚ）～Ｉ／ｚなる関係を）想定すると、$\Delta\lambda_B$（ｚ）～ｚは、ブラッグ波長がその長さ方向に沿って線形的に変化するグレーティングに対応し；このグレーティングの分散は、良好な近似にて、Ｄ＝ｄΔτ／ｄΔλによって与えられる。ここで、Δτ＝２ｎＬ／ｃは、グレーティングのラウンドトリップ時間を表し、ｎは、ファイバの屈折率を表し、Ｌは、グレーティングの長さを表し、ｃは、真空中での光の速度を表し、Δλは、グレーティングの帯域幅を表す。こうして、式（４）を使用し、ｔ（ｚ）～１／ｚなる膜厚プロフィルを想定すると、グレーティングの分散は、加えられる電圧あるいは電流の二乗に反比例すること、つまり、Ｄ～Ｉ／V^2～１／I^2なる関係があることを簡単に示すことができる。

【００２２】

単純化の想定を行なわず、一般的なケースを扱うために、我々は、非線形有限要素モデルを用いて、上述と同様な構造の動作デバイスの定常状態での熱分布を計算した。このために、我々は、円筒対称性を想定し、熱拡散に対する以下の式を解いた：

$$\cdot(\kappa(r)\ (T(r,z))) = 0 \qquad (5)$$

ここで、Ｔ（ｒ，ｚ）は、温度を表し、κ（ｒ）は、熱伝導率を表す。この計算が、銀のテーパード薄膜をコーティングされたガラスファイバ（直径＝１２０μｍ）から成る２材料構造に対して遂行された。銀とガラスとの間の完全な熱接触が想定され、２つの材料間の境界における垂直方向の熱流の連続性が確保された。この計算には、適応的メッシュ細分（解析法）および、それぞれ、$\sigma E(T^4 - T^4_0)$、$A(T - T_0)^{5/4}$によって与えられる速度での銀の表面からの放射および対流熱損失が用いられた。ここで、Ｔは、材料の表面温度を表し、T_0は、周囲温度を表し、σは、シュテファン－ボルツマン定数を表し、Ｅは、金属表面の放射率を表し、Ａは、空気中の自然な対流の特徴を記述する定数である。金属コーティングの膜厚は、５～２０ミクロンの間で変化され、シミュレートされた

システムのファイバの長さ方向に沿ってのサイズは、コーティングされた領域内の温度分布がファイバの両端の境界条件（その周囲のそれに固定された温度）に敏感でなくなるのに十分な大きさに選択された。

【００２３】

図３ａから図３ｄは、グレーティングの加熱を理解するために有効である。図３ａは、ファイバに沿っての距離に概ね反比例する厚さの膜を施されたデバイスを示す。（このシミュレーションの目的に対しては、このコーティングは、３つの線形セグメントに分割され、これによって、その膜厚が位置に反比例する連続的なコーティングが近似される）。図３ｂは、デバイスのコアの計算温度を示す。この特定のシステムに対する結果は、前のパラグラフにおいて述べられた単純化のための想定がコーティングの両端から離れた位置では妥当であることを示す（つまり、式（４）がこれら位置では当てはまることを示す）。コーティングの両端での温度の位置への依存の様子は、前のパラグラフの想定（１）の有効性の限界に対する大雑把な尺度を与える。図３（ｃ）および３（ｄ）を参照されたい。これらは、ファイバの長さ方向に沿っての熱の拡散が、もっぱら薄膜ヒータの幾何のみによる場合に期待される温度分布からどの程度“しみでる（smears out）"するかを示す。図３ｃおよび図３ｄに示されるように、このシステムの場合は、有効な軸方向拡散長は、約１ミリである。ただし、この長さは、この構造からこの構造に沿って運び出される熱の厳密な速度に敏感に依存し、従って、この量の正確な推定値を得るためには、直接の実験的な測定が必要となる。

【００２４】

全長で８ｃｍのグレーティングを使用するデバイスに関して測定が行なわれた。グレーティングは、一様なブラッググレーティングの両端に存在する鋭い境界に起因する干渉効果を低減するために適当にアポダイズされた。これらデバイスは、標準の電気通信ファイバ（ゲミマニウムを含む）に製造され、これらに適当に水素が添加された。

【００２５】

図４（ａ）は、ファイバグレーティングの長さ方向に沿っての膜厚の光学測定値を示す。この特定の例では、金属膜の厚は、約５μｍ～５０μｍまで変化された。実線は、膜厚の目標プロフィル、つまり、ファイバの長さ方向に沿っての距離に反比例して変化し、所定の電流に対して、グレーティングの両端の間で、所望の温度の勾配を達成することができる設計プロフィルを表す。膜厚の測定の不確実性は、１μｍのオーダである。図４（ｂ）は、図４（ａ）に示す実線（目標プロフィル）からの膜厚の偏差を示す。ファイバグレーティングに沿っての長さの殆どの部分に対しては、この偏差は測定の不確実性（１μｍ）に相当するものであり、グレーティングの端においてのみ、この値を超える。

【００２６】

図５（ａ）は、ファイバグレーティングデバイスの反射スペクトルの典型的な測定値を、様々な加えられる電圧の値：つまり、（１）無チャープ状態のグレーティングに対応する０Ｖ；（２）０．６１１Ｖ；（３）０．８２Ｖ；および（４）１．１Ｖ、の関数として示す。この反射スペクトルの一様の広がりは、グレーティングの長さ方向に沿って単調的に概ね線形的に変化する加熱によって発生する。このスペクトルの広がりに伴って、反射ピークの中心も全体的にシフトすることに注意する。図５（ｂ）は、反射ピークの幅の変化を、反射ピークの中心波長のシフトの関数として示すが、このデータの線形性は、デバイスの線形的な温度依存性と一貫する。一般的には、このシフトは、望ましいものではなく、このため、機械的歪み、追加の熱源、あるいは熱シンクによって補償する必要がある。

【００２７】

図６～９は、このデバイスの分散特性を示す。図６は、１Ｖの電圧が加えられたときのこのデバイスの測定群遅延を波長の関数として示す。点線は、データの線形挿間を示すが、これは、Ｄ＝－３５３ｐｓ／ｎｍなる勾配を持つ。この群遅延内には、小さな構造が存在し、図７は、測定群遅延の線形性からの偏差を詳細に示す。ただし、この偏差は、ピーク間で１０ｐｓ以下である。この測定の解像度は０．００５ｎｍであり、このため、より細かなスケールでは、構造が存在する可能性は小さい。この構造は、チャープドブラッググ

レーティングにおいて典型的に見られ、この大きさは、さまざまな箇所で報告されている最良の結果と同程度である。これは、グレーティングおよび加えられるチャープの品質の尺度となる。

【００２８】

群遅延内に構造が発生する原因としては、以下が考えられる：（ａ）グレーティング製造過程における不完全性、これは、グレーティングプロフィルの有効屈折率に局所的なノイズを発生させる；（ｂ）ファイバコアの直径の偏差、これは、コアモードの有効屈折率の小さな変動を発生させ、このため、グレーティングプロフィルに追加の“ノイズ"を与える；（ｃ）非理想的なアポダイゼーション、これは、グレーティングに望ましくない干渉効果をもたらすが、ただし、これは、系統的なリプルとして現われ、このため、重大な問題とはならない；（ｄ）膜厚プロフィルの所望のプロフィルからの偏差、あるいは抵抗率あるいは表面テクスチャの非一様性、これは、温度の望ましくない変動の原因となる。現時点では、変動の主要な原因を決定することは困難であるが、ただし、図５（ｂ）から膜厚の変動が重要であることが示唆される。注目すべき点は、コーティングの厚さ測定値の長さ方向に沿っての位置への厳密な反比例からの偏差は、割合としては、群遅延測定値の偏差よりも幾分大きなことである。我々は、これはファイバの長さ方向に沿っての熱拡散のために短い長さスケールにて発生する加熱電力の分布のわずかな非一様性が“平滑化（smooth out）"され、この効果のために膜厚あるいは他の膜特性の小さな変動の影響が低減されるものと考える。

【００２９】

図８は、グレーティングデバイスの測定群遅延応答を、様々な異なる印加電圧、つまり：（１）０．５３Ｖ、（２）０．６１１Ｖ、（３）０．７２Ｖ、（４）０．８２Ｖ、（５）０．９４Ｖおよび（６）１．１Ｖの関数として示す。この図は、分散の調節能力を示す。測定群遅延内の“ノイズ”は、分散の値が増加すると少し増加するが、ただし、得られた最大の分散値に対しても、線形性からの偏差は、たった２０ｐｓである。

【００３０】

図９は、測定群速度分散を加えられた電圧の関数として示す。実線は、分散が加えられた電圧の二乗に反比例することを想定するデータの理論的な挿間を示す。測定された最大の分散は、約Ｄ＝－１３５０　ｐｓ／ｎｍであったが、これは、０．４Ｖなる印加電圧、および０．４Ｗなる電力に対応する。加えられる電圧を増加すると、温度勾配、従って、グレーティングの帯域幅が増加し、このため、グレーティングの分散は低減する。

【００３１】

この実験においては、加えられる電圧は、最大で、２００℃なるピーク温度に近い約１．１Ｖ（約１Ｗの電力）とされた。これは、信頼性が問題となるレベルより十分に低いレベルである。より具体的には、高温での動作には、多くの実用上の制約が存在する。例えば、デバイスの安定性を確保するために要求されるアニーリングのオフセットのために、より高い初期屈折率変化が要求される。

【００３２】

この研究は、ファイバ内の所望の温度分布、従って、分散を達成するために分布型のオンファイバ抵抗ヒータを用いるファイバブラッググレーティングデバイスの設計に向けられた。これらデバイスは、電力効率が良い、サイズがコンパクトである、製造が簡単である、光学特性を制御することができる、など様々な魅力的特性を持つ。我々は、実験的に、分散が－３００　ｐｓ／ｎｍから－１３５０　ｐｓ／ｎｍまで連続的に調節可能であること、および線形性からの偏差は平均で約１０　ｐｓであることを確かめた。以前の研究から、分散補償グレーティングの最適な動作のためには、測定分散の線形性からの平均の偏差はビット期間より十分に小さいこと、好ましくは、１０％のオーダが要求されることが示されている。ここに開示されるデバイスの測定群遅延の線形性からの偏差は１０ｐｓであり、従って、１０ギガビット／秒の光波システム（約１００ｐｓなるビット期間）内での動作に十分に耐え得る。40ギカ／ビットでの動作に対しては、リプルをさらに低減するために、グレーティングおよび金属コーティングの設計を改善する必要がある。ただし、

このグレーティングデバイスで達成可能な最大の分散は、グレーティングの絶対長によってのみ制約され、従って、より長いファイバブラッググレーティングを用いることで劇的に改善することができる。

【００３３】

上述のように、限定された軸方向の熱拡散は、望ましくないコーティングの厚さの小さな変動あるいはさらに小さな長さスケール（約１ｍｍのスケール）にて発生する他の不完全性に起因する加熱パワーの小さな変動の影響を“平滑化（smooth out）”し、群遅延の線形性を改善する傾向を持つことが期待される。

【００３４】

３．データ健全性モニタ

図１０は、図１の実施例に対して有効な一例としてのデータ健全性モニタ２０を示す。この実施例では、データ健全性モニタ２０は、光フィルタ１２０、光電気コンバータ（Ｏ－Ｅコンバータ）１２１、およびＲＦスペクトラムプロセッサ１２２を備え、さらに、データプロセッサ１２３が、分散補償器３３へのフィードバック制御信号を計算するために設けられる。一つの実施例においては、フィルタ１２０は、チャネルフィルタから成り、Ｏ－Ｅコンバータは、光ダイオードから成る。動作においては、フィルタ１２０は、解析されるべきスペクトル領域を選択し、Ｏ－Ｅコンバータ１２１は、フィルタリングされた光信号を対応する電気信号に変換する。スペクトラムプロセッサ１２２は、Ｏ－Ｅ変換された信号のＲＦスペクトラムを決定し、データプロセッサ１２３は、このスペクトラムを解析することで、システムを最適化するためのフィードバック信号を計算および生成する。スペクトラム最適化のための単純なスキームは、低周波成分の最小化を伴う。このような最適化フィードバック信号をどのように生成するかについては、F.Heismannらによって、Proceedings ECOC,'98,pp.529-530(1998)に掲載の論文“Automatic Compensation of First Order Polarization Mode Dispersion in a 10 Gb/s Transmission System”において説明されているために、これを参照されたい。

【００３５】

この特定のデータ健全性モニタは、長所として、受信機、あるいは、受信されたデータのエラー率の計算を必要としない。フィードバック制御信号を生成するために、光信号から電気的なデータおよびクロックを抽出することは必要とされない。オプションとして、あるいは補助的な要素として、遠隔地に分散補償器３０’を配置し、これをフィードバック信号に基づいて遠隔から制御することもできる。

【００３６】

図１１は、順方向エラー検出を用いるデータ健全性モニタ２０の代替実施例を示す。この実施例においては、フィードバック信号の生成は受信機端末内に組み込まれる。このデータ健全性モニタは、光フィルタ１２０、O-Eコンバータ１２１、データクロック回復回路１３０、およびエラー検出回路１３１を備えるが、これらは、全て、典型的には、受信機内に設けられる。このモニタは、さらに、エラー率を計算し、これら基づいて最適化フィードバック制御信号を生成するためのデータプロセッサ１３２を備える。このフィードバック制御信号は、システム全体に渡ってのデータの健全性を最適化すること、つまり、エラーを最小化することを目標とする。

【００３７】

動作においては、この実施例では、各波長チャネルの光データが、順方向エラー修正アルゴリズムに対するオーバヘッドビットを運ぶ。このアルゴリズムは、典型的には、Reed Solomon（リードソロモン）順方向エラー検出コードとして実現される（順方向エラー修正アルゴリズムに関しては、Reed Solomonコードおよびそれらの実現を含めて、例えば、BAG.Lee,M.KangおよびJ.Leeらの文献“Broadband telecommunication technology”,Artic House,1993を参照されたい）。このタイプの光波チャネルが、調節可能な分散補償器に通される。調節可能な分散補償器は、受信機端末と同一位置に配置することも、端末から遠隔に配置することもできる。遠隔に配置される場合は、分散補償器への制御信号は、管理シグナリングシステムを介して、遠隔分散補償器３０’へと送信される。端末の所で、こ

の信号が光学的にフィルタリングされ、特定の波長チャネルが選択される。このデータが、Ｏ－Ｅコンバータにて電気領域に変換され、受信された波長チャネルから、クロックおよびデータが抽出される。回復されたデータは、エラー修正回路に送られ、エラー修正アルゴリズムの実現に依存して、データが修正され、受信機端末の出力にパスされる。エラー修正回路は、さらに、所定の時間期間内に修正されたビットの数に関する情報も供給する。この数に基づいて、エラー修正前の、つまり、分散補償器に加えられた制御信号の現在の値に対応するビットエラー率が計算される。現在のエラー率および制御信号を、制御信号の前の設定に対応するエラー率および制御信号と比較することで、$\Delta_{error\ tate}$／$\Delta_{Control\ signal}$（エラー率の変化量／制御信号の変化量）なる比が導かれる。この比から、ビットエラー率を最小化するために制御信号をどの程度、どの方向に変更すべきかが決定される。計算された制御信号が分散補償器に加えられ、新たなエラー率が測定され、これを用いて再び新たな制御信号が計算される。

【００３８】

図１２は、データ健全性モニタ２０のもう一つの実施例を示す。この実施例では、エラー修正アルゴリズムの代わりに、データを運ぶために用いられるフレーミングフォーマットのエラー検出能力が利用される。このデータ健全性モニタは、図１１の実施例と、主に、データプロセッサ１３２のプログラミングが異なる。このようなフレーミングフォーマットの一例としてＳＯＮＥＴフレームがあるが、この場合は、ＳＯＮＥＴフレーム内のＢオクテットを介して、エラーの修正ではなく、エラーの検出が提供される。こうして、エラー率は、ＳＯＮＥＴフレーム内のＢオクテットにアクセスし、これを処理することで計算される。フィードバック信号生成の実現は、図１１に示す実現と類似する。この実現によるエラー率の検出およびフィードバック信号の生成は、データがフレーム内にパッケージ化され、フレームがエラー検出（あるいはエラー修正）情報を含むことを前提に、どのようなシグナリングプロトコルにも適用することができる。このような伝送プロトコルの例には、ＡＴＭフォーマットやＦＤＤＩフォーマットが含まれる。ＡＴＭフォーマットの場合は、エラー率はＨＥＣバイトを処理することで得られ、ＦＤＤＩフォーマットの場合は、伝送エラーの存在がＦＤＤＩフレームのフレーム状態セクション内に示される。こうして、エラー検出回路は、ＡＴＭフォーマットあるいはＦＤＤＩフォーマット内のエラーを検出する。

【００３９】

上述の様々な実施例は、本発明の原理を適用することで実現することが可能な多様な実現のほんの一部であり、当業者においては、本発明の精神および範囲から逸脱することなく、他の様々な構成が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図１】本発明による一つあるいは複数の自動分散補償モジュールを備える光ファイバ通信システムを簡略的に示す図である。

【図２】図１のモジュールに用いられる一例としての調節可能な分散補償要素を示す図である。

【図３】ａは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。ｂは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。ｃは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。ｄは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。

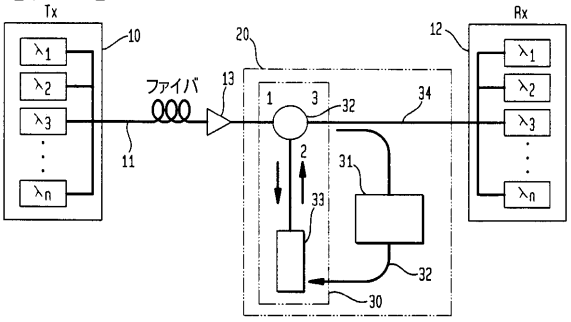
【図４】ａは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。ｂは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。

【図５】ａは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。ｂは、図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。

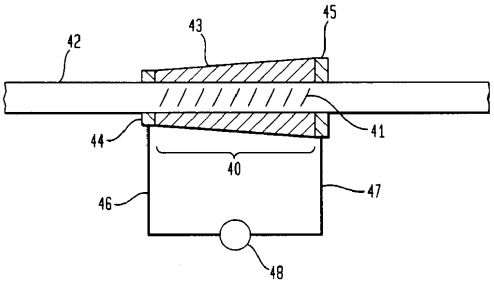
【図６】図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図で

ある。
【図７】図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。
【図８】図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。
【図９】図２の調節可能な分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す図である。
【図１０】図２のモジュールに用いられる一例としてのデータ健全性モニタを簡略的に示す図である。
【図１１】図２のモジュールに用いられる一例としてのデータ健全性モニタを簡略的に示す図である。
【図１２】図２のモジュールに用いられる一例としてのデータ健全性モニタを簡略的に示す図である。
【符号の説明】
１０　高速光送信機
１１　ファイバ伝送路
１２　受信機
１３　増幅器
２０　自動分散補償モジュール
３０　調節可能な分散補償器
３１　データ健全性モニタ
３２　フィードバック網
３２　サーキュレータ
３３　調節可能な分散補償グレーティング（ＤＣＧ）
３４　タップ
４０　グレーティング
１２０　光フィルタ
１２１　光電気コンバータ（Ｏ－Ｅコンバータ）
１２２　RFスペクトラムプロセッサ
１３０　データクロック回復回路
１３１　エラー検出回路
１３２　データプロセッサ

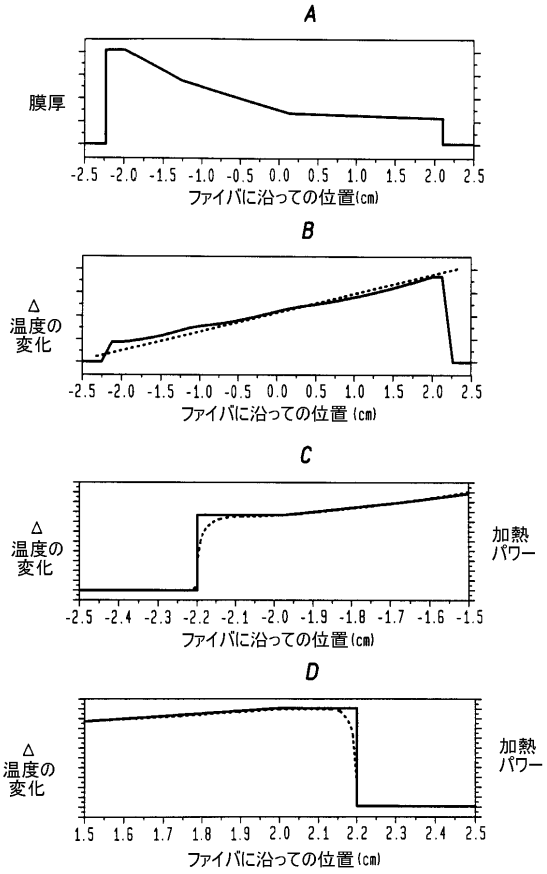
【図１】


Tx
Rx
λ1
λ2
λ3
λn
ファイバ
10
11
12
13
20
1
2
3
30
31
32
33
34

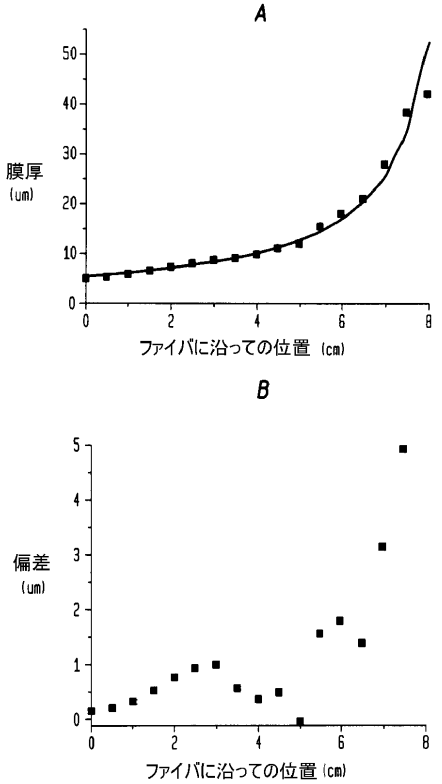
【図２】


42
43
45
44
41
40
46
47
48

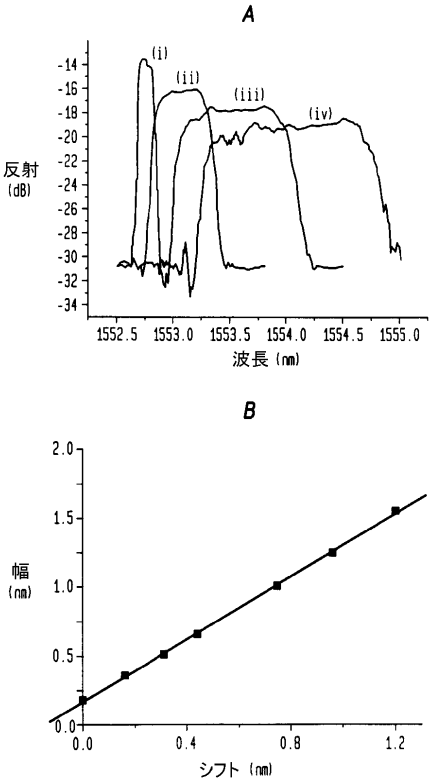
【図３】


A
膜厚
ファイバに沿っての位置(cm)
B
Δ
温度の
変化
ファイバに沿っての位置(cm)
C
Δ
温度の
変化
加熱
パワー
ファイバに沿っての位置(cm)
D
Δ
温度の
変化
加熱
パワー
ファイバに沿っての位置(cm)

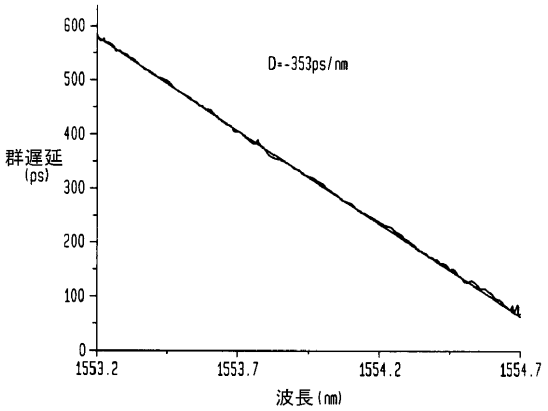
【図４】


A
膜厚
(um)
ファイバに沿っての位置 (cm)
B
偏差
(um)
ファイバに沿っての位置 (cm)

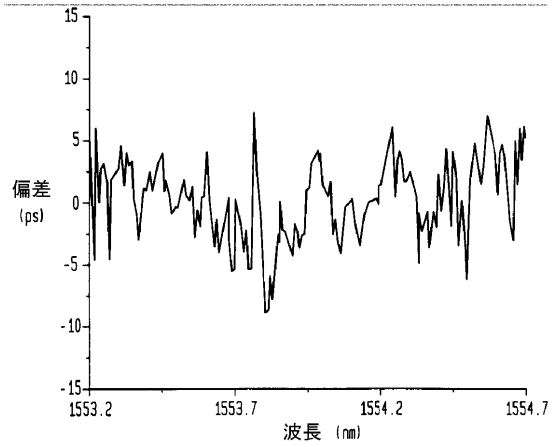
【図５】


A
(i)
(ii)
(iii)
(iv)
反射
(dB)
波長 (nm)
B
幅
(nm)
シフト (nm)

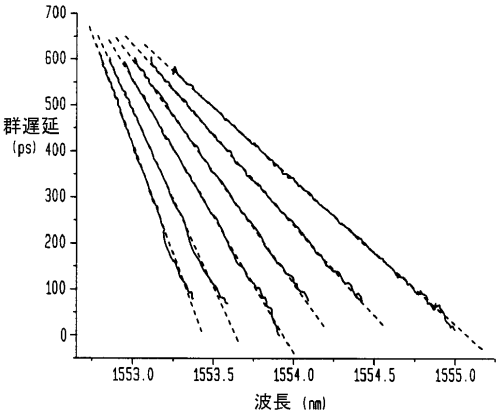
【図６】



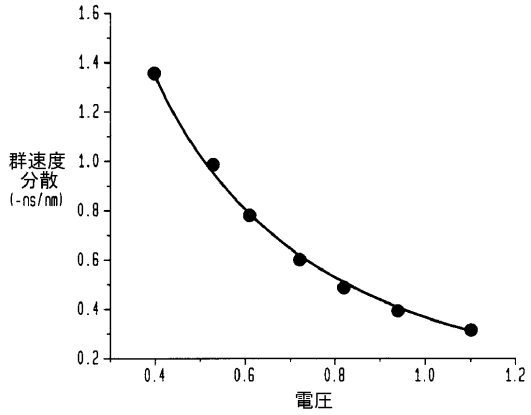
【図７】



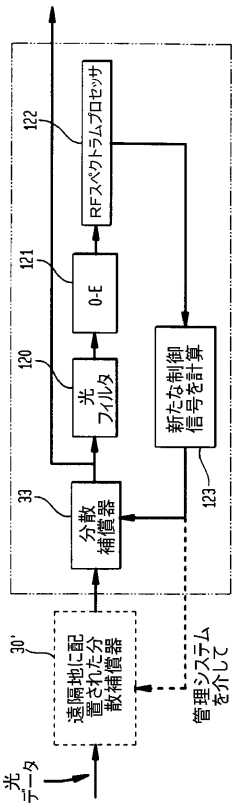
【図８】



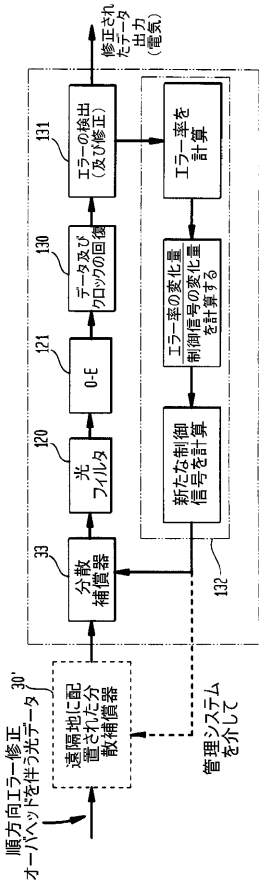
【図９】



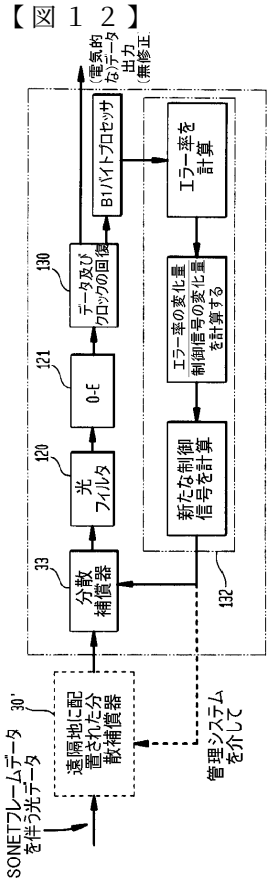
【図１０】



【図１１】



【図１２】


SONETフレームデータを伴う光データ
30'
遠隔地に配置された分散補償器
管理システムを介して
33
分散補償器
120
光フィルタ
121
O-E
130
データ及びクロックの回復
B1バイトプロセッサ
(電気的な)データ出力(無修正)
132
新たな制御信号を計算
エラー率の変化量制御信号の変化量を計算する
エラー率を計算

フロントページの続き

(74)代理人 100101498
弁理士 越智 隆夫
(74)代理人 100096688
弁理士 本宮 照久
(74)代理人 100104352
弁理士 朝日 伸光
(72)発明者 ベンジャミン ジョン イーグルトン
アメリカ合衆国 ０７９０１ ニュージャーシィ，サミット，オーブレイ ストリート １７
(72)発明者 ジョン エー．ロジャース
アメリカ合衆国 ０７９７４ ニュージャーシィ，ニュープロヴィデンス，スプリングフィールド アヴェニュー １２００ アパートメント １シー
(72)発明者 トーマス アンドリュー ストレッサー
アメリカ合衆国 ０７０６０ ニュージャーシィ，ウォーレン，ハーモニー ロード ６
(72)発明者 ケネス リー ウォーカー
アメリカ合衆国 ０７９７４ ニュージャーシィ，ニュープロヴィデンス，セントラル アヴェニュー １００３

審査官 望月 章俊

(56)参考文献 特開平１０－２２４２９７（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－３２７０１２（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－１７３２６３（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－２１６４６７（ＪＰ，Ａ）
Eggleton, B.J.; Rogers, J.A.; Westbrook, P.S.; Strasser, T.A., Electrically tunable power efficient dispersion compensating fiber Bragg grating, Photonics Technology Letters, 米国, IEEE, １９９７年 7月, Volume: 11 , Issue: 7, p. 854−856
Cruz, J.L.; Diez, A.; Andres, M.V.; Segura, A.; Ortega, B.; Dong, L., Fibre Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields, Electronics Letters, １９９７年 1月３０日, Volume: 33 Issue: 3, p. ２３５～２３６

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
H04B10/00-10/28
H04J14/00-14/08